

С. Б. Румовская, С. В. Листопад  
А. Е. Колодин, В. И. Данишевский

«ВИРТУАЛЬНЫЙ КОНСИЛИУМ».  
ЧАСТЬ 2: СИНТЕЗ МЕТОДА РЕШЕНИЯ  
НЕОДНОРОДНОЙ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ

62

Усложняющиеся задачи диагностики неизбежно приводят к ошибкам при принятии решений и увеличению сложности и трудоемкости средств автоматизированного решения в неоднородных проблемных средах. Причем процессы выявления и понимания неоднородной задачи диагностики и синтеза метода ее решения не формализованы, исследованы недостаточно. В работе представлены результаты разработки алгоритма синтеза метода решения неоднородной задачи диагностики, который в рамках концепции гибридных интеллектуальных систем строит интегрированную модель, релевантную диагностической ситуации, над гетерогенным модельным полем – множеством разнородных моделей, отображающих теоретические, профессиональные знания и опыт экспертов консилиума.

*Complicating diagnostic tasks inevitably lead to the mistakes during decision-making and to the increasing complexity and workload of the features for automated decision in heterogeneous problem environment. Researches in this field are focused on formalization and exploration of the processes of finding, identifying of the heterogeneous diagnostic task and the synthesis of the method for its solving. This paper presents the results of the development of the algorithm for the synthesis of the method for solving of the heterogeneous diagnostic task, which establishes the integrated model under the approach of hybrid intelligent systems. Such model is relevant to diagnostic situation and combines the set of heterogeneous models of the theoretical, professional knowledge and the experience.*

**Ключевые слова:** сложная неоднородная задача диагностики, виртуальный консилиум, синтез метода решения неоднородной задачи диагностики, интегрированная модель медицинского консилиума.

**Keywords:** complex heterogeneous diagnostic task, virtual council, the synthesis of the method for solving of the heterogeneous diagnostic task, integrated model of the virtual council.

### Введение

Исследование и моделирование коллективного решения сложных неоднородных задач, в частности диагностических, в условиях растущего объема входной информации, ее разнородности, неполноты, неточности и неопределенности остаются одним из важнейших научных направлений.



В работе [1] были рассмотрены концептуальная модель и особенности неоднородных задач в медицине и предложен подход к их решению в рамках технологии гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) [2], основополагающая составляющая которых – гетерогенное модельное поле (ГМП). Результаты разработки ГМП также представлены в [1] и описаны в терминах аксиоматической теории ролевых концептуальных моделей [2].

В данной работе представлены результаты разработки алгоритма, позволяющего ГиИС динамически формировать интегрированную модель для решения возникающей неоднородной задачи диагностики (НЗД), в частности артериальной гипертензии (АГ), в зависимости от новой диагностической ситуации.

### Гетерогенное модельное поле виртуального консилиума и модели вычислений его элементов

ГМП – основополагающая составляющая гибридных интеллектуальных систем [2]. Оно содержит модели, релевантные подзадачам из декомпозиции  $P^h$  НЗД, и моделирует многообразие и относительность профессиональных экспертных знаний, имеющихся в распоряжении лица, принимающего решение (ЛПР), для организации консилиума. Из такого разнообразия ЛПР делает выбор о включении экспертов в состав консилиума и обеспечивает дополненность и сотрудничество знаний в ходе коллективных рассуждений над задачей диагностики.

Декомпозиция неоднородной задачи диагностики артериальной гипертензии (НЗДАГ)  $P^h$

$$\{p_{РЭКГ}^h, p_{СМАД}^h, p_{ППС_1}^h, \dots, p_{ППС_9}^h, p_{ДАГ_1}^h, \dots, p_{ДАГ_9}^h, p_{ССС}^h\}$$

содержит множество функциональных и технологических диагностических подзадач. Здесь  $p_{РЭКГ}^h$  – диагностическая подзадача «Распознавание и интерпретация электрокардиограммы»;  $p_{СМАД}^h$  – диагностическая подзадача «Анализ суточного мониторингирования артериального давления»;  $p_{ППС_{1-9}}^h$  – подмножество из девяти технологических подзадач «Построение информативного набора признаков при диагностике заболеваний из областей 1–9»;  $p_{ДАГ_{1-9}}^h$  – подмножество из девяти функциональных подзадач «Диагностика критериев оценки сердечно-сосудистого риска и вторичной АГ у пациента»;  $p_{ССС}^h$  – диагностическая подзадача «Оценка степени и стадии АГ, степени риска сердечно-сосудистых заболеваний».

