

# Информатика и информационные технологии

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt187.01.011>

УДК 681.32

**Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ**, д-р техн. наук, главный науч. сотр.

отд. автоматизированных систем обработки данных

e-mail: [fainzilberg@voliacable.com](mailto:fainzilberg@voliacable.com)

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем

НАН Украины и МОН Украины, пр. Академика Глушкова, 40,

г. Киев, 03680 ГСП, Украина

## **ИНТЕРАКТИВНЫЙ СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ЛОКАЛИЗОВАННОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ**

---

*Разработана обобщенная модель интеллектуальной информационной технологии анализа и интерпретации сигналов сложной формы. Предложена архитектура инструментальной системы, обеспечивающей интерактивный синтез таких технологий. Ядро системы построено на двух абстрактных классах — обобщенной модели носителя данных (МНД) и обобщенной модели обработки данных (МОД), на базе наследников которых создан широкий набор интеллектуальных средств извлечения диагностической информации из сигналов, наблюдаемых в условиях внутренних и внешних возмущений.*

*Представлена методология выполнения доказательных экспериментов, обеспечивающих тестирование и оценку эффективности оригинальных алгоритмов обработки сигналов. Приведены примеры успешного синтеза ряда прикладных информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией, созданные с использованием разработанной инструментальной системы.*

**Ключевые слова:** информационная технология, сигналы сложной формы, инструментальная система.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При решении многих прикладных задач (техническая и медицинская диагностика, сейсмология, радиолокация и др.) возникает необходимость извлечения информации из скалярного или векторного сигнала  $z(t)$ , порождаемого объектом в условиях действия возмущений [1]. Сложности решения таких задач существенно возрастают, когда нужная информация локализована на относительно небольших интервалах (фрагментах)  $\Delta t_f \ll T_0$ ,  $\forall f = 1, 2, \dots$ , области определения  $T_0 = [t_1, t_2]$  наблюдаемого сигнала, а возмущения носят

© Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ, 2017

ISSN 2519-2205 (Online), ISSN 0454-9910 (Print). Киб. и выч. техн. 2017. № 1 (187)

**11**

неаддитивный характер [2]. Поэтому разработка интеллектуальных информационных технологий (ИТ), обеспечивающих извлечения информации из таких сигналов, — важная задача как в научном, так и в прикладном планах.

Разумеется, каждый объект конкретной предметной области порождает уникальный сигнал, что налагает специфические условия на компьютерную технологию извлечения скрытой информации из  $z(t)$ . Но если следовать *только* такой логике, то разработку *новой* ИТ нужно начинать практически с нуля.

С другой стороны, согласно [3], задача технологии как *науки* состоит в выявлении *общих* закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономных производственных процессов. В нашем случае такими процессами являются интеллектуальные вычислительные процедуры, обеспечивающие эффективный переход от «сырья» технологии  $z(t)$  к информационному продукту, ориентированному на конкретного пользователя [4].

**Цель статьи** — обобщить опыт, накопленный Международным научно-учебным центром информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины при разработке прикладных систем анализа и интерпретации сигналов с локально сосредоточенной информацией, при создании которых использована открытая для расширения инструментальная система интерактивного синтеза таких технологий.

## ОБЩЕЕННАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрим с общих позиций задачу *косвенной оценки* состояния  $s$  объекта по наблюдаемому сигналу  $z(t)$ . Такая задача возникает в тех случаях, когда отсутствуют датчики или индикаторы, обеспечивающие непосредственное определение  $s$ . Например, высокая температура и агрессивность среды препятствуют непосредственному определению химического состава расплава в сталеплавильной ванне. Невозможно при *массовых* профилактических обследованиях использовать инвазивный метод коронарографии для выявления лиц с высоким риском сердечно-сосудистых патологий: метод достаточно дорогой, а самое главное — небезопасный для пациента. Список подобных примеров можно было бы продолжить.

Будем полагать, что исследуемый объект при фиксированном состоянии  $s \in S$  порождает физическое поле, которое под действием закономерных процессов, происходящих внутри объекта, изменяется во времени.

Представим это поле в виде

$$z_0 = \Psi_s(u, t), \quad (1)$$

где  $t$  — время,  $u$  — точка пространства вокруг объекта, а  $\Psi_s$  — некоторая в общем случае неизвестная функция, зависящая от состояния  $s$ .

Тогда, если зафиксировать точку пространства  $u = u_0$  и измерять величину поля в этой точке, то функция  $\Psi_s(u, t)$  вырождается в скалярную функцию времени

$$z_0 = \Psi_s(u_0, t) \equiv z_0(t), \quad (2)$$

а при измерении поля (1) в нескольких фиксированных точках  $u_1, u_2, \dots, u_p$  пространства — в векторную функцию  $z_0(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$ .

Отсюда следует, что с формальной точки зрения ИТ обработки сигнала должна обеспечивать решение обратной задачи: требуется косвенно оценить неизвестное значение  $s$  по результатам измерения  $z_0(t)$  на отрезке наблюдения  $T_0 = [t_1, t_2]$  (рис 1).

В подавляющем большинстве практически важных задач функция  $\Psi_s(\cdot)$  неизвестна. И хотя есть все основания полагать, что закономерность (1) существует, построить адекватную модель для ее описания только на основе *физических* представлений затруднительно, а иногда и просто невозможно. Поэтому будем рассматривать (1) лишь как рабочую гипотезу, позволяющую обосновать принципиальную возможность построения ИТ для оценки состояния объекта  $s$  по наблюдаемому сигналу  $z_0(t)$ .

Поскольку при отсутствии аналитического описания функции  $\Psi_s(\cdot)$  проблема построения ИТ не может быть сведена лишь к *математической* задаче, будем рассматривать эту проблему с более общих позиций как *методологию* решения практических задач на основе *формальных* и *неформальных* приемов выбора и настройки базового набора вычислительных процедур.

Рассмотрим принципы построения инструментальной системы, обеспечивающей реализацию такого подхода применительно к задаче обработки сигналов с локально-сосредоточенными признаками, обобщенную модель которых можно представить в виде

$$z(t) = \Phi[z_0(t), \xi(t)] + h(t), \quad (3)$$

где  $z_0(t)$  — ненаблюдаемый полезный сигнал, искаженный внутренними  $\xi(t)$  и внешними  $h(t)$  возмущениями, а  $\Phi[\cdot]$  — некоторая в общем случае неизвестная функция.

В свою очередь полезный сигнал  $z_0(t)$  представляет собой последовательность фрагментов  $z_0^{(f)}(t)$ ,  $f = 1, \dots, F$ , заданных на интервалах  $\Delta t_f \ll T_0$ :

$$z_0(t) = \begin{cases} z_0^{(1)}(t), & 0 \leq t < t_0^{(1)}, \\ \dots \\ z_0^{(F)}(t), & t_0^{(F-1)} \leq t \leq t_0^{(F)} = T_0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T_0$  — область определения  $z_0(t)$ , причем только некоторые из этих фрагментов несут диагностическую ценность [5].

