

С. В. Жернаков, М. А. Шулакова

## СИСТЕМА МЕДИЦИНСКОГО МОНИТОРИНГА И КОРРЕКЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

В статье рассматриваются вопросы разработки интеллектуальной системы медицинского мониторинга и коррекции функционального состояния организма человека с применением технологий «умного дома». *Мониторинг; диагностика; среда помещения; автоматизированная система управления; управляющее воздействие; экспертные системы; генетические алгоритмы*

### ВВЕДЕНИЕ

«Умный дом» (англ. *Smart House*) – жилой дом современного типа, организованный для удобства проживания людей при помощи высокотехнологичных устройств.

В рамках умного дома в единую систему управления интегрируется ряд систем [1]:

- система отопления, вентиляции и кондиционирования,
- охранно-пожарная сигнализация, система контроля доступа в помещения, контроль протечек воды, утечек газа,
- система видеонаблюдения,
- сети связи (в том числе телефон и локальная сеть здания),
- система освещения,
- система электропитания здания,
- управление с одного места аудио-, видеотехникой, домашним кинотеатром, мультимедиа,
- телеметрия – удаленное слежение за системами.

Все эти системы направлены на обеспечение безопасного и комфортного пребывания в жилом доме. Однако они не затрагивают такой важной области, как здоровье человека. Между тем современные технологии позволяют создать в рамках «умного дома» систему медицинского мониторинга и коррекции функционального состояния организма человека.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Мониторные системы физиологических параметров просты в использовании, их датчики обладают малыми габаритами и не ограничивают движений, таким образом, позволяют производить необходимое количество измерений

в определенный период времени, не причиняя неудобства пациенту. Результаты измерений таких систем недостаточно точны и представляются в виде интегральных показателей, которые не всегда дают представление об истинных параметрах организма.

Основными достоинствами мобильных диагностических систем, таких как мобильный радиотелефон, описанный в [2], является то, что они не требуют специфических условий для измерений, то есть определить параметры организма можно в любой момент времени, где бы ни находился человек. Другим преимуществом является оперативная передача результатов измерений мобильными средствами связи медперсоналу. К недостаткам же можно отнести низкую достоверность измерительной информации и, как следствие, некорректность последующих решений.

Стационарные комплексы неинвазивной диагностики позволяют получать точные результаты и производить компьютеризированную обработку и хранение данных, но требуют специальных условий для проведения измерения.

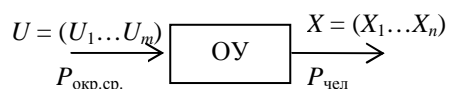
Также получили широкое распространение терапевтические аппараты и системы, позволяющие производить физиотерапевтические процедуры на дому [3].

Общим недостатком перечисленных примеров является то, что они работают вне связи с окружающей человека средой.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Темп современной жизни зачастую не оставляет времени на прохождение диагностики и лечение в медицинских учреждениях. Поэтому наиболее актуальны разработки в области создания систем управления, позволяющих производить измерения функциональных параметров и коррекции состояния организма человека в домашних условиях.

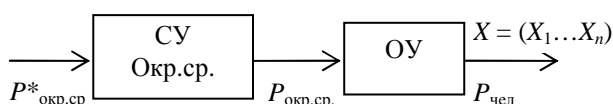
В такой системе объектом управления является организм человека (рис. 1).



**Рис. 1.** Организм человека как объект управления:  $U$  – вектор параметров окружающей среды: температуры, газового состава, скорости потоков и влажности воздуха, уровня шумов –  $P_{\text{окр.ср.}}$ ;  $X$  – вектор функциональных параметров человека: артериальное давление, частота сердечных сокращений, степень оксигенации крови, температура тела –  $P_{\text{чел.}}$ .

Развитие подобных систем можно проследить эволюционно.

Первым этапом являются широко известные системы климат-контроля.