В [1] установлено соответствие множества подзадач из декомпозиции неоднородной задачи диагностики АГ множеству моделей ГМП. Для моделей из ГМП были определены [1] следующие настроечные параметры.

1. Для моделей нечетких систем (НС)  $МНСДАГ_{1-9}$  и  $МНСССС$  для «Диагностики критериев оценки сердечно-сосудистого риска и вторичной АГ у пациента» и «Оценки степени и стадии артериальной гипер-



тензии, степени риска сердечно-сосудистых заболеваний» соответственно — алгоритм рассуждений Такаги — Сугено, пространства входов и выходов, функции принадлежности и размеры баз знаний.

2. Для модульных моделей искусственных нейронных сетей (ИНС) МИНСРЭКГ и МИНССМАД для «Распознавания и интерпретации электрокардиограммы» и «Анализа СМАД» соответственно — архитектура модулей, алгоритм обучения обратного распространения ошибки, логистическая функция активации, число нейронов входного, скрытого и выходного слоев.

3. Для двух альтернативных моделей продукционных экспертных систем (ЭС) МЭССС и МЭСМАД для «Оценки степени и стадии АГ, степени риска сердечно-сосудистых заболеваний» и «Анализа СМАД» соответственно — базы знаний и базы фактов, механизмы рассуждения и разрешения конфликтов.

4. Для моделей классических генетических алгоритмов (ГА) МГАППС<sub>1–9</sub> технологических подзадач «Построение информативного набора признаков при диагностике заболеваний 1–9» — размеры популяций и индивидуумов, метод селекции, число итераций и функции приспособленности.

Таким образом, гетерогенное модельное поле состоит из 23 моделей для 21 подзадачи из декомпозиции НЗДАГ. При решении 10 подзадач определения состояния здоровья пациента нечеткими системами знания кардиолога применяются наряду со знаниями других врачей (терапевта, сосудистого хирурга, эндокринолога, невролога и нефролога). Распределение знаний экспертов по моделям представлено на рисунке 1.

Ниже приведены модели вычислений функциональных и технологических элементов гетерогенного модельного поля.

1. Модель искусственных нейронных сетей:

$$\overline{mod}_n = \langle pr^{arch}, X, Y, res^{ed\ test}, I^n \rangle,$$

где  $pr^{arch}$  — архитектура ИНС;  $X, Y$  — множества его входов и выходов;  $N$  — множество моделей нейронов ИНС;  $res^{ed\ test}$  — обучающая и тестирующая последовательности;  $I^n = \{I^{n1}, I^{n2}\}$  — интерпретаторы обучения и нейровычислений соответственно, работающие по схеме  $I^{n1} \rightarrow I^{n2}$ .

2. Модель продукционных экспертных систем:

$$\overline{mod}_e = \langle KB, FB, RB, I^e \rangle,$$

где  $KB$  — база знаний как совокупность символьных правил-продукций;  $FB$  — база фактов как совокупность связанных или не связанных друг с другом символьных выражений, задающих декларативную, фактографическую информацию, необходимую и достаточную для решения задачи;  $RB$  — база выводов, формируемая интерпретатором  $I^e$  в ходе работы, содержащая информацию о причинах изменений в  $RB$  и комментарии, внесенные экспертом в  $KB$  для объяснений, причем  $RB \subseteq KB$ ;  $I^e = \{I^{e1}, I^{e2}, I^{e3}, I^{e4}\}$  — стратегия управления (или интерпретатор), включающая интерпретаторы выбора из  $KB$  подмножества  $KB^a \subseteq KB$  ак-