Для иллюстрации, на рис. 2 показаны примеры двух сигналов с локализованной информацией, порожденные объектами *разной физической природы*: электрокардиограмма (ЭКГ), представляющая собой запись в координатах «разность потенциалов  $E$  — время  $t$ » сигнала, несущего информацию об электрической активности сердца (рис. 2, а), и термограмма охлаждения железоуглеродистого расплава, отображаемая в координатах «температура  $T$ —время  $t$ » (рис. 2, б).

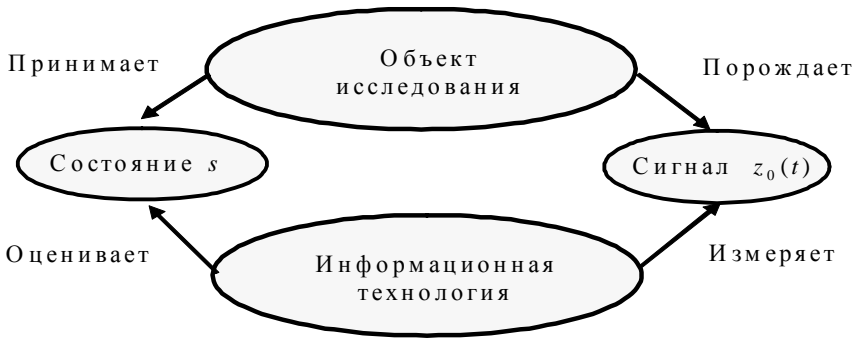


Рис. 1. Абстрактная модель ИТ обработки сигнала

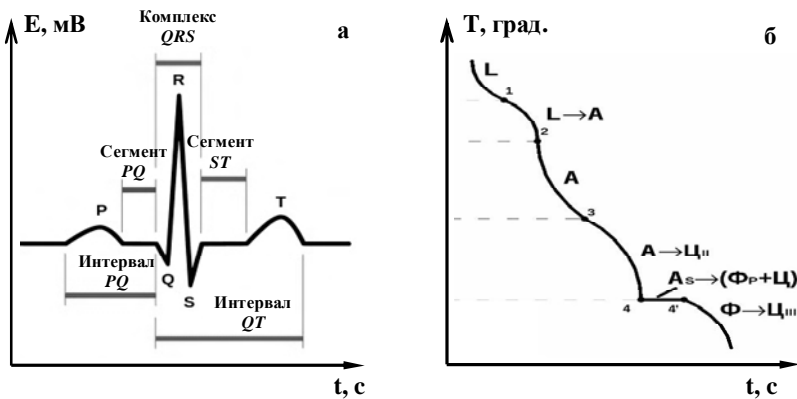


Рис. 2. Примеры сигналов с локально-сосредоточенной информацией

Несмотря на различие физической природы объектов, порождающих такие сигналы, они имеют общую особенность: оба сигнала содержат характерные фрагменты, по которым *косвенно* можно оценить состояние объекта: параметры конечной части желудочкового комплекса ЭКГ (участка  $ST - T$ ) несут информацию о начальных признаках ишемических изменений миокарда, а параметры фрагментов термограммы, вызванные термическими эффектами фазовых превращений, несут информацию о химическом составе расплава.

Таким образом *обобщенная задача* прикладной ИТ обработки сигналов с локально сосредоточенными признаками должна обеспечить (рис. 3):

- восстановление полезного сигнала  $z_0(t)$  по наблюдению  $z(t)$  в условиях действия внутренних  $\xi(t)$  и внешних  $h(t)$  возмущений;
- распознавание информативных фрагментов  $z_0^{(1)}(t), \dots, z_0^{(F)}(t)$  восстановленного сигнала  $z_0(t)$ ;
- анализ амплитудно-временных параметров (диагностических признаков)  $x_1, \dots, x_N$ , сосредоточенных на распознанных фрагментах  $z_0^{(1)}(t), \dots, z_0^{(F)}(t)$ ;
- реализацию диагностического правила  $s = s(x_1, \dots, x_N)$ , обеспечивающего оценку состояния объекта  $s$  по признакам  $x_1, \dots, x_N$ .



Рис. 3. Обобщенная модель формирования информационного продукта

Рассмотрим архитектуру инструментальной системы, которая позволяет провести необходимые экспериментальные исследования, направленные на ускорение разработки и повышение эффективности новых ИТ обработки сигналов с локально-сосредоточенными диагностическими признаками.

## АРХИТЕКТУРА ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Основная идея, которая положена в основу инструментальной системы, состоит в том, что с ее помощью конструктор прикладной ИТ имеет возможность [6]:

- проводить необходимые эксперименты для выбора и оптимальной настройки вычислительных процедур, реализующих отдельные стадии обработки сигнала;
- реализовывать технологическую цепочку алгоритмов обработки, используя готовые вычислительные компоненты самой инструментальной среды;
- расширять при необходимости состав компонентов инструментальной системы (рис. 4).

Разумеется, при реализации инструментальной системы, мы опирались на имеющийся огромный научный потенциал в области цифровой обработки сигналов, методов распознавания образов и моделирования сложных

систем по экспериментальным данным. В то же время оказалось, что при реализации конкретных прикладных систем обработки сигналов с локализованной информацией возникла необходимость повысить «интеллект» целого ряда известных алгоритмов.

Поэтому в библиотеку вычислительных процедур включен широкий набор как традиционных, так и оригинальных алгоритмов, в том числе вычислительных процедур, обеспечивающих

- генерацию детерминированных и случайных последовательностей;
- модификацию данных (интерполяцию, передискретизацию, формирование смесей, цепочек и т.п.);
- фильтрацию, в том числе адаптивную частотно-избирательную и ранговую;
- адаптивное сглаживание данных и их аппроксимацию различными функциями;
- статистический и спектральный анализ;
- анализ хаотичности параметров наблюдаемых сигналов на основе различных энтропийных оценок;
- переход от сигнала  $z(t)$  к его отображению в нормированных фазовых координатах  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$  или  $z(t)$ ,  $z(t - \tau)$ , где  $\tau$  — задержка во времени;
- обнаружение характерных точек, распознавание фрагментов и сегментацию одномерных и двумерных последовательностей.

Следует иметь в виду, что интеллектуальные ИТ, в отличие от традиционных, основанных лишь на вычислительных процедурах обработки данных, оперируют обобщенными понятиями (образами), которые предоставляют более полную информацию о внешней среде, а анализ таких образов порождает целостную картину изучаемых явлений. Важный инструмент образного представления задачи — когнитивная компьютерная графика, которая позволяет либо сразу увидеть решение задачи, либо получить подсказку для его нахождения [7].

Такие возможности когнитивной графики обусловлены тем, что человеческий мозг гораздо легче воспринимает и интерпретирует графический образ, чем породившие его числовые данные. Поэтому, если удачно представить данные задачи в виде когнитивного графического образа, то при его анализе решение может быть найдено без сложных вычислений.