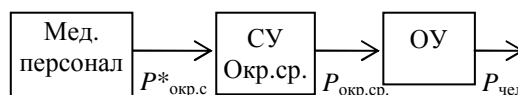


**Рис. 2.** Схема системы климат-контроля

На рис. 2 представлена схема системы климат-контроля, где СУ  $O_{\text{кр.ср.}}$  – система управления окружающей средой;  $P^*_{\text{окр.ср.}}$  – требуемые параметры окружающей среды. Система управления окружающей средой представляет собой блок, который на основе информации, полученной с датчиков параметров окружающей среды, производит сравнение задаваемых параметров  $P^*_{\text{окр.ср.}}$  и реальных параметров среды  $P_{\text{окр.ср.}}$  и производит коррекцию до требуемого уровня.  $P^*_{\text{окр.ср.}}$  могут быть заданы программно или самим человеком.

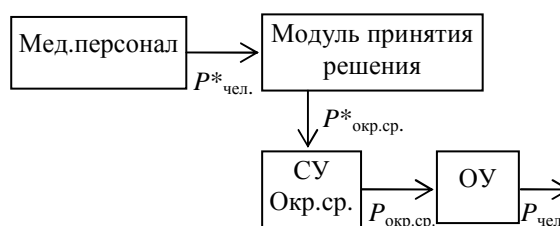
Следующим этапом на эволюционной лестнице можно представить системы управления (рис. 3), где  $P^*_{\text{окр.ср.}}$  задаются специалистом – уполномоченным медперсоналом – с целью терапевтического воздействия на человека. Такие системы применяются для подготовки спортсменов, реабилитации больных и в космической медицине.

Поскольку объектом управления является человек – сложная самоорганизующаяся система, то целесообразно построить модуль принятия решения с использованием систем искусственного интеллекта.



**Рис. 3.** Схема системы управления окружающей средой с терапевтическим эффектом

Например, с использованием экспертных систем (рис. 4). Модуль принятия решения работает на основе модели «Человек – окружающая среда». Очевидно, что построить такую математическую модель не представляется возможным, но можно представить эту взаимосвязь в виде базы знаний экспертной системы.



**Рис. 4.** Схема системы управления состоянием организма человека с модулем принятия решений

Для получения возможности отслеживать изменение функционального состояния организма человека необходимо ввести биологическую обратную связь (БОС), как на рис. 5.

Развитие информационных технологий, таких как «умный дом», сделало возможным взаимосогласованное программное управление системами жизнеобеспечения здания (освещение, отопление, системы безопасности и т. д.), систем связи и мультимедийных систем. Особенностью «интеллектуальных зданий» является возможность расширения выполняемых функций [4]. Полагаем, что создались предпосылки для регулирования параметров среды в помещении в интересах коррекции состояния организма человека.

Очевидно, что в жилом помещении может находиться не один человек, а несколько. Каждый из них обладает индивидуальными физиологическими параметрами и особенностями восприятия внешней среды. Следовательно, существует проблема создания комфортного существования нескольких человек. Поставленную задачу можно решить, используя методы мультипараметрической оптимизации.

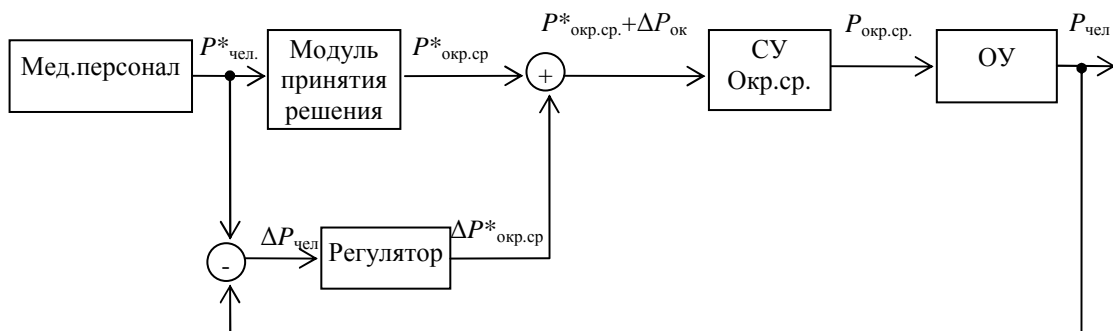


Рис. 5. Интеллектуальная система управления состоянием организма человека с биологической обратной связью

Таким образом, существует необходимость создания автоматизированной адаптивной системы управления состоянием организма и оптимизации параметров среды в жилом помещении, имеющей возможность интегрироваться в структуру «умный дом» для взаимодействия с инженерными системами здания, системами безопасности и использования гетерогенной информационной среды для передачи получаемых данных в режиме реального времени.