тивных правил, сопоставления с образцом для правил из  $KB^a$ , разрешения конфликтов правил, выполнения правила, работающие соответственно по схеме

$$\overbrace{I^{e1} \rightarrow I^{e2} \rightarrow I^{e3} \rightarrow I^{e4}}.$$

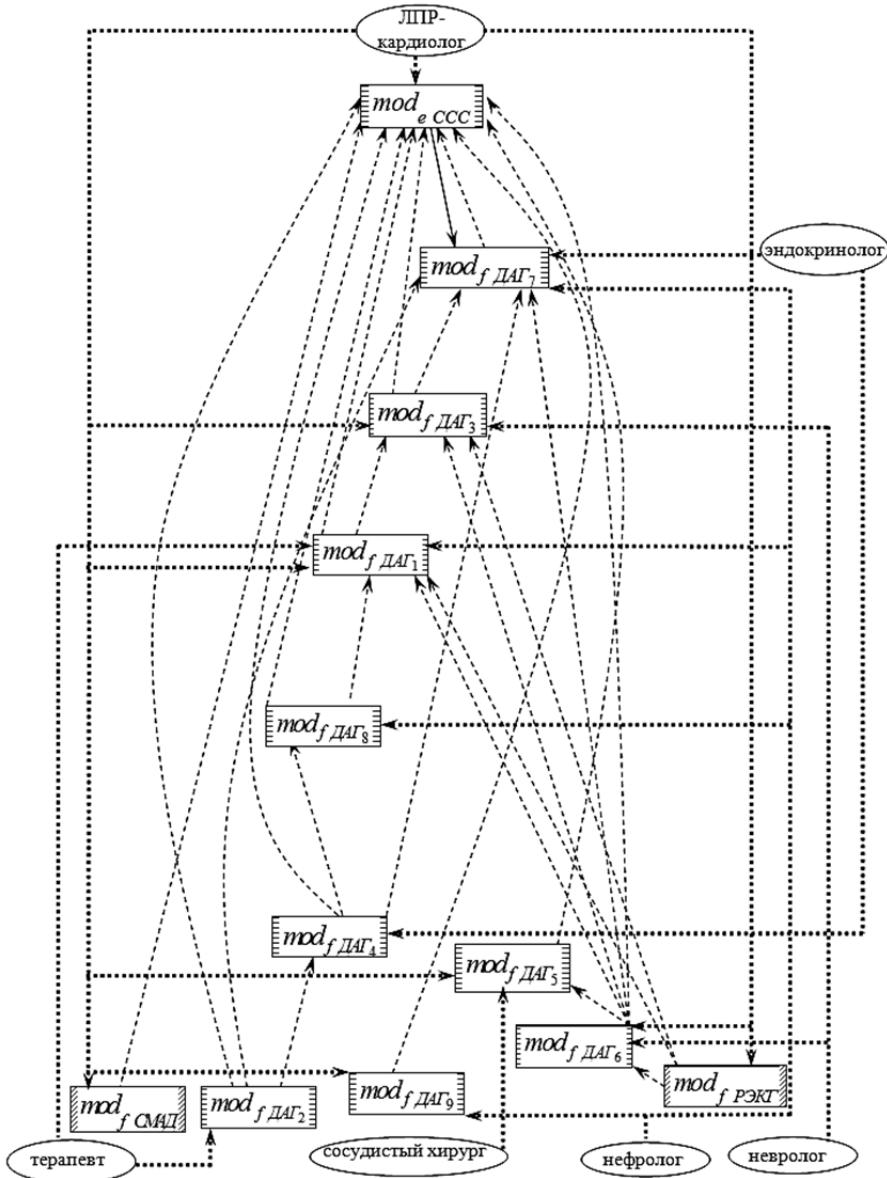


Рис. 1. Взаимодействие модели ЛПР (кардиолога) и моделей, содержащих знания экспертов в консилиуме, с распределением знаний по моделям

Обозначения:  $\cdots \rightarrow$  – соответствие «знания эксперта-модель»;  $-\cdots \rightarrow$  – отношения «эксперт – эксперт» и «эксперт – ЛПР».