Принимая во внимание этот факт, графический интерфейс инструментальной системы реализует широкий набор процедур отображения и манипуляции с графическими образами.

Для придания системе определенной гибкости и возможности последующего расширения, ее ядро построено на двух программных классах — обобщенной модели носителя данных (МНД) и обобщенной модели обработки данных (МОД).

Обобщенная модель носителя данных представляет собой *абстрактный* класс, на базе которого создаются объекты (наследники), обеспечивающие:

- хранение цифровых данных, необходимых для организации элементарных вычислительных процедур на различных стадиях обработки сигнала;
- отображение результатов обработки отдельных стадий в виде экранных графических образов и текстовой информации;

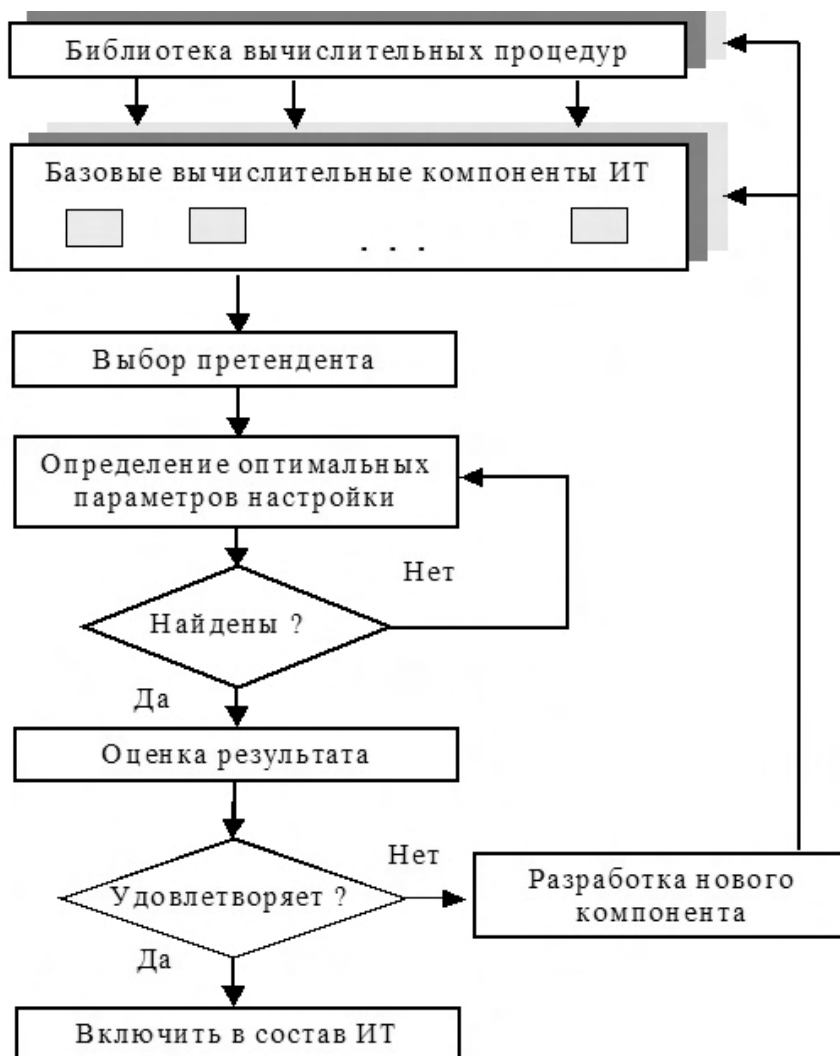


Рис. 4. Концептуальная идея инструментальной системы

- доступ к данным через их графические образы;
  - модификацию графических образов (рис. 5).
- С этой целью класс МНД выполнен в виде тройки

$$\text{МНД} = \langle D_c, D_g, G \rangle, \quad (5)$$

где  $D_c$  — поля содержательных данных,  $D_g$  — поля графических данных,  $G$  — методы отображения и модификации графических образов.

*Объединение* в одном объекте данных и методов их визуализации открывает возможность получать доступ к данным через их экранные графические образы и обеспечить необходимую привязку графического образа, визуализирующего результат обработки, к графическому образу исходных данных. Такие возможности являются весьма полезными, а порой и просто необходимыми при синтезе прикладных ИТ обработки сигналов.

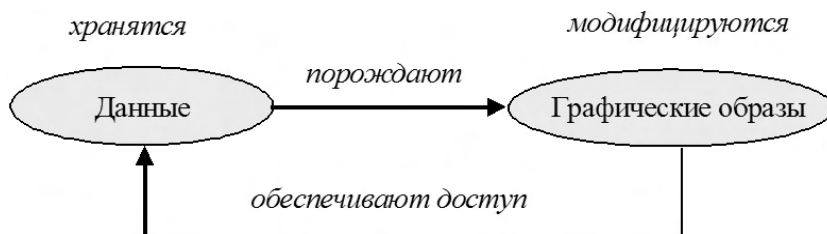


Рис. 5. Концептуальная идея построения класса МНД

Обобщенная модель обработки данных (**МОД**) также представляет собой абстрактный класс с универсальными полями, свойствами и методами, *инвариантными* относительно конкретной процедуры обработки, причем **МОД** содержит виртуальный метод «пустой» обработки, который доопределяется в наследниках этого класса.

Тем самым абстрактный класс **МОД** позволяет унифицировать понятие элементарной обработки данных, упорядочить процесс создания программных компонент, реализующих отдельные стадии обработки, и организовать удобный интерфейс взаимодействия между активными экземплярами (объектами) класса **МНД** и конкретной процедурой обработки (рис. 6).

Класс **МОД** поддерживает унифицированный интерфейс вызова любой библиотечной вычислительной процедуры:

$$\langle \text{Имя} \rangle (I_1, \dots, I_{N_1}; L_1^{(I)}, \dots, L_{N_1}^{(I)}; O_1, \dots, O_{N_1}; L_1^{(O)}, \dots, L_{N_2}^{(O)}; \alpha_1, \dots, \alpha_Q; \text{Mess}), \quad (6)$$

где:  $I_1, \dots, I_{N_1}$ ;  $O_1, \dots, O_{N_1}$  — указатели на массивы входных (Input) и выходных (Output) данных;  $L_1^{(I)}, \dots, L_{N_1}^{(I)}$ ;  $L_1^{(O)}, \dots, L_{N_2}^{(O)}$  — число элементов в соответствующих массивах;  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  — настроечные параметры процедуры обработки; *Mess* — строка сообщения об исключительной (аварийной) ситуации.

Такой интерфейс позволил *распараллелить* работу программистов, участвующих в создании инструментальной системы: прикладные программисты имеют возможность сосредоточиться на их главной задаче — реализации эффективных вычислительных процедур обработки данных, не заботясь об организации диалога с пользователем и методах графического представления результатов, а системные программисты — рассматривать процедуру обработки как некий «черный ящик».

