

УДК 681.518.22

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ВАРИАНТОВ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ БИОСЕНСОРОВ

¹Зарипова В.М., ²Евдошенко О.И., ¹Петрова И.Ю.

¹ГАОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет»,
Астрахань, e-mail: irapet1949@gmail.com;

²ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет», Астрахань, e-mail: goronet@list.ru

Стремительный рост мирового рынка биосенсоров обуславливает потребность в создании систем автоматизированного проектирования таких устройств, что позволит ускорить вывод на рынок новых конструкций. Целью статьи является описание математической модели процессов автоматизированного синтеза вариантов физического принципа действия биосенсоров и их ранжирования по совокупности эксплуатационных характеристик. Кратко приведено описание архитектуры информационной системы и баз данных для поддержки процесса концептуального проектирования вариантов физического принципа действия биосенсоров. Представлено расширенное информационно-логическое описание паспортов тест-объектов и физико-технических эффектов как элементов структурных схем, отражающих физический принцип действия биосенсора. Показано, что принцип действия биосенсора можно представить, как последовательное соединение тест-объекта и трансдюсера, который, в свою очередь, представляет собой несколько взаимосвязанных физико-технических эффектов. Определены необходимые и достаточные условия синтеза принципа действия биосенсора: для обеспечения работоспособности биосенсора в целом необходимо соблюдение правила пересечения диапазонов величин выхода тест-объекта и входного физико-технического эффекта трансдюсера, которые должны совпадать по физической природе, а их диапазоны должны пересекаться. Приведены формулы для расчета основных эксплуатационных характеристик синтезированных вариантов биосенсоров. Это позволило разработать алгоритмы синтеза и многокритериального ранжирования синтезированных вариантов принципов действия биосенсоров на основе наборов эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: биосенсор, трансдюсер, тест-объект, автоматизированное проектирование, база знаний, энерго-информационный метод, физико-технический эффект

AUTOMATED SYNTHESIS OF OPTIONS OF THE PHYSICAL PRINCIPLE OF ACTION OF BIOSENSORS

¹Zaripova V.M., ²Evdoshenko O.I., ¹Petrova I.Yu.

¹Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, e-mail: irapet1949@gmail.com;

²Astrakhan State University, Astrakhan, e-mail: goronet@list.ru

The rapid growth of the world market of biosensors necessitates the creation of automated design systems for such devices. Thus it will speed up the introduction of new designs to the market. The purpose of the article is to describe the mathematical model of the processes of automated synthesis of variants of the physical principle of the action of biosensors and their ranking on base of the combination of operational characteristics. Brief description of the architecture of the information system and databases developed in order to support the process of conceptual designs is given. An extended information and logical description of passports of test objects and physical and technical effects as elements of structural schemes reflecting the physical principle of the action of the biosensor was presented. It is shown that the principle of the action of the biosensor could be represented as the test object consecutively connected with the transducer. Transducer could be represented as several interrelated physical and technical effects. The necessary and sufficient conditions for synthesizing the principle of the action of the biosensor are determined. In order to ensure the efficiency of the biosensor it is necessary to observe the rule of intersection of the ranges of the output value of the test object and the input value of the first physico-technical effect of the transducer, both values must coincide in physical nature, and their ranges must overlap. Basic performance characteristics of synthesized variants of biosensors are described. This allowed to develop algorithms for synthesizing and multicriteria ranking of synthesized designs on the basis of sets of their operational characteristics.

Keywords: biosensor, transducer, test object, computer-aided design, knowledge base, energy-information method, physico-technical effect

Согласно новому отчету о рыночных исследованиях компании MarketsandMarkets (США) ожидается, что к 2022 г. рынок биосенсоров будет оцениваться в 27,06 млрд долл. США, увеличиваясь ежегодно на 8,84% в период с 2017 по 2022 г. Рост рынка обусловлен непрерывными технологическими достижениями в производстве биосенсоров, увеличением использования биосенсоров для немедицинских приложений, ростом спроса на средства для экспресс-диагностики и особенно системы мониторинга глюкозы [1].