## 3. Модель нечетких систем Такаги – Сугено:

$$\overline{mod}_f = \langle \mathbf{X}, \mathbf{Y}, KB, F^\mu, F^{TS}, MET^{Def}, I^e \rangle,$$

где  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$  – пространства входных лингвистических переменных и выходных детерминированных переменных диагностической подзадачи;  $F^\mu$  – множество функций принадлежности пространства входов;  $F^{TS}$  – множество функциональных зависимостей в качестве посылок и заключений в системе Такаги – Сугено;  $MET^{Def}$  – метод дефазификации;  $I^f = \{I^{f1}, I^{f2}, I^{f3}, I^{f4}\}$  – интерпретаторы фазификации, агрегирования (правило типа «минимум»), активизации (берутся все четкие значения всех выходных переменных) и дефазификации (выполняется усреднение) работающие соответственно по схеме

$$I^{f1} \rightarrow I^{f2} \rightarrow I^{f3} \rightarrow I^{f4}.$$

## 4. Модель генетических алгоритмов:

$$\overline{mod}_g = \langle \{I_1, \dots, I_{N_{KB}}\}, N, f_j, I^g \rangle,$$

где  $\{I_1, \dots, I_{N_{KB}}\}$  – популяция индивидуумов;  $N$  – число итераций;  $f_j$  – функция приспособленности, причем  $f_j: \{I_1, \dots, I_{N_{KB}}\} \rightarrow [0; 1]$ ; интерпретатор  $I^g = \{I^{g1}, I^{g2}, I^{g3}, I^{g4}, I^{g5}, I^{g6}, I^{g7}\}$  включает интерпретаторы инициализации популяции, кодирования, оценки и турнирной селекции индивидуумов, формирования родительской популяции, рекомбинации бинарных кодов, проверки условия окончания работы ГА и отображения наилучшего за  $N$  итераций индивидуума-решения, работающие соответственно по схеме

$$I^{g1} \rightarrow \sqrt{I^{g2} \rightarrow I^{g3} \rightarrow I^{g4} \rightarrow I^{g5} \rightarrow I^{g6} \rightarrow I^{g7}}.$$

### Синтез метода решения неоднородной задачи диагностики над гетерогенным модельным полем

Алгоритм синтеза метода решения неоднородной задачи диагностики (рис. 2) инициализирует функциональную структуру гибридной интеллектуальной системы для решения НЗД.

Ниже представлена входная информация алгоритма (рис. 1) на примере задачи диагностики артериальной гипертензии.

1. Декомпозиция  $\overline{p}_D = (P^h, R_3)$  в виде сети – это ориентированный граф без петель и таблица гибридных стратегий (ТГС, см. табл.), которые задают взаимно однозначные соответствия  $\{R_3(p_i^h, p_j^h) \leftrightarrow R_{int}^k\}$ , где  $i, j$  – порядковые номера подзадач из декомпозиции неоднородной задачи диагностики;  ${}^{qv}R_{int}^k$  – отношение интеграции элементов, решающих подзадачи  $\varphi$  и  $\psi$ , знания которых участвуют в интеграции типа  $k$  (*dop* – дополнения; *upr* – управления, препроцессии).