Интерактивный синтез прикладной ИТ сводится к выбору и оптимальной настройке базовых вычислительных компонент инструментальной системы (рис. 7).

Для удобства настройки параметров  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  вычислительных процедур в инструментальной системе организована «виртуальная» связь органа управления и графического образа, отображающего результат обработки. Одновременно с перемещением ползунка настройки происходит изменение графического образа и конструктор может *визуально* определить «оптимальные» значения параметров настройки  $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$  в тех случаях, когда отсутствуют формальные методы оптимизации выбора параметров (рис. 8).



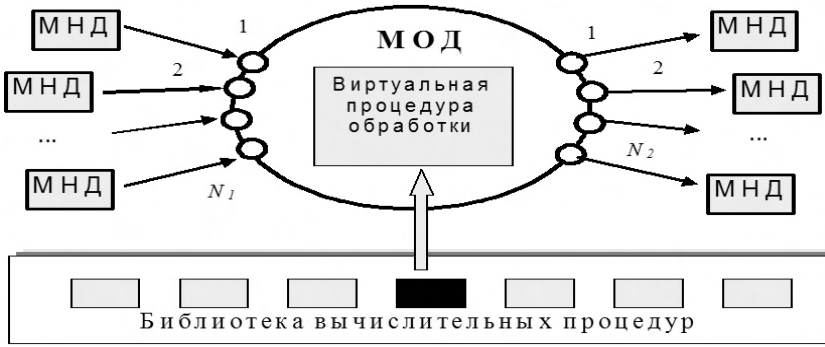


Рис. 6. Схема взаимодействия классов МНД и МОД в инструментальной системе

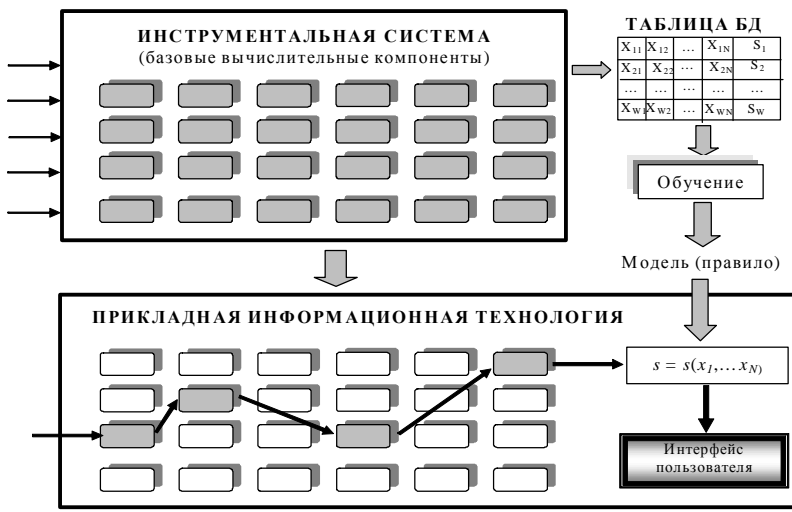


Рис. 7. Организация цепочки вычислительных процедур в прикладной ИТ

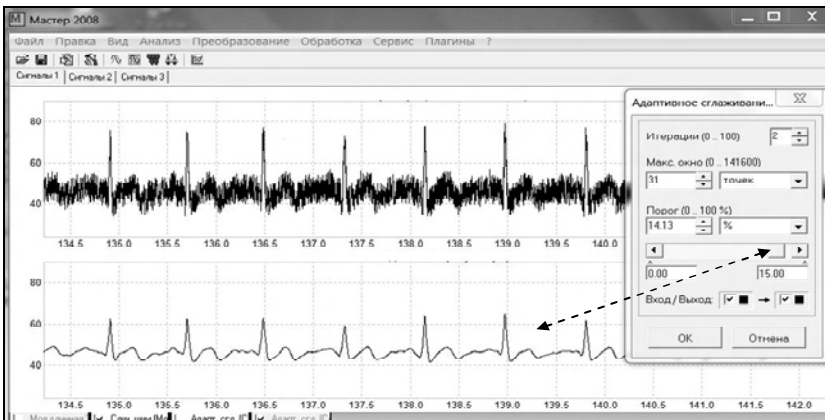


Рис. 8. Рабочее окно инструментальной системы в режиме интерактивной настройки параметров

Поскольку базовые вычислительные компоненты, помимо традиционных, включали оригинальные алгоритмы, то для оценки их эффективности требуется проведение доказательных экспериментов. Рассмотрим общую идею, положенную в основу методологии проведения таких экспериментов.

### **МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ДОКАЗАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ИНТЕРАКТИВНОМ СИНТЕЗЕ ПРИКЛАДНЫХ ИТ**

Напомним, что науке известно два метода доказательств — *дедуктивный* (от общего к частному) и *индуктивный* (от частного к общему). Дедукция составляет методологическую основу доказательств в математике и логике, хотя в последнее время дедуктивный подход получил развитие и при построении многих нематематических дисциплин — биологии, лингвистики, социологии и др. Поэтому при разработке инструментальной системы была поставлена задача организации доказательных экспериментов с *элементами дедуктивного подхода*.

Продемонстрируем возможность такого подхода на примере разработки алгоритма вычисления нового диагностического показателя ЭКГ, который ранее не применялся в кардиологической практике.

Анализ литературных данных и собственные эксперименты позволили выдвинуть предварительную *гипотезу* о диагностической ценности показателя  $\beta_T$ , характеризующего симметрию зубца  $T$  ЭКГ. Для оценки этого показателя предложены оригинальные вычислительные процедуры обработки ЭКГ на фазовой плоскости  $z(t), \dot{z}(t)$  [8], предусматривающие подавление помех на основе адаптивных алгоритмов частотно-избирательной фильтрации [9] и сглаживания данных [10], усреднение фазовых траекторий с использованием хаусдорфовой метрики [11] и определение  $\beta_T$  по распознанному участку реполяризации усредненной фазовой траектории.

Разумеется, с точки зрения современных представлений о доказательной медицине [12], прежде, чем рекомендовать новый диагностический показатель  $\beta_T$  для медицинской практики, нами проводились предварительные клинические испытания алгоритма компьютерной оценки  $\beta_T$  по реальным ЭКГ репрезентативных выборок наблюдений. При этом в группу *верифицированных* больных были включены пациенты, у которых ЭКГ-анализ по традиционным показателям в 12 отведениях *не выявил* каких либо отклонений от нормы, хотя у всех больных был предварительно установлен диагноз ишемической болезни сердца (ИБС) по данным коронарографии.

Тем не менее, обработка полученных результатов по  $t$ -критерию Стьюдента показала [13], что средние значения предложенного показателя  $\beta_T$  статистически значимо ( $p < 0,001$ ) различались в группах больных ИБС ( $n = 441$ ) и здоровых добровольцев ( $n = 387$ ) и составили соответственно  $0,956 \pm 0,43$  у.е. и  $0,665 \pm 0,12$  у.е.