В период с 1950 по 2017 г. было опубликовано более 150 000 статей, посвященных применению биосенсоров в разных отраслях [2].

Биосенсор конструктивно объединяет два преобразователя, которые контактируют друг с другом: биохимический (тест-объект) и физический (трансдюсер). В тест-объектах могут быть использованы разные виды биологических структур (ферменты, антитела, живые клетки, микроорганизмы и др.). Принцип действия трансдюсеров основан на использовании различных физико-технических эффектов во взаимодействии

(электромагнитных, оптических, гравитационных, калориметрических и др.) [3, 4].

Теоретически любой тест-объект можно комбинировать с любым из возможных трансдьюсеров, представляющих собой сочетание нескольких физико-технических эффектов. Поэтому возможно большое разнообразие различных видов биосенсоров. Различные виды классификации биосенсоров приведены в [5]. Для ускорения процесса синтеза новых конструкций биосенсоров необходимо создание систем автоматизированного проектирования таких устройств.

Автоматизированная система синтеза биосенсоров. Структура паспортов биорецептора и ФТЭ

В работе [6, 7] приведены принципы организации и архитектура автоматизиро-

ванной системы проектирования биосенсоров на основе энергоинформационных моделей цепей различной физической природы. В состав этой системы входят две базы знаний:

База знаний об иммобилизованных биологических тест-объектах (БД_ТО). Тест-объекты формируют селективный отклик на определяемый компонент в виде аналитического сигнала для последующих преобразований в трансдьюсере. Тест-объект характеризуется рядом параметров (обнаруживаемое вещество, метод преобразования, выходная величина в терминах ЭИМЦ, химическая реакция, способ иммобилизации, материалы электродов, чувствительность, надежность регистрации и др.), зафиксированных в паспорте тест-объекта (табл. 1).

Таблица 1

Структура паспорта тест-объекта

Обнаруживаемое вещество	Наименование	№
Метод обнаружения	Наименование	
Выходная величина в терминах ЭИМЦ	Наименование	Обозначение [единица измерения]
Биорецептор	Тип биорецептора	Название биорецептора
	Наименование (вещество, микроорганизмы, ...)	
Реакция химическая/ схема процесса		
Иммобилизация (способы)		
Электроды		
Эксплуатационные характеристики		
Чувствительность	Относительная погрешность	
Диапазон		
Время анализа (быстродействие)	Операционная стабильность ¹ (надежность)	
Период измерения ²	Стабильность при хранении	
Источники информации		
Примечания		

Примечание. ¹Стабильность сенсора при проведении непрерывных измерений. ²Период измерения включает время анализа и время восстановления сигнала.

Таблица 2

Структура паспорта физико-технического эффекта (ФТЭ)

Наименование ФТЭ или параметра	
Звено параметрической структурной схемы (ПСС)	Формула ЭИМЦ
Вывод формулы ФТЭ в терминах ЭИМЦ	
Формула коэффициента преобразования ФТЭ и его размерность	
Интервал значений коэффициента Описание величин формулы	Усредненные численные значения эксплуатационных характеристик (чувствительность, диапазон, надежность, быстродействие и т.д.)
Источники информации	
Рисунок технической реализации	Краткое описание

База знаний об известных физических эффектах и явлениях (БД_ФТЭ) на основе энерго-информационных моделей цепей (ЭИМЦ) разной физической природы. Она используется для синтеза физического принципа действия преобразователей (трансдюсеров) [5]. Структурированные знания о каждом физико-техническом эффекте представлены в виде паспорта эффекта, который содержит описание эффекта, входной и выходной величины, а также усредненные типовые значения эксплуатационных характеристик и формулу расчета коэффициента передачи на основе известных физических законов (табл. 2).

Расширенные информационно-логические модели паспорта биорецептора и паспорта ФТЭ

Тест-объект является первым звеном цепочки преобразований, приводящих к требуемой выходной величине и, таким образом, на выходе связывается с трансдюсером, обеспечивающим первичное преобразование.

