

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

---

УДК 004.023

### ЭВОЛЮЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ

**В. А. Ломазов, В. И. Ломазова, Д. А. Петросов**

*ФГБОУ ВПО «Белгородская государственная  
сельскохозяйственная академия им. В. Я. Горина»;  
ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет», г. Белгород*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор С. И. Маторин*

**Ключевые слова и фразы:** взаимосвязанные процессы; кластеризация; математическая модель; поддержка принятия решений; сложная система; эволюционная процедура.

**Аннотация:** Рассмотрен класс аддитивных модельных представлений взаимосвязанных друг с другом процессов. Сформулирована проблема выбора в рассматриваемом классе минимальной по сложности модели, удовлетворяющей требованиям адекватности. Представление моделей в виде бинарных кортежей, характеризующих учет взаимодействия процессов, позволяет использовать расстояние Хэмминга между кортежами для оценки близости моделей. Предложена эволюционная процедура кластеризации полученного метрического пространства моделей, основанная на модификации метода восходящей иерархической классификации, в рамках которой проводится генетическое формирование центроидов кластеров. Проведен последующий выбор модели сначала из центроидов, а затем в соответствующем кластере. Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют об эффективности предложенного подхода.

---

Ломазов Вадим Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий, БелГСХА им. В. Я. Горина, e-mail: vlomazov@yandex.ru; Ломазова Валентина Ивановна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационного менеджмента, НИУ «БелГУ»; Петросов Давид Арегович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой информатики и информационных технологий, БелГСХА им. В. Я. Горина, г. Белгород.

## Введение

Проблема выбора адекватной модели при исследовании взаимосвязанных процессов, протекающих в сложных (социально-экономических, научно-образовательных, химико-технологических, производственно-экономических и т. д.) системах, актуальна для различных областей приложений [1 – 3]. Общим методологическим аспектом данной проблемы является необходимость при моделировании принятия решения по определению степени учета между процессами:

- большого числа связей, которое приводит к высокой сложности модели и большим затратам в процессе ее использования;
- небольшого числа связей, которое может привести к потере адекватности модели, а значит к недостоверности результатов моделирования.

Оптимизационный подход к решению поставленной задачи в рамках исследования сложных систем (и взаимосвязанных процессов) рассмотрен в работах [4, 5]. Однако большая мощность множества моделей многих сложных систем приводит к значительным затратам машинного времени при реализации алгоритмов селекции [5].

Кластеризационный подход поддержки принятия решений по выбору (селекции) адекватных моделей взаимосвязанных процессов [4] предполагает иерархическое сокращение пространства выбора до небольшого (по числу моделей) кластера, после чего окончательный выбор модели предоставляется лицу, принимающему решение (ЛПР). Однако при большом исходном пространстве выбора моделей данный подход также нельзя считать в полной мере эффективным, поскольку он либо приводит к длинным иерархическим цепочкам (большим вычислительным затратам), либо имеет своим результатом достаточно большой кластер (что осложняет окончательный выбор для ЛПР).

В рамках настоящей работы предлагается исследовать сформулированную проблему с использованием математического аппарата искусственного интеллекта и, в частности, на основе применения биоинспирированных методов эволюционного моделирования [6].

Цель работы – разработка эволюционной процедуры поддержки принятия решения по выбору минимальной по сложности модели взаимосвязанных процессов при сохранении требуемого уровня адекватности. При этом до выполнения генетической оптимизационной процедуры предлагается проведение предварительной эволюционной кластеризации моделей, предназначенной для сокращения пространства поиска.

## Моделирование взаимосвязанных процессов

Закон функционирования (функциональная модель)  $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_R)$  сложной системы  $S$  представляет собой набор соотношений, описывающих функционирование отдельных подсистем  $S_r$  ( $r = 1, 2, \dots, R$ ) в виде взаимосвязанных процессов  $z_r(t)$ , характеризующихся системой связанных между собой соотношений

$$z_r(t) = F_r(z_1, z_2, \dots, z_R, t), \quad r = 1, 2, \dots, R. \quad (1)$$

Связь между отдельными соотношениями системы (1) проявляется в наличии характеристик процессов функционирования всех подсистем  $S$  в качестве аргументов в функционалах  $F_r$  ( $r = 1, 2, \dots, R$ ).

Ограничимся рассмотрением моделей взаимосвязанных процессов, в которых воздействие на каждый процесс со стороны других процессов представляется аддитивным способом, соответствующим сепарабельности функционала  $F_r$ , то есть

$$z_r(t) = F_r(z_r, t) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq r}}^R a_{rk} F_{rk}(z_k, t), \quad r, k = 1, 2, \dots, R. \quad (2)$$

В соотношениях (2) коэффициенты  $a_{rk}$  учитывают степень воздействия процесса  $z_k$  на процесс  $z_r$ . В рассматриваемом в настоящей работе простейшем случае эти коэффициенты полагаются бинарными и принимающими значения из множества  $\{0, 1\}$ , где 0 – неучет влияния  $z_k$  на  $z_r$ ; 1 – учет влияния  $z_k$  на  $z_r$ . Таким образом, в зависимости от набора значений коэффициентов  $a_{rk}$ , система соотношений (2) описывает одну из моделей процесса  $Z$ , нужным образом учитывающую взаимосвязь между процессами в рамках конкретного исследования, что позволяет (в соответствии с подходами эволюционного моделирования [6]) построить информационное представление каждой отдельной модели в виде бинарной хромосомы, которой являются коэффициенты  $a_{rk}$  ( $r, k = 1, 2, \dots, R; r \neq k$ ).