Основными функциями автоматизированной системы управления являются:

- Обработка информации, характеризующей состояние организма человека по ряду параметров, например, артериальное давление, частота сердечных сокращений, степень оксигенации крови, температура тела и др., состояние среды в помещении на основании оценки температуры, газового состава, скорости потоков и влажности воздуха, уровня шумов и др., состояние внешней среды, характеризующейся атмосферным давлением, геомагнитной обстановкой, температурой воздуха.

- Принятие решений и управление – автоматизированная информационная поддержка в области диагностирования состояния человека и принятия превентивных мер на основе экспертной системы, выработка управляющих воздействий на трех уровнях: воздействие со стороны среды, немедикаментозное и медикаментозное воздействие.

#### Проблемы принятия решений по управлению состоянием организма человека

Целью исследований является разработка автоматизированной системы управления состоянием организма человека, позволяющей повысить эффективность процесса коррекции функционального состояния организма человека путем непрерывного мониторинга.

Особенность системы выдвигает ряд требований:

1. В части сбора и передачи информации:
  - мониторинг состояния человека должен производиться непрерывно в режиме реального времени;
  - измерительный преобразователь должен иметь малые габариты и вес и обеспечивать высокую достоверность измерений;
  - передача данных должна осуществляться по беспроводным линиям связи;
  - данные при передаче должны быть защищены от воздействия электромагнитных помех;
  - вся информационная сеть должна иметь высокий уровень безопасности;
  - для осуществления совместимости со смежными системами должны использоваться открытые протоколы передачи данных.
2. В части обработки и хранения информации:
  - оценка состояния организма должна производиться на основе самообучающейся экспертной системы;
  - данные о состоянии организма, о параметрах среды помещения, об изменениях внешних условий образуют базу данных экспертной системы. База знаний должна формироваться с участием уполномоченного медперсонала;
  - должны приниматься меры по снижению ложного определения состояния на основании оценки психоэмоционального фона.
3. В части принятия решений и осуществления управления:
  - управление должно осуществляться по замкнутому типу на основе сигналов биологической обратной связи;
  - прогнозирование изменения состояния человека и выработка превентивных мер долж-

ны производиться обучающейся экспертной системой на базе прогноза variability условий внешней среды, базы знаний медицинской информации и результатов измерений параметров организма человека в режиме реального времени;

- диагностирование состояния и выработка управляющего воздействия должны производиться в режиме следящего управления;
- должна быть реализована возможность достижения оптимального состояния одновременно для нескольких человек, нахождение которых регламентировано для данного помещения.

### Объект управления

Объектом управления является организм человека. Ввиду сложности и динамичности объекта при построении системы управления применяется моделирование.

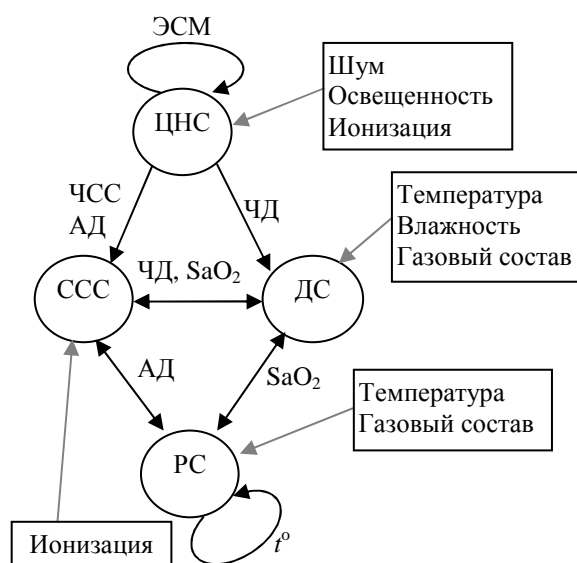


Рис. 6. Модель воздействия внешней среды на основные системы организма

С точки зрения структурно-функционального подхода организм человека можно представить в виде графа (рис. 6). Состояние организма можно оценивать по показателям основных систем организма: сердечно-сосудистой (ССС) через частоту сердечных сокращений (ЧСС) и артериальное давление (АД); нервной (ЦНС) через электрические сигналы, регистрируемые на электроэнцефалограмме или реоэнцефалограмме (ЭСМ); дыхательной системы (ДС) через частоту дыхания (ЧД) и степень насыщения крови кислородом (SaO<sub>2</sub>); регулятор-

ной системы (РС), отвечающей за биохимические процессы в организме, через температуру тела (t°).