Паспорт тест-объекта (ТО) может быть представлен как кортеж типа

$$TO_{Aj} = \{A, M, B_{k\ out}, D_{k\ out}^{TO}, BT, BE, RT, RF, Im, E, EX_{n|}^N, PX_{n|}^N\}, \quad (1)$$

A – обнаруживаемое вещество (текстовое описание),
M – метод обнаружения (текстовое описание),
B_{k out} – вид выходной величины *k*-ой физической природы,
D_{k out}^{TO} – диапазон изменения выходной величины тест-объекта (ТО),
BT – тип тест-объекта (текстовое описание),
BE – тип вещества тест-объекта (текстовое описание),
RT – тип химической реакции (текстовое описание),
RF – формула химической реакции,
Im – иммобилизатор (текстовое описание),
E – электрод (текстовое описание).

Две последних группы в формуле (1) представляют собой перечни усредненных численных значений эксплуатационных характеристик данного типа тест-объекта (от 0 до 7). Сам перечень характеристик и их усредненные числовые значения определяются группой экспертов в данной предметной области. Однако обязательными эксплуатационными характеристиками являются чувствительность, диапазон, надежность, быстродействие и относительная погрешность.

EX_{n|}^N – смежные эксплуатационные характеристики при полном синтезе фи-

зического принципа действия биосенсора. Если хотя бы один вид эксплуатационной характеристики известен для тест-объекта и всех ФТЭ, входящих в синтезированную цепочку физического принципа действия трансдюсера (т.е. характеристика является смежной), то возможен расчет этой эксплуатационной характеристики для синтезированного устройства в целом.

PX_{n|}^N – независимые эксплуатационные характеристики синтезированного физического принципа действия, свойственные только тест-объекту (например, стабильность при хранении или период измерения). В случае наличия значений они дополняют общий расчет характеристик синтезированного физического принципа действия биосенсора.

Далее рассмотрим информационно-логическую модель паспорта физико-технического эффекта (ФТЭ), связывающего две цепи *i*-ой и *j*-ой физической природы, представленную как кортеж типа:

$$ФТЭ_{ij} = \{N_{ФТЭ}, B_{i\ in}, B_{j\ out}, K_{ij}, K_o, KM_{PTE}, D_{i\ in}, D_{j\ out}, EX_{n|}^N\}, \quad (2)$$

Кортеж также может быть разбит на 2 группы, где первая группа представляет описание физико-технического эффекта (ФТЭ):

N_{ФТЭ} – наименование физико-технического эффекта (текстовая величина),
B_{i in} – входная величина *i*-ой физической природы,
B_{j out} – выходная величина *j*-ой физической природы,
K_{ij} – коэффициент преобразования, отражает зависимость выходной величины от входной величины (простейший случай – линейная зависимость), *B_{j out} = K_{ij} · B_{i in}*.
K_o – текстовая величина, представляет текстовое описание коэффициента *K_{ij}* и его формулу в функции известных физических констант, параметров материалов и геометрических размеров,

KM_{ФТЭ} – коэффициент влияния ФТЭ, которой описывает функциональную связь физических величин входа и выхода, например учет влияния полей (коэффициент влияния может принимать значения 1 или 0),

D_{i in}, D_{j out} – диапазон изменения входной и выходной величины.

Для обеспечения работоспособности цепочки необходимо соблюдение правила пересечения диапазонов величин выхода каждого предыдущего эффекта и входа каждого последующего эффекта в цепочке при условии совпадения их физической природы:

$$D_{i\ in}^n \cap D_{j\ out}^{n-1} \text{ и } D_{j\ out}^n \cap D_{i\ in}^{n+1} | i = j.$$

Вторая группа в формуле (2) представляет набор эксплуатационных характеристик (от 0 до 10), сам набор этих характеристик и их усредненные числовые значения определяются группой специалистов (экспертов) в данной предметной области:

EX_{n1}^N – итоговые численные значения эксплуатационных характеристик синтезированного варианта физического принципа действия, для которых формулы приведены в табл. 3 данной статьи. Расчет результирующей эксплуатационной характеристики для синтезированного варианта биосенсора возможен, если в паспортах имеются числовые данные по этой характеристике для тест-объекта и всех ФТЭ, входящих в синтезированную цепочку физического принципа действия трансдюсера.