Описанный эксперимент — классический пример *индуктивного* метода доказательства диагностической ценности  $\beta_T$ , когда результаты, полученные на *конечной* выборке наблюдений, с определенной степенью статистической достоверности *обобщаются* на генеральную совокупность.

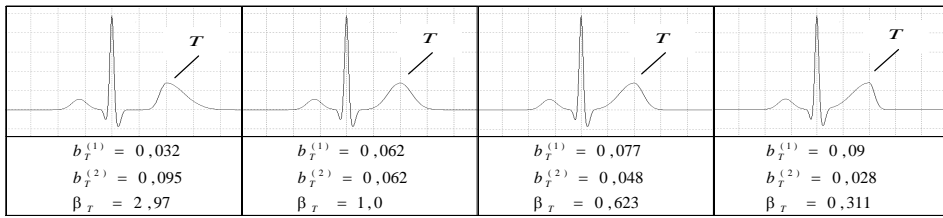


Рис. 9. Эталонные циклы ЭКГ с разной степенью симметрии зубца Т

Однако такими экспериментами не ограничилось исследование диагностической ценности  $\beta_T$ . Многочисленные наблюдения показали, что даже у одного испытуемого на протяжении короткого интервала времени показатель  $\beta_T$  может претерпевать достаточно большие изменения. Поэтому потребовалось построить *доказательный* эксперимент, который бы подтвердил, что динамика изменений  $\beta_T$  у конкретных испытуемых свидетельствует о высокой чувствительности  $\beta_T$  к интраиндивидуальным изменениям ЭКГ [14], вызванных функциональными изменениями миокарда, а не связана со случайными факторами, сопутствующими регистрации ЭКГ в реальных условиях.

Для постановки и выполнения такого эксперимента в состав инструментальной системы был включен дополнительный программный модуль, реализующий генеративную модель порождения искусственной ЭКГ реалистической формы [15], упрощенный вариант которой имеет вид

$$z_m(t) = \sum_{i \in \{P, Q, R, S, ST, T\}} A_i \exp \left[ -\frac{(t - \mu_i)^2}{2\tilde{b}_{im}^2} \right] + h(t), \quad m = 1, \dots, M, \quad (7)$$

где

$$\tilde{b}_{im} = \begin{cases} b_i, & \text{если } i \neq T, \\ b_T^{(1)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(1)}) \quad \forall t \leq \mu_T, & \text{если } i = T, \\ b_T^{(2)}(1 + \varepsilon_{Tm}^{(2)}) \quad \forall t > \mu_T, & \text{если } i = T, \end{cases} \quad (8)$$

$A_i, \mu_i, b_i, i \neq T$  — параметры, характеризующие форму зубцов  $P, Q, R, S$  и сегмента  $ST$ , а параметры  $A_T, \mu_T, b_T^{(1)}, b_T^{(2)}$  — форму зубца  $T$ , причем соотношение параметров  $b_T^{(1)}$  и  $b_T^{(2)}$  определяет степень симметрии зубца  $T$  полезного сигнала — «эталонного» цикла (рис 9).

Последовательности независимых случайных величин

$$\varepsilon_{Tm}^{(1)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad \varepsilon_{Tm}^{(2)} \in [-\varepsilon_T^0, \varepsilon_T^0], \quad m = 1, \dots, M, \quad (9)$$

которые с нулевыми математическими ожиданиями равномерно распределены на интервалах, ограниченных числами  $\pm \varepsilon_T^0$ , определяют уровень *независимых* случайных искажений параметра  $\beta_T$  на генерируемых циклах искусственной ЭКГ, а функция  $h(t)$  моделирует внешние аддитивные помехи, в частности, сетевую помеху 50 Гц.