На рис. 6 обозначены факторы внешней среды, оказывающие прямое (доминирующее) воздействие на ту или иную подсистему организма.

Очевидно, что в силу сложности взаимодействия систем организма, опосредованности влияния других факторов внешней среды (недоминирующее воздействие) построение относительно адекватной информационной модели организма возможно с использованием эмпирических и эвристических методов на основе достаточной оперативной информации.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью управления является повышение эффективности процесса коррекции функционального состояния организма человека.

Для решения поставленных задач используются три уровня автоматизированного управления:

- проектный уровень предполагает задание характеристик организма человека, позволяющих производить оценку общего состояния, предустановку параметров среды помещения;
- уровень программного управления реализует поддержание нормальных параметров среды помещения по известному закону;
- уровень следящего управления обеспечивает поддержание оптимального состояния организма человека в условиях неопределенности.

Поскольку первые два уровня управления достаточно очевидны [5], остановимся более подробно на следящем управлении. На данном этапе можно выделить два основных направления принятия решения: обработка медицинской информации и оптимизация управляющего воздействия.

Сложность систем обработки медицинской информации определяется сложностью объектов, с которыми они имеют дело. Проблемы, относящиеся к таким системам, связаны не только с неточностью и неопределенностью знаний, но и с размерностью предметной области. Ограничение пространства поиска решений определением области диагностики не всегда возможно, особенно в случаях выявления одновременно двух заболеваний или определения возможных осложнений.

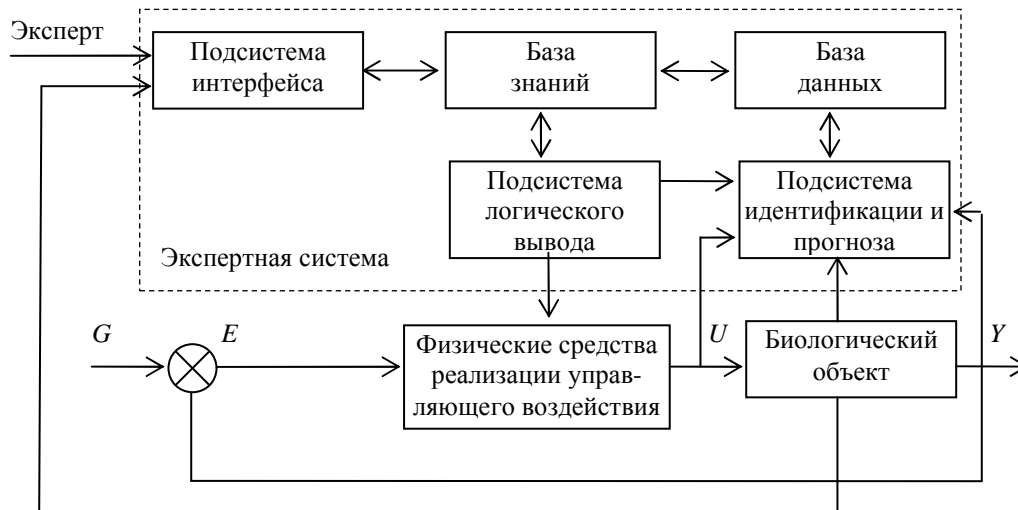


Рис. 7. Структурная схема системы управления на основе экспертной системы

Поэтому интеграция экспертных систем (ЭС) с информационными системами, системами управления базами данных (СУБД), системами поиска и оптимизации позволяет использовать их в качестве управляющей системы, которая осуществляет вызов нужного пакета в зависимости от вида решаемой задачи, и таким образом расширяет предметную область и функциональные возможности всей системы.

На рис. 7 представлен вариант реализации такой системы. В данной системе в роли эксперта выступает медицинский персонал, а в роли оператора – человек, находящийся в помещении.