Для обеспечения работоспособности биосенсора в целом необходимо соблюдение правила пересечения диапазонов величин выхода тест-объекта и входного физико-технического эффекта (ФТЭ) трансдюсера, которые должны совпадать по физической природе, а их диапазоны должны пересекаться: $D_{k\text{out}}^{\text{ТО}} \cap D_{i\text{in}}^{\text{ФТЭ}} | k = i$.

$$\begin{aligned} \text{ПД_БС} = & \left(\text{ТО}_k, \text{ФТЭ}_{ij}^1, \text{ФТЭ}_{ij}^2, \dots, \text{ФТЭ}_{ij}^m \dots \text{ФТЭ}_{ij}^N \mid \text{ТО}_k \in \text{БД_ТО} \wedge \text{ФТЭ}_{ij}^m \in \right. \\ & \left. \in \text{БД_ФТЭ} \wedge B_{k\text{out}} = B_{i\text{in}}^1 \wedge k = i^1 \wedge B_{j\text{out}}^m = B_{i\text{in}}^{m+1} \wedge j^m = i^{m+1} \Big|_{m=1}^N \right). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом биосенсор будет являться работоспособным, если диапазоны выходной величины предыдущего звена и входной величины последующего звена в формуле (3) пересекаются $D_{i\text{in}}^n \cap D_{i\text{out}}^{n-1}$.

Алгоритм многокритериального ранжирования синтезированных вариантов на основе наборов эксплуатационных характеристик

В паспортах ТО и ФТЭ имеются наборы эксплуатационных характеристик (чувствительность, погрешность, диапазон, надёжность, быстродействие и др.), позволяющие

Синтез принципа действия биосенсора

Принцип действия биосенсора можно представить как последовательное соединение тест-объекта и трансдюсера, который, в свою очередь, представляет собой несколько взаимосвязанных физико-технических эффектов (рис. 1).

Необходимым и достаточным условием синтеза принципа действия биосенсора (ПД_БС) является совпадение выходной величины тест-объекта с входной величиной первого ФТЭ в цепочке, образующей принцип действия трансдюсера. Далее выходная величина каждого ФТЭ трансдюсера должна совпадать с входной величиной следующего за ним эффекта в цепочке и т.д.:

$$\text{ПД_БС} = \langle \text{ТО}_k, \text{ФТЭ}_{12}, \text{ФТЭ}_{23}, \dots, \text{ФТЭ}_{ij}, \dots, \text{ФТЭ}_{(N-1)N} \rangle,$$

где ТО_k – k -ый тест-объект из базы данных тест-объектов (БД_ТО), ФТЭ_{ij} – физико-технический эффект в трансдюсере (входная величина i -ой физической природы, а выходная j -ой физической природы), выбирается из базы данных БД_ФТЭ.

Тогда для цепочки эффектов, образующих принцип действия биосенсора (ПД_БС), можно записать

оценить эксплуатационные свойства синтезированных технических решений.

Эксплуатационные характеристики синтезированного биосенсора вычислимы, если известны эксплуатационные характеристики для тест-объекта и каждого эффекта в цепочке:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{нБС}} = & f(\mathcal{E}_{\text{кТО}}, \mathcal{E}_{\text{мФТЭ}}) (\forall \text{ТО} \in \text{БД_ТО} \wedge \forall \text{ФТЭ} \in \\ & \in \text{БД_ФТЭ}) \exists \mathcal{E}_{\text{кТО}} \wedge \exists \mathcal{E}_{\text{мФТЭ}}. \end{aligned}$$

Для расчета эксплуатационных характеристик синтезированного биосенсора по значениям характеристик отдельных звеньев, приведенным в паспортах, используются математические модели, приведенные в табл. 3.