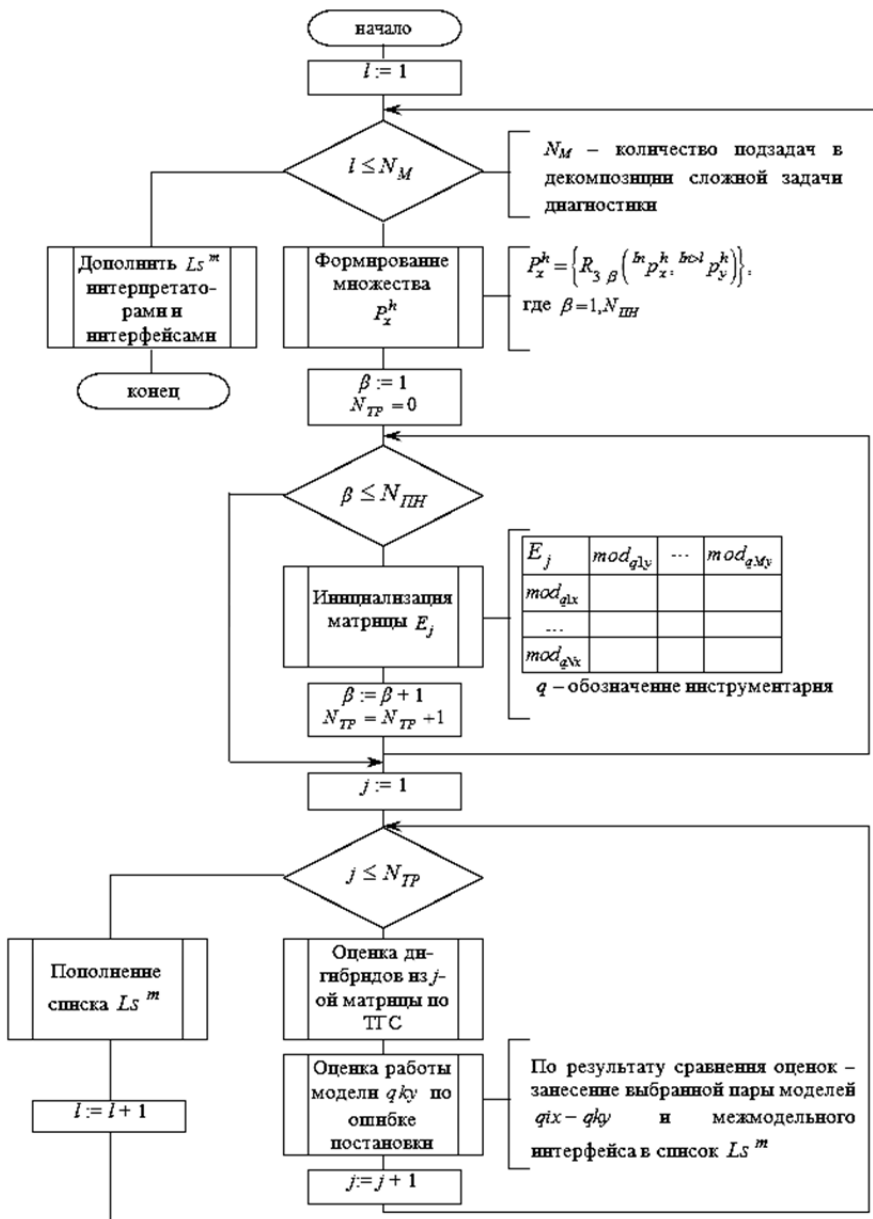


Рис. 2. Алгоритм синтеза метода решения неоднородной задачи диагностики

2. Множество отношений  $R^4$  целей  $G^h$  и исходных данных  $D^h$  однородных задач из декомпозиции  $P^h$ , а также целей  $G$  и исходных данных  $D$  неоднородной задачи  $p_D$ .



3. Множества интерпретаторов  $I^{MOD}$  моделей гетерогенного модельного поля  $\{I^e, I^g, I^f, I^n\}$ , межмодельных интерфейсов

$$\{СМАД\ CCC\ \zeta, ДАГ_{1-9}\ CCC\ \zeta, ППС_{1-9}\ ДАГ_{1-9}\ \zeta, РЭКГ\ ДАГ_1\ \zeta\}$$

и гетерогенное модельное поле

$$MOD = \{mod_{n\ РЭКГ}, mod_{n\ СМАД}, mod_{e\ СМАД}, mod_{g\ ППС_1}, \dots, mod_{g\ ППС_9}, mod_{f\ ДАГ_1}, \dots, mod_{f\ ДАГ_9}, mod_{e\ CCC}, mod_{f\ CCC}\}.$$

68

4. Принадлежность подзадач из декомпозиции  $P^h$  неоднородной задачи диагностики некоторым подмножествам, определяющим последовательность решения подзадач, задается посредством индекса  $In$ : ( ${}^{In}P^h$ ).

На рисунке 2 введены обозначения  $E^l = \{E_j^l\}$ , где  $j = \overline{1, N_{TP}}$  – множество матриц «модель – модель», строки которых соответствуют моделям диагностической подзадачи  $p_x^h$ , а столбцы – моделям подзадачи  $p_y^h$ ;  $N_M$  – количество подзадач в декомпозиции неоднородной диагностической задачи.

Данный алгоритм моделирует принятие решений медицинским консилиумом, коллективом экспертов-врачей узкой специализации, знающих детали решения задачи лучше ЛПП (например, врач-кардиолог) и помогающих ЛПП в выработке окончательного решения, диагноза.