Динамическая ЭС есть объединение экспертной системы и традиционного регулятора (контроллера). Экспертная система образует в данном случае верхний, супервизорный уровень управления и включает в себя следующие подсистемы.

Подсистема идентификации и прогноза обеспечивает идентификацию математической модели объекта управления непосредственно в процессе функционирования, по результатам наблюдений за его входными/выходными переменными.

База данных содержит непрерывно обновляемые данные (предыдущие, текущие, прогнозные) о характеристиках организма человека, среды помещения и внешней среды, а также информацию о граничных (критических, предельно допустимых) значениях соответствующих физиологических параметров. База знаний содержит знания о специфике жизнедеятельности конкретного человека, образе жизни, состоянии здоровья, целях, стратегии и алгоритмах управления, о результатах идентификации

и прогноза его состояния. Подсистема логического вывода осуществляет выбор рациональной (наиболее подходящей в данной ситуации) структуры и параметров регулятора среды помещения. Подсистема интерфейса предназначена для организации интерактивного режима по наполнению базы знаний с участием эксперта (режим обучения) и обеспечения общения с пользователем-оператором, включая объяснение механизма принятия тех или иных решений по управлению (режим эксплуатации).

Отличие приведенной на рис. 7 архитектуры экспертной системы от архитектуры обычных (статических) экспертных систем состоит в том, что она обеспечивает выполнение таких важных функций, как:

- построение динамической модели объекта и его среды;
- поддержание контакта с внешним миром (датчиками, СУБД, регулятором).
- Математический аппарат экспертной системы базируется на использовании логических моделей, правил вида «ЕСЛИ – ТО» [6].

Функции ЭС:

- определение состояния организма человека по интегральным показателям;
- прогнозирование изменения состояния организма человека в зависимости от изменений условий внешней среды;
- формирование базы знаний медицинской информации индивидуально для каждого человека в целях поддержки принятия решения в диагностике;
- формирование календарных отчетов состояния организма человека.

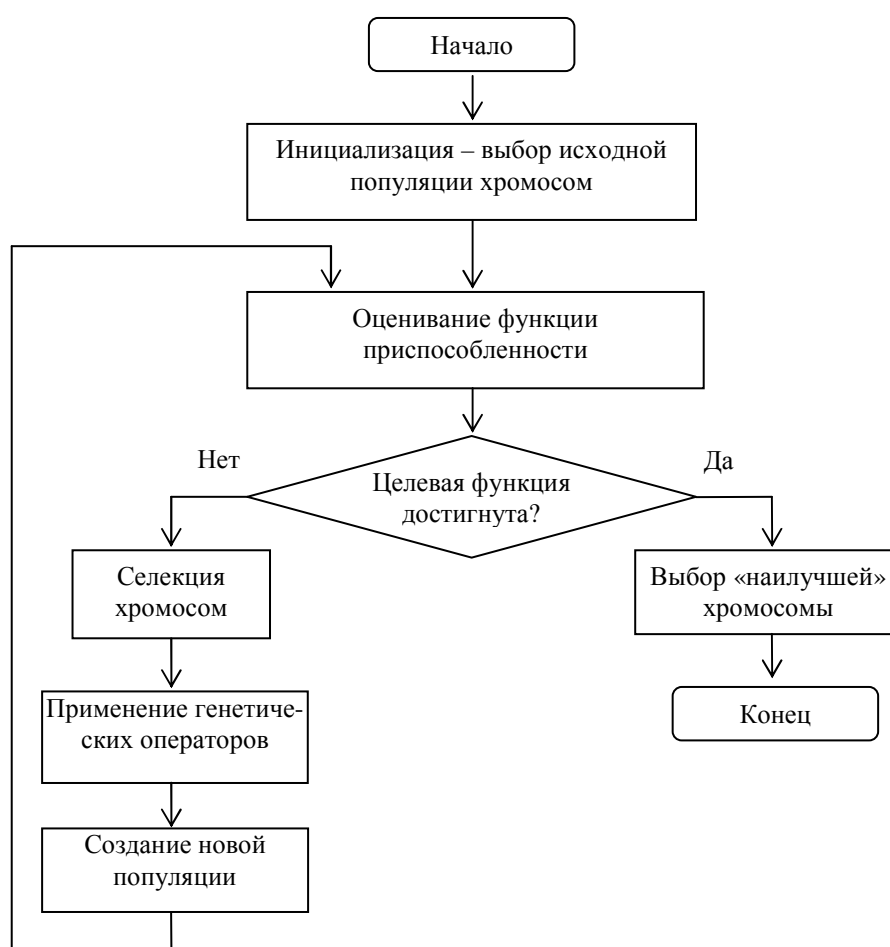


Рис. 8. Блок-схема генетического алгоритма оптимизации параметров среды помещения