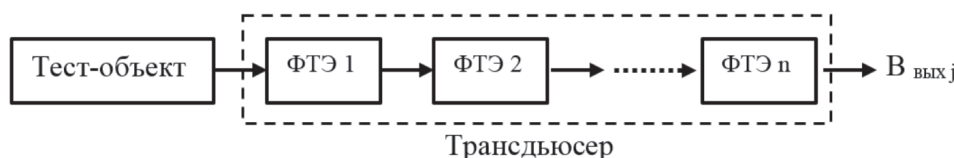


Рис. 1. Принцип действия биосенсора

Таблица 3

Формулы расчета эксплуатационных характеристик

№ п/п	Характеристика	Формула	Описание
1	Чувствительность	$S = \prod_{i=1}^{i \leq GP} S_i$	где S_i – чувствительность i звена в цепочке; GP – длина цепочки ($2 \leq GP \leq GP_{max} \leq 10$)
2	Надежность	$R = \sum_{i=1}^{i \leq GP} R_i$	где R_i – надежность i звена в цепочке; GP – длина цепочки ($1 \leq GP \leq GP_{max} \leq 10$)
3	Погрешность	$F = \sum_{i=1}^{i \leq GP} F_i$	где F_i – погрешность i звена в цепочке; GP – длина цепочки ($1 \leq GP \leq GP_{max} \leq 10$)
4	Быстродействие	$H = \sum_{i=1}^{i \leq GP} H_i$	где H_i – быстродействие i звена в цепочке; GP – длина цепочки ($1 \leq GP \leq GP_{max} \leq 10$)
5	Нижняя и верхняя границы диапазона выходного сигнала биосенсора	<p>Рассчитывается как последовательное пересечение выходных и входных диапазонов для каждой пары рядом стоящих звеньев</p> $\left\{ \begin{aligned} D_{k out}^{TO} \cap D_{1 in}^{ФТЭ} &= (D_{1 in}^{ФТЭ}; D_{1 in}^{ФТЭ}) \\ (K_1 * D_{1 in}^{ФТЭ}; K_1 * D_{1 in}^{ФТЭ}) \cap (D_{1 out n}^{ФТЭ}; D_{1 out v}^{ФТЭ}) &= (D_{2 in}^{ФТЭ}; D_{2 in}^{ФТЭ}) \\ (K_1 * D_{1 in}^{ФТЭ}; K_1 * D_{1 in}^{ФТЭ}) \cap (D_{1 out n}^{ФТЭ}; D_{1 out v}^{ФТЭ}) &= (D_{2 in}^{ФТЭ}; D_{2 in}^{ФТЭ}) \\ &\dots \\ (K_N * D_{N-1 in}^{ФТЭ}; K_N * D_{N-1 in}^{ФТЭ}) \cap (D_{N out n}^{ФТЭ}; D_{N out v}^{ФТЭ}) &= (D_{N out n}^{ФТЭ}; D_{N out v}^{ФТЭ}) \end{aligned} \right. ,$	<p>где $D_{k out}^{TO}$ – диапазон изменения выходной величины тест-объекта (ТО); $D_{1 in}^{ФТЭ}$ – диапазон изменения входной величины 1-го ФТЭ в цепочке трансдьюсера; $D_{1 in n}^{ФТЭ}; D_{1 in v}^{ФТЭ}$ – итоговые нижняя и верхняя границы входного диапазона 1-го ФТЭ в цепочке трансдьюсера; K_i – чувствительность i звена в цепочке; $D_{i in n}^{ФТЭ}; D_{i in v}^{ФТЭ}$ – нижняя и верхняя границы диапазона входной величины i-го ФТЭ в цепочке трансдьюсера ($1 \leq i \leq N$); $D_{i out n}^{ФТЭ}; D_{i out v}^{ФТЭ}$ – нижняя и верхняя границы выходного диапазона i-го звена в цепочке трансдьюсера ($1 \leq i \leq N$); $D_{2 in n}^{ФТЭ}; D_{2 in v}^{ФТЭ}$ – итоговые нижняя и верхняя границы входного диапазона $(i + 1)$-го ФТЭ в цепочке трансдьюсера $D_{N out n}^{ФТЭ}; D_{N out v}^{ФТЭ}$ – итоговые нижняя и верхняя границы выходного диапазона цепочки-решения</p>