На выходе алгоритма синтеза метода решения неоднородной задачи диагностики формируется множество  $Ls^m$ :

$$\left\{ \left( mod_{qx\ x}, mod_{qy\ y}, {}^x\ y\ \zeta \right) qx, qy \in \{n, e, f, g\} \right\}.$$

Это множество, формализующее функциональную структуру ГиИС. Здесь  $n, e, f, g$  указывают на то, что модель разработана по методологии искусственных нейронных сетей, экспертных систем, нечетких систем или генетических алгоритмов соответственно.

Таблица гибридных стратегий задачи НЗДАГ,  $T^u$

Подзадачи НЗДАГ		$P_{ДАГ_{1-9}}^h$	$P_{CCC}^h$	
$P^h$ НЗДАГ	Модели подзадач	$mod_{f\ ДАГ_{1-9}}$	$mod_{e\ CCC}$	$mod_{f\ CCC}$
$P_{ППС_{1-9}}^h$	$mod_{g\ ППС_{1-9}}$	$R_{int}^{upr}$ (ППС <sub>1-9</sub> , ДАГ <sub>1-9</sub> ) (7)	–	–
$P_{СМАД}^h$	$mod_{n\ СМАД}$	–	$r_{int}^{dop}$ (СМАД, CCC) (3)	$r_{int}^{dop}$ (СМАД, CCC) (4)
	$mod_{e\ СМАД}$	–	–	$r_{int}^{dop}$ (СМАД, CCC) (6)



Окончание табл.

Подзадачи НЗДАГ		$p_{ДАГ_{1-9}}^h$	$p_{ССС}^h$	
$p_{ДАГ_{1-9}}^h$	$mod_{f_{ДАГ_{1-9}}}$	—	$R_{int}^{dop}(ДАГ_{1-9}, СССР) (6)$	—
$p_{РЭКГ}^h$	$mod_{n_{РЭКГ}}$	$r_{int}^{dop}(РЭКГ, ДАГ_1) (4)$	—	—

Обозначения: (3), (4), (6), (7) — экспертные оценки потенциальных возможностей ди-гибридов по шкале от 1 — «бесполезен» до 10 — «наиболее полезен» (табл. 8.6 в [2] о гибридных возможностях классов базисных методов).

Также определены интерфейсы для обмена информацией  $x^y \zeta$ , где  $x, y$  — подзадачи из декомпозиции неоднородной диагностической задачи  $p_D$ .

В  $Ls^m$  однородные задачи заменяются на модели, в том числе выбранные в соответствии с областями релевантности.

Результатом работы алгоритма синтеза метода решения применительно к неоднородной задаче диагностики артериальной гипертензии является формальное описание ГиИС «Виртуальный консилиум для диагностики артериальной гипертензии»  $Ls^m$ :

$$\begin{aligned} & \left\{ \left( mod_{n_{СМАД}}, mod_{e_{ССС}},^{СМАД} CCC \zeta \right), \left\{ \left( mod_{g_{ППС_i}}, mod_{f_{ДАГ_i}},^{ППС_i} ДАГ_i \zeta \right) \right\}, \\ & \left\{ \left( mod_{f_{ДАГ_j}}, mod_{e_{ССС}},^{ДАГ_j} CCC \zeta \right) \right\}, \left( mod_{n_{РЭКГ}}, mod_{f_{ДАГ_1}},^{РЭКГ} ДАГ_1 \zeta \right), \\ & \left( mod_{n_{РЭКГ}}, mod_{f_{ДАГ_6}},^{РЭКГ} ДАГ_6 \zeta \right), \left( mod_{n_{РЭКГ}}, mod_{f_{ДАГ_3}},^{РЭКГ} ДАГ_3 \zeta \right), \\ & \left( mod_{f_{ДАГ_2}}, mod_{f_{ДАГ_4}},^{ДАГ_2} ДАГ_4 \zeta \right), \left( mod_{f_{ДАГ_2}}, mod_{f_{ДАГ_7}},^{ДАГ_2} ДАГ_7 \zeta \right), \\ & \left( mod_{f_{ДАГ_6}}, mod_{f_{ДАГ_1}},^{ДАГ_6} ДАГ_1 \zeta \right), \left( mod_{f_{ДАГ_6}}, mod_{f_{ДАГ_3}},^{ДАГ_6} ДАГ_3 \zeta \right), \\ & \left( mod_{f_{ДАГ_6}}, mod_{f_{ДАГ_5}},^{ДАГ_6} ДАГ_5 \zeta \right), \left( mod_{f_{ДАГ_6}}, mod_{f_{ДАГ_7}},^{ДАГ_6} ДАГ_7 \zeta \right), \\ & \left( mod_{f_{ДАГ_4}}, mod_{f_{ДАГ_3}},^{ДАГ_4} ДАГ_3 \zeta \right), \left( mod_{f_{ДАГ_1}}, mod_{f_{ДАГ_3}},^{ДАГ_1} ДАГ_3 \zeta \right), \\ & \left( mod_{f_{ДАГ_3}}, mod_{f_{ДАГ_7}},^{ДАГ_3} ДАГ_7 \zeta \right) \}. \end{aligned}$$