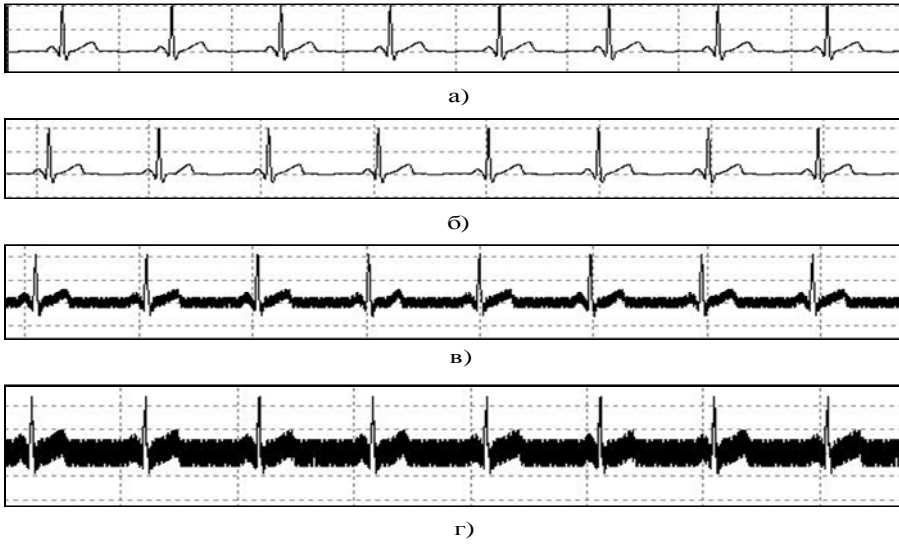


Рис. 10. Примеры тестовых сигналов

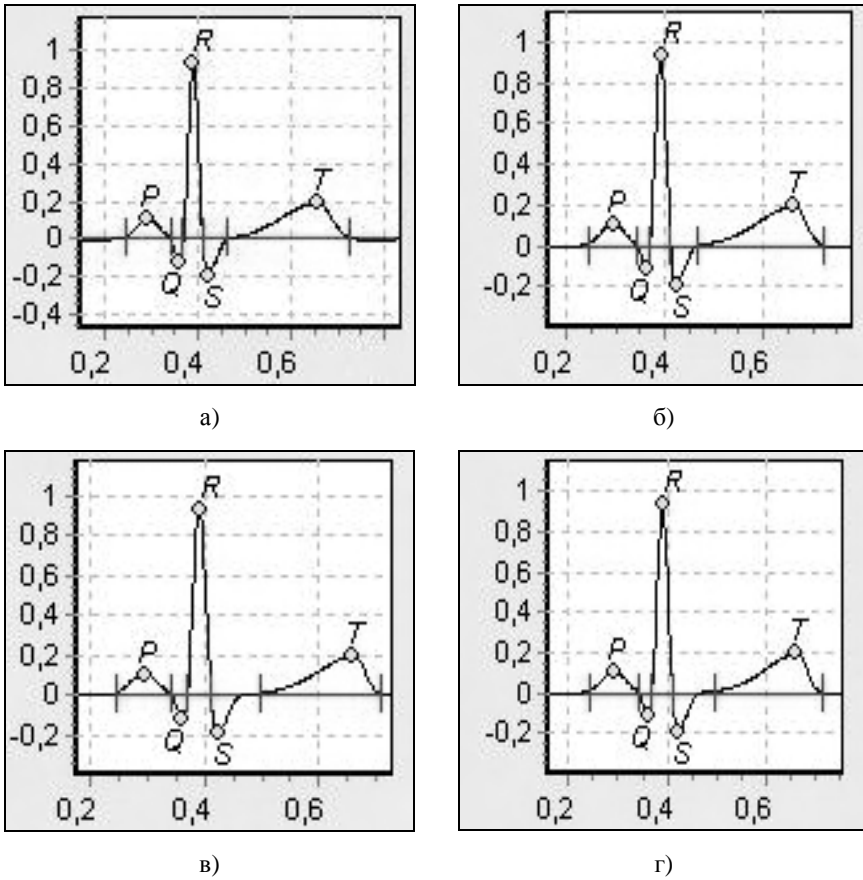


Рис. 11. Оценки эталонного цикла по тестовым сигналам

На основе модели (7) может быть порождено *сколь угодно много* искусственных ЭКГ, искаженных возмущениями  $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$  и  $h(t)$ , для которых, в отличие от реальных ЭКГ, *известно* истинное значение показателя  $\beta_T$  *ненаблюдаемого* полезного сигнала.

Это позволило построить схему *доказательного* эксперимента с элементами *дедуктивного* подхода в том смысле, что от *общей* посылки (в данном случае — генеративной модели) осуществляется переход к *частному* результату, подтвердившему высокую воспроизводимость алгоритма вычисления  $\beta_T$ .

Идея таких экспериментов [16] состояла в сравнении истинных значений  $\beta_T$  *ненаблюдаемого* полезного сигнала и оценок  $\hat{\beta}_T$ , полученных на основе компьютерной обработки тестовых сигналов, порождаемых моделью (7) при *различных* значениях внутренних и внешних возмущений.

Эксперименты показали, что если истинные значения  $\beta_T$  лежат в диапазоне 0,3–3,0 у.е., случайные возмущения  $\varepsilon_{Tm}^{(1)}$ ,  $\varepsilon_{Tm}^{(2)}$  на последовательности циклов не превышают 50 %, а сетевая помеха  $h(t)$  не превышает 50 % диапазона изменения тестового сигнала, то при обработке не менее 50-ти циклов обеспечивается высокая точность и воспроизводимость оценки показателя  $\beta_T$ : стандартная ошибка составила всего лишь 0,021 у.е., а средняя относительная ошибка не превышала 2,64 %.

Для иллюстрации, на рис. 10 приведены искусственные ЭКГ, порожденные моделью (7), по одному и тому же эталону  $z_0(t)$  с заданным показателем симметрии  $\beta_T = 0,311$  без искажений (рис. 10, а), при  $\varepsilon_T^0 = 50$  % и  $h(t) \equiv 0$  (рис. 10, б), при  $\varepsilon_T^0 = 50$  % и 20 % сетевой помехе  $h(t)$  (рис. 10, в) и при  $\varepsilon_T^0 = 50$  и 50 % сетевой помехе  $h(t)$  (рис. 10, г), которые использовались в качестве тестовых сигналов в одном из многочисленных экспериментов.

Несмотря на существенный уровень искажений после обработки тестовых сигналов, были получены практически неразличимые оценки  $z_0(t)$  (рис. 11).

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СИНТЕЗА ПРИКЛАДНЫХ ИТ

Инструментальная система позволила провести необходимые эксперименты и тем самым расширить функциональные возможности отечественного диагностического комплекса **ФАЗАГРАФ**<sup>®</sup>, реализующего инновационный в кардиологии метод фазаграфии [17, 18]. Метод предусматривает анализ и интерпретацию ЭКГ-сигнала  $z(t)$  на фазовой плоскости  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t)$ , где  $\dot{z}(t)$  — скорость изменения электрической активности сердца.

Диагностическая ценность фазаграфии состоит в использовании дополнительной информации, содержащейся в скоростных характеристиках исследуемого процесса. Поскольку дифференцирование зашумленных функций относится к числу некорректно поставленных математических задач, то для практической реализации фазаграфии разработаны специаль-

ные вычислительные процедуры фильтрации и регуляризации, обеспечившие надежную оценку  $\dot{z}(t)$ .

Интеллектуальные компоненты инструментальной системы использованы при синтезе **ИТ MAGWIN**, которая разрабатывалась по заказу фирмы SQUID AG (Германия) [19]. Технология обеспечивает компьютерную обработку магнитокардиограмм (МКГ) в реальных клинических условиях. Сложности решения этой задачи обусловлены тем, что измерение сигнала проводится в реальных клинических условиях (без использования дорогостоящего экранированного помещения). Поэтому сигнал существенно искажен различного рода возмущениями, для подавления которых привлекались оригинальные процедуры фильтрации.

Инструментальная система позволила также ускорить разработку и повысить эффективность необходимых исследований при разработке **ИТ ТЕРМОГРАФ** [20]. Сырьем этой технологии является сигнал, несущий информацию о процессе кристаллизации пробы серого чугуна, а продуктом технологии — процентное содержание углерода C, кремния Si, хрома Cr, марганца Mn, меди Cu, фосфора P, а также углеродный эквивалент CE, коэффициент эвтектического насыщения SC, прочность на растяжение Rb, твердость Hb и другие технологические показатели литейного процесса.

Компоненты инструментальной системы использовались при интерактивном синтезе информационной технологии **САЛЮКС** [1], которая реализует нетрадиционный метод диагностики. Метод основан на эффекте биохемилюминесценции — свечении организмов и биосубстратов за счет энергии экзотермических химических реакций, протекающих в тканях. Сырье технологии САЛЮКС — сигнал, несущий информацию о процессе свечения образца биологической жидкости пациента с добавками специфического антигена, а продукт технологии — результаты дифференциальной диагностики заболеваний органов пищеварения (печень, желчевыводящие пути, поджелудочная железа, толстый и тонкий кишечник), бактериального или грибкового инфицирования и других патологий.

Инструментальная система позволила реализовать экспериментальный образец **ИТ АНТИСТРЕСС** [21], которая на основе принципа биологической обратной связи обучает пользователя навыкам правильного дыхания. С этой целью в реальном масштабе времени определяются показатели variability сердечного ритма, которые порождают характерные когнитивные графические образы на экране монитора в виде динамических ритмограмм, скаттерограмм и гистограмм сердечного ритма. Методика обучения основана на управлении параметрами дыхания с учетом индивидуальных свойств сердечного ритма конкретного пользователя.