Так как эксплуатационные характеристики имеют различную размерность, то при образовании целевой функции для ранжирования синтезированных вариантов по совокупности эксплуатационных характеристик оперируют не с расчетными значениями критериев, а с их нормированными значениями. Нормированные значения критериев представляют собой отношение расчетного частного критерия к некоторой нормирующей величине, измеряемой в тех же единицах, что и сам критерий, т.е. нормированные значения частных критериев являются безразмерными. Нормирующая величина определяется как максимальное или минимальное значение соответствующей эксплуатационной характеристики на множестве синтезированных принципов действия биосенсоров.

Учитывая, что наилучшими являются те решения, в которых чувствительность, надежность и диапазон выходной величины имеют наибольшие значения, а остальные характеристики – наименьшие значения, то могут использоваться соответственно два варианта нормирования (табл. 4).

Так как существенное значение имеют абсолютные нормированные значения критериев, то для сведения частных показателей к целевой функции используется аддитивный критерий эффективности. Для i -го варианта конструкции биосенсора обобщенный критерий эффективности:

$$K_{i \text{эфф}} = \sum_{k=1}^N \zeta_k \cdot \tilde{\mathcal{E}}_{ik}, \quad (4)$$

где $\tilde{\mathcal{E}}_{ik}$ – относительное значение k -го критерия эффективности, т.е. k -ой эксплуатаци-

онной характеристики, которое определяется по табл. 4; ζ_k – весовой коэффициент, характеризующий важность k -ой эксплуатационной характеристики.

Весовые коэффициенты важности эксплуатационных характеристик в формуле (4) задаются в пределах от единицы до десяти: 10 – соответствует наибольшей значимости данной эксплуатационной характеристики, 0 – исключение данной характеристики из рассмотрения. Полученным значениям присваиваются места, причем первое место получает решение, имеющее максимальное значение обобщенного критерия. Таким образом, вариант, занявший первое место, будет наиболее эффективным по совокупности эксплуатационных характеристик.

На рис. 2 показан пример поиска принципа действия транзьюсера для калориметрического биосенсора. Фрагмент результата синтеза вариантов принципа действия калориметрического биосенсора приведен на рис. 2, а. Все варианты ранжированы по совокупности эксплуатационных характеристик. Четвертый вариант (отмечен курсором) представляет собой сочетание двух ФТЭ (пирозлектрический ФТЭ и эффект

поля в МДП-транзисторе). Внизу можно видеть результат расчета одной из эксплуатационных характеристик (чувствительность) при заданном весовом коэффициенте – 1. На рис. 2, б, показаны результаты поиска аналогов в системе. Найдены 2 патента США – ближайшие аналоги синтезированного варианта. Это свидетельствует о работоспособности системы.

Выводы

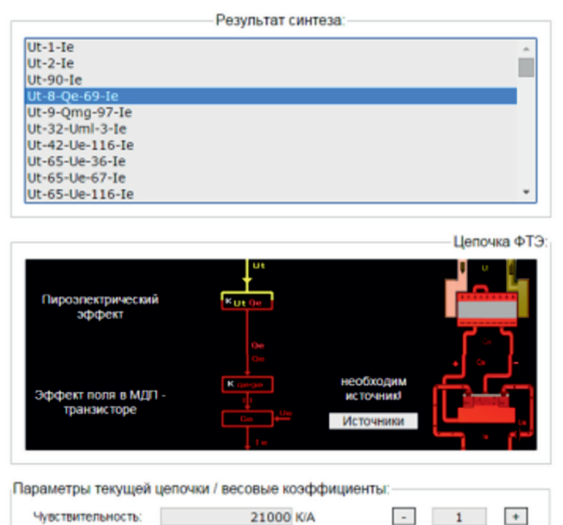
В статье приведено описание информационно-логических моделей паспорта ФТЭ и тест-объекта, математической модели процесса автоматизированного синтеза вариантов физического принципа действия биосенсоров и их ранжирования по совокупности эксплуатационных характеристик.