Таким образом, определен алгоритм синтеза метода решения неоднородной задачи диагностики, его вход и выход, которые будут положены в основу синтеза функциональной структуры ГиИС на ЭВМ.

На рисунке 1 показано взаимодействие всех 12 функциональных моделей гетерогенного модельного поля подзадач из декомпозиции НЗДАГ, а также отношения «эксперт — эксперт» и «эксперт — ЛПР» между моделями, по которым передаются промежуточные оценки вплоть до формирования ЛПР заключительного диагноза.





Помимо того, на рисунке 1 показаны реальные участники консилиума, знания которых применены в моделях, и отображено распределение знаний экспертов-врачей по соответствующим моделям. Знания кардиолога использовались как для формирования заключительного диагноза, так и для решения частных подзадач. Нечеткие модели подзадач  $ДАГ_1$ ,  $ДАГ_3$ ,  $ДАГ_5$ ,  $ДАГ_6$ ,  $ДАГ_7$ ,  $ДАГ_9$  соединяют знания нескольких экспертов аддитивно.

Одинаковой штриховкой на рисунке 1 отмечены блоки – модели диагностических подзадач, решаемых посредством одной и той же методологии (нечетких систем –  $ДАГ_{1-9}$  и ССС или искусственных нейронных сетей – РЭКГ и СМАД).

70

### Заключение

В работе сделан шаг в сторону формализации и исследования процесса синтеза метода решения сложных задач: определены алгоритм выбора стратегии решения неоднородной задачи диагностики, его вход и выход.

Результат работы алгоритма – описание функциональной структуры ГиИС автоматизированной диагностики (на примере артериальной гипертензии) для дальнейшего построения ее модели в определенном декомпозицией порядке.

Были специфицированы относительность знаний и отношения дополнительности на множестве функциональных моделей гетерогенного модельного поля в соответствии с полученным описанием функциональной структуры ГиИС виртуального консилиума и отношениями декомпозиции неоднородной задачи диагностики артериальной гипертензии.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-07-00272 А.*

### Список литературы

1. Румовская С.Б., Кириков И.А., Колодин А.Е., Данишевский В.И. «Виртуальный консилиум». Ч. 1: Модели гетерогенного модельного поля // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2017. №4. С. 67–79.
2. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. СПб., 2001.

### Об авторах

София Борисовна Румовская – канд. техн. наук, науч. сотр., Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» (ФИЦ ИУ РАН); ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Сергей Викторович Листопад – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» (ФИЦ ИУ РАН), Россия.

E-mail: ser-list-post@ya.ru



Александр Евгеньевич Колодин — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: Alex\_kolodin@mail.ru

Владислав Игоревич Данишевский — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: danishevskii.v.i@mail.ru

#### The authors

Dr Sophiya B. Rumovskaya, Research Fellow, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences; Assistant, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Dr Sergei V. Listopad, Senior Research Fellow, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: ser-list-post@ya.ru

Aleksandr E. Kolodin, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: Alex\_kolodin@mail.ru

Vladislav I. Danishevskii, PhD Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: danishevskii.v.i@mail.ru