Интеллектуальные вычислительные компоненты инструментальной системы и оригинальные методы графической визуализации данных позволили обнаружить интересные свойства фазовых портретов одноканальной ЭКГ. Оказалось, что фазовые портреты ЭКГ, подобно отпечаткам пальцев, имеют уникальные характеристики, присущие конкретным лицам, причем эти характеристики остаются неизменными на протяжении длительного периода наблюдений (более 10 лет) [22]. Обнаруженные свойства положили основу нового научного направления, результатом которого могут стать новые средства биометрической идентификации личности.

Мы привели лишь несколько успешных примеров использования инструментальной системы при создании новых информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией. Несомненно, интеллектуальные возможности системы будут активно использованы при выполнении экспериментальных исследований, направленных на обработку других аналогичных сигналов, примеры которых приведены в работе [4].

## ВЫВОДЫ

Разработанная инструментальная система позволяет конструктору прикладных ИТ в интерактивном режиме реализовать технологическую цепочку процедур обработки сигнала с локально сосредоточенными признаками, используя открытый для расширения набор базовых вычислительных компонент и средства когнитивной компьютерной графики.

Ядро инструментальной системы построено на основе двух программных классов, реализующих обобщенную модель носителя данных (МНД) и обобщенную модель виртуальной обработки данных (МОД). На базе наследников класса МОД создан широкий набор готовых к практическому применению вычислительных компонент, реализующих традиционные и оригинальные алгоритмы обработки сигналов с локально сосредоточенными признаками. Подтверждение эффективности новых вычислительных алгоритмов проводилось на основе доказательных экспериментов, методология которых продемонстрирована на примере оценки оригинального показателя ЭКГ, ранее не используемого в кардиологической практике.

Приведенные примеры успешного синтеза прикладных информационных технологий обработки сигналов с локализованной информацией использования демонстрируют эффективность разработанной инструментальной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика. Киев: Наук. Думка, 2008. 333 с.
2. Гриценко В.И., Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по сигналам сложной формы в условиях внутренних и внешних возмущений. *Доповіді НАН України*. 2013. № 12. С. 36–44.
3. Технология. *Советский энциклопедический словарь*. М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 1330.
4. Файнзильберг Л.С. Интеллектуальные возможности и перспективы развития фазографии — информационной технологии обработки сигналов сложной формы. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2016. Вып. 186. С. 56–77.
5. Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. Киев: Освита України, 2013. 191 с.
6. Файнзильберг Л.С. Инструментальная система для экспериментальной оценки эффективности алгоритмов предварительной обработки сигналов сложной формы. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 2. С. 3–12, 53.
7. Зенкин А.А. Когнитивная компьютерная графика. М.: Наука, 1991. 192 с.
8. Fainzilberg L.S. Nowa metoda interpretacji zapisu EKG w balaniach skriningowych oraz w opiece domowej. *Zdrowie publiczne (Public Health)*. 2005. Vol. 115. № 4. P. 458–464.

9. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Iss. 8. P. 55–70.
10. Файнзильберг Л.С. Адаптивное сглаживание шумов в информационных технологиях обработки физиологических сигналов. *Математичні машини і системи*. 2002. № 3. С. 96–104.
11. Файнзильберг Л.С. Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве. *Кибернетика и системный анализ*. 2003. № 3. С. 20–28.
12. Минцер О.П. Теория и практика доказательной медицины. *Лікування та діагностика*. 2004. № 3. С. 7–15.
13. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ® — эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца. *Клиническая информатика и телемедицина*. 2010. Т. 6. Вып. 7. С. 22–30.
14. Schijvenaars V.J.A., Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms. *Journal of Electrocardiology*. 2008. Vol. 41. Iss. 3. P. 190–196.
15. Файнзильберг Л.С. Имитационные модели порождения искусственных электрокардиограмм в условиях внутренних и внешних возмущений. *Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science*. 2012. № 34. С. 92–104.
16. Спосіб перевірки метрологічних характеристик цифрових електрокардіографів: пат. 100330 Україна: МПК G01 D 21/00. № а 2011 11909; заявл. 10.10.11; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. 6с.
17. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Персоніфіковані засоби цифрової медицини — крок до здоров'я. *Вісн. НАН України*. 2012. № 8. С. 62–70.
18. Гриценко В.І., Файнзильберг Л.С. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы. *Врач и информационные технологии*. 2013. № 3. С. 52–63.
19. Васецкий Ю.М., Файнзильберг Л.С. Чайковский И.А. Методы анализа структуры распределения тока в проводящей среде применительно к магнитокардиографии. *Электронное моделирование*. 2004. № 3. С. 95–115.
20. Файнзильберг Л.С. Диагностика состояния объектов по фазовым траекториям наблюдаемых сигналов с локально сосредоточенными признаками. *Проблемы управления и информатики*. 2004. № 2. С. 56–67.
21. Файнзильберг Л.С., Кондратюк Т.В., Семергей Н.А. АНТИСТРЕСС — новая информационная технология управления регуляторными системами организма человека на основе биологической обратной связи. *Управляющие системы и машины*. 2011. № 3. С. 62–72.
22. Файнзильберг Л.С., Корчинська З.А., Семергей М.О. Програмно-технічний комплекс для дослідження нового методу біометричної ідентифікації особистості за фазовим портретом ЕКГ. *Криміналістичний вісник*. 2015. № 1(23). С. 63–71.

Получено 22.12.2016

## REFERENCES

1. Fainzilberg L.S. Information technology for signal processing of complex shape. Theory and practice. Kiev: Nauk. Dumka, 2008. 333 p (in Russian).
2. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Computer diagnostics using complex-form signals under conditions of internal and external disturbances. *Reports of the NAS of Ukraine*. 2013. № 12. P. 36–44 (in Russian).
3. Technology. *Soviet Encyclopedic Dictionary*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. P. 1330 (in Russian).
4. Fainzilberg L.S. Intelligent features and development prospects of fazagraphy — information technology processing complex shape signals. *Kibernetika i vyčislitelnaâ tehnika*. 2016. Iss. 186. P. 56–77 (in Russian).
5. Fainzilberg L.S. Computer diagnostics by phase portrait of electrocardiogram. Kiev: Os-vita Ukrainy, 2013. 191 p. (in Russian).