Показано, что необходимым и достаточным условием синтеза принципа действия биосенсора является совпадение выходной величины тест-объекта с входной величиной первого физико-технического эффекта в цепочке, образующей принцип действия транзьюсера, а также пересечение диапазонов выходной величины предыдущего звена и входной величины последующего звена.

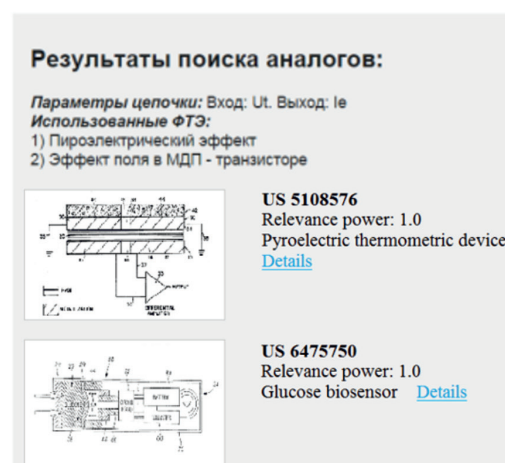
Таблица 4

Варианты нормирования эксплуатационных характеристик

Вариант	Эксплуатационные характеристики	p_n – нормированная характеристика	Min p_n	Max p_n	Диапазон изменения p_n
1	Чувствительность, надежность, диапазон	x_i / x_{max}	<1	1	$0 < p_n \leq 1$
2	Погрешность, быстродействие	x_{min} / x_i	<1	1	$0 < p_n \leq 1$



а)



б)

Рис. 2. Пример синтеза транзьюсера для калориметрического биосенсора

Получены формулы для расчета эксплуатационных характеристик синтезированного биосенсора по значениям характеристик отдельных звеньев, приведенным в паспортах.

Разработан алгоритм многокритериального ранжирования синтезированных вариантов принципа действия биосенсоров по совокупности эксплуатационных характеристик на основе интегрального аддитивного критерия эффективности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00258/17.

Список литературы

1. Biosensors Market by Application (POC, Home Diagnostics, Research Labs, Biodefense, Environmental Monitoring, Food & Beverages Industry), Technology, Product (Wearable and Non-Wearable), and Geography – Global Forecast to 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/biosensors.asp> (дата обращения: 03.02.2018).
2. Tavakoli J., Tang Y. Hydrogel Based Sensors for Biomedical Applications. An Updated Review // *Polymers*. – 2017. – Vol. 9. № 8. – P. 2–25.
3. Mehrotra P. Biosensors and their applications – A review // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*. – 2016. – Vol. 6. № 2. – P. 153–159.
4. Turdean G.L. Design and Development of Biosensors for the Detection of Heavy Metal Toxicity // *International Journal of Electrochemistry*. Volume 2011, Article ID 343125, 15 p. DOI: 10.4061/2011/343125.
5. Биосенсоры для осуществления мероприятий экологического мониторинга: классификация и особенности разработки / Д.Л. Поклонский [и др.] // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2017. – № 4. – С. 12–19.
6. Энергоинформационные модели биосенсоров / И.Ю. Петрова [и др.] // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 35–48.
7. Зарипова В.М., Евдошенко О.И., Лежнина Ю.А., Петрова И.Ю. Автоматизированная система поддержки концептуального проектирования биосенсоров / в сб. *Перспективы развития строительного комплекса* // Изд. Астрах. гос. арх-строит. ун-та. – Астрахань, 2017. – С. 255–261.