В предлагаемой системе для достижения оптимального состояния организма человека управление реализуется на трех уровнях:

- воздействие среды помещения;
- специализированное немедикаментозное воздействие;
- медикаментозное воздействие.

Немедикаментозное воздействие, то есть средства физиотерапии, и медикаментозное лечение назначаются медперсоналом. Эти данные заносятся в базу знаний ЭС и при необходимости могут выдаваться в виде рекомендаций через подсистему интерфейса. При необходимом оснащении могут проводиться лечебные процедуры вне лечебного учреждения под контролем медперсонала посредством удаленного доступа.

При воздействии среды помещения должно учитываться состояние нескольких людей, которые могут находиться в данном помещении. В таком случае состояние каждого человека идентифицируется отдельно. Выработка алгоритмов воздействий и их осуществление проводится на основе многопараметрической оптимизации.

Оптимизация управляющего воздействия осуществляется в подсистеме логического вывода на основе метода генетических алгоритмов (рис. 8) [7].

Обозначим через  $X = \{X_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_x$  конечное множество состояний организма человека, через  $Y = \{y_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_y$  конечное множество управляющих воздействий на организм, через  $Z = \{Z_t\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, N_t$ ;  $Z = \{z_{tk}\}$ ;  $k = 1, 2, \dots, N_k$  – множество физиологических процессов на временном интервале  $\Delta_t$ ,  $k$  – номер процесса; через  $S = \{s_n\}$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_n$  – множество оценок состояний, которые строятся на основе информации, получаемой с помощью методов исследования. Предположим, что  $Z$  достаточно полно характеризует множество состояний организма  $X$ , то есть существует отображение  $f_1: Z \rightarrow X$ . Тогда задача синтеза оптимальной совокупности методов исследования состояния организма сводится к построению такого алгоритма получения и обработки данных о  $Z$ , соответствующего некоторому отображению  $f_2: Z \rightarrow S$ , который обеспечивает взаимную однозначность отображения  $f_3: X \rightarrow S$ . Это отображение позволяет решить и следующую задачу – выбор

управляющих воздействий  $Y$  при условии однозначности отображения  $f_4: S \rightarrow Y$ . Последнее отображение позволит определить оптимальный план лечебных воздействий, приводящий организм в заданное множество «нормальных» состояний.

Целевой функцией является нахождение интегрального показателя состояния людей в заданных пределах, принятых за нормальные.

Здесь хромосомы – это набор генов-параметров управляющих воздействий среды – температура, влажность воздуха, уровень ионизации, уровень освещенности и другие параметры в зависимости от особенностей среды и потребностей людей. Хромосомы разбиты на блоки по два гена. Таким образом, каждый параметр зашифрован парой 00. Увеличению параметра соответствует пара генов 01, а уменьшению – 10. Комбинации генов 11 и 00 обозначают неизменность параметра.

Входными данными для системы является информация о состоянии организма, представленная в виде интегрального показателя. Этот показатель принимается за функцию пригодности хромосомы.

$$F(s_1, s_2, \dots, s_i) \rightarrow \max,$$

где  $s_i$  – интегральный показатель состояния организма человека,  $i$  – количество человек.

Следует ввести некий граничный (минимальный) уровень  $s_i$ , при котором функция пригодности сбрасывается на 0 и реализуется другой алгоритм стабилизации состояния.

Существует начальное состояние среды в помещении, заданное по умолчанию. Этот набор параметров принимается за исходную популяцию хромосом.

Значения функций приспособленности хромосом выдаются экспертной системой на основе базы данных прецедентов, сопоставляющей состояние человека и характеристики среды помещения. При этом состояние человека представлено множеством оценок  $S = \{s_n\}$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ , а состояние среды помещения – множеством характеристик  $Y = \{y_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , представленным хромосомой в генетическом алгоритме.