6. Fainzilberg L.S. Tool system for experimental evaluation of the effectiveness of processing algorithms for signals of complex shape. *Control systems and machines*. 2008. Vol. 2. P. 3–12, 53 (in Russian).
7. Zenkin A.A. *Cognitive Computer Graphics*. Moscow: Nauka, 1991. 192 p. (in Russian).
8. Fainzilberg L.S. Nowa metoda interpretacji zapisu EKG w balaniach skriningowych oraz w opiece domowej. *Zdrowie publiczne (Public Health)*. 2005. Vol. 115. № 4. P. 458–464.
9. Fainzilberg L.S., Glushauskene G.A. Narrow-band Rejection Filter for Suppression of Harmonic Concentrated Interference on the Basis of Discrete Fourier Transform. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2009. Vol. 41. Iss. 8. P. 55–70.
10. Fainzilberg L.S. Adaptive smoothing of noise in information technology processing of physiological signals. *Mathematical Machines and Systems*. 2002. № 3. P. 96–104. (in Russian).
11. Fainzilberg L.S. Restoration of a standard sample of cyclic waveforms with the use of the Hausdorff metric in a phase space. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2003. № 3. P. 20–28 (in Russian).
12. Minzer O.P. Theory and practice of evidence-based medicine. *Diagnosis and treatment*. 2004. № 3. P. 7–15 (in Russian).
13. Fainzilberg L.S. FASEGRAPH<sup>®</sup> — efficient information technology of ECG processing in the problem of ischemic cardiac disease screening. *Clinical Informatics and Telemedicine*. 2010. Vol. 6. Iss. 7. P. 22–30 (in Russian).
14. Schijvenaars B.J.A., Van Herpen G., Kors J.A. Intraindividual variability in electrocardiograms. *Journal of Electrocardiology*. 2008. Vol. 41. Iss. 3. P. 190–196.
15. Fainzilberg L.S. Simulation models of generating artificial cardiograms in terms of internal and external disturbances. *Journal of Qafqaz University — Mathematics and Computer Science*. 2012. № 34. P. 92–104 (in Russian).
16. Method for verification of metrological characteristics of digital electrocardiographs: UA Patent 100330:МПК G01 D21/00. № a 2011 11909, Bul. № 23. P. 6. 2012 (in Ukrainian).
17. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Personified digital medicine tools — step to health. *Herald of the NAS of Ukraine*. 2012. № 8. P. 62–70 (in Ukrainian).
18. Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. FASEGRAPH<sup>®</sup> — information technology for the integrated assessment of the cardiovascular system state of the electrocardiogram phase portrait. *Information technologies for the Physician*. 2013. № 3. P. 52–63 (in Russian).
19. Vasetsky Y.M., Fainzilberg L.S., Chaikovskiy I.A. Methods of structure analysis of current distribution in conducting medium for magnetocardiography. *Electronic modeling*. 2004. № 3. P. 95–115 (in Russian).
20. Fainzilberg L.S. Diagnostics of object state by phase trajectories of observed signals with locally concentrated features. *Problems of Control and Informatics*. 2004. № 2. P. 56–67 (in Russian).
21. Fainzilberg L.S., Kondratyuk T.V., Semerhey N.A. ANTISTRESS — A New Information Technology for the Management of Regulatory Systems of a Human Body Based on the Biofeedback. *Control systems and machines*. 2011. № 3. P. 62–72 (in Russian).
22. Fainzilberg L.S., Korchynska Z.A., Semerhey M.O. Program-technical complex for study of a new method for biometric identification by phase portrait of electrocardiogram. *Forensic Herald*. 2015. № 1(23). P. 63–71 (in Ukrainian).

Recieved 22.12.2016

Л.С. Файнзильберг, д-р техн. наук, доцент, головний наук. співроб.  
від. автоматизованих систем обробки даних  
e-mail: fainzilberg@voliacable.com  
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій  
і систем НАН України та МОН України, пр. Академіка Глушкова, 40,  
м. Київ, 03680 ГСП, Україна

## ИНТЕРАКТИВНИЙ СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ЛОКАЛІЗОВАНОЮ ІНФОРМАЦІЄЮ

Розроблено узагальнену модель інтелектуальної інформаційної технології аналізу та інтерпретації сигналів складної форми. Запропоновано архітектуру інструментальної системи, яка забезпечує інтерактивний синтез таких технологій.

Ядро системи побудовано на двох абстрактних класах — узагальненій моделі носія даних (МНД) і узагальненій моделі оброблення даних (МОД). На основі спадкоємців цих класів моделей створено набір базових обчислювальних компонент, які забезпечують відновлення корисного сигналу за спостереженнями за умов дії внутрішніх і зовнішніх збурень.

Створено готові до використання базові програмні компоненти розпізнавання інформаційних фрагментів відновленого сигналу та аналізу амплітудно-часових параметрів (діагностичних ознак), зосереджених на розпізнаних фрагментах, за якими реалізуються діагностичні правила, що забезпечують оцінювання поточного стану об'єкта.

Запропоновано методологію доказових експериментів з елементами дедуктивного підходу, ефективність якої продемонстровано на прикладі оцінювання оригінального показника електрокардіограми.

Компоненти інструментальної системи використано під час синтезу прикладних інформаційних технологій **ФАЗАГРАФ**<sup>®</sup> для оперативного контролю стану серцево-судинної системи за електрокардіограмою, **MAGWIN** для комп'ютерного оброблення магнітокардіограм в реальних клінічних умовах, **ТЕРМОГРАФ** для контролю технологічних показників ливарного процесу, **САЛЮКС** для комп'ютерного оброблення кривих біохемілюмінесценції та ряду інших інтелектуальних інформаційних технологій.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, сигнали складної форми, інструментальна система

L.S. Fainzilberg, Doctor of Engineering, Associate Professor (Docent),  
Chief Researcher of Data Processing Department  
e-mail: fainzilberg@voliacable.com  
International Research and Training Center for Information Technologies and Systems  
of the NAS of Ukraine and of Ministry of Education and Science of Ukraine,  
av. Acad. Glushkova, 40, Kiev, 03680, Ukraine

## INTERACTIVE SYNTHESIS OF INFORMATION TECHNOLOGY SIGNALPROCESSING WITH LOCALIZED INFORMATION

*Introduction.* Current task that inevitably arises before the designer of information technology (IT) signal processing with localized information — selection and setup of intelligent computational procedures to ensure an effective transition from the signal distorted by internal and external perturbations to the information products targeted at specific user.

The purpose of the article is to summarize the experience in the development of IT applications for the analysis and interpretation of the signals with localized information using an open tool for the expansion of the instrumental system.

*Methods.* On the basis of the object-oriented approach and IT tasks analysis, focused on the extraction of diagnostic information from the distorted signal with a locally-focused

features, held decomposition of the general problem of applied IT synthesis in different applications.

*Results.* Generalized model of IT analysis and signals of complex shape interpretation has been developed. The development system architecture is proposed, the core of which is based on two abstract classes — a data carrier generalized model (DCM) and the generalized data processing model (DPM).

On the basis of the heirs of these classes set up a set of basic computational component, ensuring the recovery of the useful signal monitoring in terms of internal and external disturbances, detection of informative reconstructed signal fragments, analysis of amplitude-time parameters (diagnostic indicators), focusing on the detected fragments and implementation of diagnostic rules, provides an assessment of the state of the object by the calculated characteristics.

Methodology of the experiments *evidence* with elements of the deductive approach, which is demonstrated by the example of the original evaluation index electrocardiogram is proposed.

*Conclusions.* The developed instrumental system allows to accelerate the development of the new IT processing of complex shape signals and to improve its effectiveness.

Examples of the successful synthesis of applied information technologies for processing signals with localized information created using the developed instrumental system are given.

**Keywords:** *information technology, complex shape signals, instrumental system.*