#### 4. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работу системы многопараметрической оптимизации можно проиллюстрировать следующим примером.

Пациент А находится в помещении. Его состояние характеризуется следующими показателями: ЧСС – 89 уд./мин., АД – 150/90 мм рт.ст., ЧД – 25 дв./мин., сатурация – 95%, температура – 36,4 °С. Подсистема иден-

тификации присваивает этому состоянию ранг – 0,56. Система корректирует характеристики среды, используя поиск по базе данных прецедентов, до следующих показателей: температура – 23 °С, влажность – 60%, ионизация – 1500 ионов/см<sup>3</sup>, уровень шума – 20 дБ, уровень освещенности – 200 лк.

Из информационной модели, представленной на рис. 6, видно, что для нормализации деятельности сердечно-сосудистой системы наибольшее значение имеют именно эти характеристики среды.

В то же помещение входит пациент В. Его состояние характеризуется следующими показателями: ЧСС – 78 уд./мин., АД – 110/70 мм рт.ст., ЧД – 19 дв./мин., сатурация – 94%, температура – 37,0 °С. Подсистема идентификации присваивает этому состоянию ранг – 0,74. Система, используя поиск по базе данных прецедентов, устанавливает, что для увеличения интегрального показателя состояния пациента В характеристики окружающей среды должны быть следующими: температура – 25 °С, влажность – 70%, ионизация – 1000 ионов/см<sup>3</sup>, уровень шума – 25 дБ, уровень освещенности – 200 лк.

Теперь целевая функция – максимизация состояния обоих пациентов.

Пара «родительских» хромосом формируется методом «рулетки», на основании оценок функций пригодности. Получаем хромосомы 1011001010 и 0001010010. Затем к ним в соответствии с принципами работы генетических алгоритмов применяются операторы кроссинговера и мутации до достижения целевой функции [7].

В итоге, характеристики окружающей среды для оптимального состояния обоих пациентов должны быть следующие: температура – 24 °С, влажность – 50%, ионизация – 1200 ионов/см<sup>3</sup>, уровень шума – 22 дБ, уровень освещенности – 200 лк.

#### ВЫВОДЫ

Основные преимущества предлагаемой автоматизированной системы управления состоянием организма человека:

- оперативное выявление неблагоприятных психофизиологических состояний человека, вызванных внешними воздействиями (хроническими болезнями, стрессами, климатическими факторами и др.) с возможностью их частичной или полной компенсации;
- выявление негативных тенденций в состоянии здоровья индивидов на основе значи-

тельного количества статистических данных медперсоналом для выработки своевременных и адекватных мер;

- возможность дистанционного наблюдения медперсоналом, консультации и консилиумы со специалистами, обладающими самой высокой квалификацией;
- универсальность – возможность использования также в санаторно-курортных учреждениях и в некоторых производственных помещениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Наводачный М.** «Умность» дома и «интеллект» здания: конвергенция интересов людей и бизнеса // Мир компьютерной автоматизации. 2006. № 1. С. 30–34.
2. **Мелик-Сракисян А. Р.** Мобильный радиотелефон // Патент РФ № 2204887. 2006. Бюл. № 200607.
3. Системы комплексной электромагнитотерапии / А. М. Беркутов [и др]. М.: Лаборатория базовых Знаний БИНОМ, 2001. 376 с.

4. **Мальцев Н. В.** Дом, который стал разумным // Мир компьютерной автоматизации. 2003. № 2. С. 15–18.

5. **Иванов В. Н., Сергеев И. В.** Автоматизированная система климат-контроля успешной звонницы музея-заповедника «Московский Кремль» // Мир компьютерной автоматизации. 2004. № 6. С. 78–82.

6. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления с использованием генетических алгоритмов: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 1999. 105 с.

7. **Рутковская Д., Пилиньский М.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Жернаков Сергей Владимирович**, зав. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

**Шулакова Марина Алексеевна**, асс. той же каф. Дипл. инж. по инженерн. делу в медицине. (УГАТУ, 2005) Иссл. в обл. интеллектуальн. систем в медицинских приложениях.