Совокупность моделей (бинарных хромосом) после введения алгебраических операций над моделями (их кластерами), таких как объединение, пересечение и разность моделей [7], представляет собой алгебраическую структуру. Введение метрического расстояния между моделями (например, расстояние Хэмминга между хромосомами) позволяет рассматривать совокупность моделей в качестве метрического пространства.

Выявленные математические свойства совокупности моделей дают возможность разработки алгоритмической поддержки решения задачи по выбору адекватной модели взаимосвязанных процессов, имеющей минимальную сложность.

### Процедура предварительной эволюционной кластеризации моделей

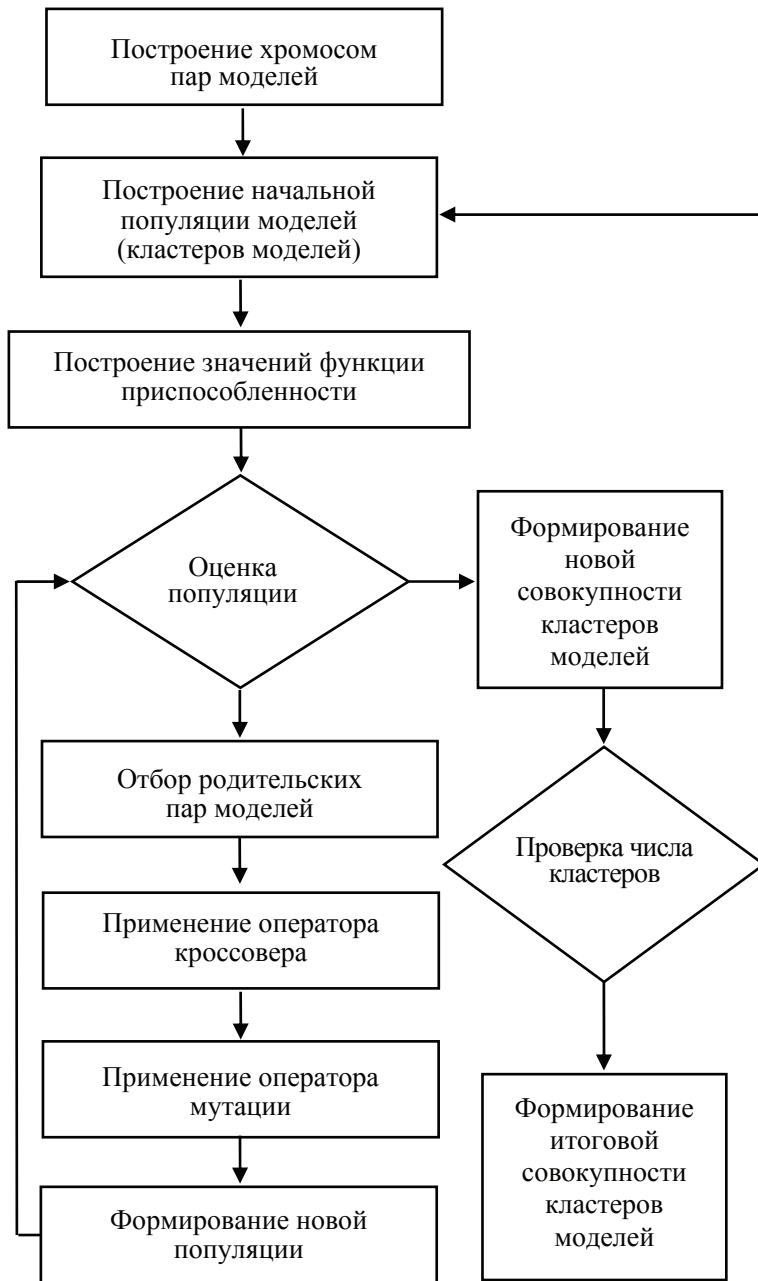
Для кластеризации совокупности моделей взаимосвязанных процессов в качестве метрического расстояния между моделями  $M^*$  и  $M^{**}$  предлагается использовать расстояние Хэмминга (Hamming distance)

$$D_H(M^*, M^{**}) = \frac{1}{R(R-1)} \sum_{r=1}^R \sum_{\substack{k=1 \\ r \neq k}}^R \text{abs}(a_{rk}^* - a_{rk}^{**}).$$

Расстояние между моделью  $M^*$  и группой моделей  $G^{**}$ , а также расстояние между группами моделей  $G^*$  и  $G^{**}$  определяется по формулам

$$D_H(M^*, G^{**}) = \min_{M^{**} \in G^{**}} D_H(M^*, M^{**}); \quad D_H(G^*, G^{**}) = \min_{M^{**} \in G^{**}} D_H(G^*, M^{**}).$$

*Представлением кластеризации моделей* назовем совокупность главных моделей (центроидов кластеров), вычисляемых как центры масс (медианы Кемени) бинарных кортежей моделей, входящих в кластеры. Процедура эволюционной восходящей иерархической классификации совокупности моделей (рис. 1) включает в себя традиционные этапы генетического алгоритма, имеющие в рассматриваемом случае содержание, отражающее специфику задачи кластеризации:



**Рис. 1.** Схема процедуры предварительной кластеризации

1) построение начальной популяции главных моделей кластеризации случайным выбором заданного числа моделей из класса моделей, описываемых соотношениями (2);

2) оценка популяции, где в качестве критерия используется минимальное расстояние между главными моделями. Если значение критерия превышает заданную величину или не увеличивается в течение нескольких поколений, то останов работы процедуры и вывод популяции главных моделей в качестве представления кластеризации;

3) построение для каждой главной модели значения нормализованной функции приспособленности (fitness function) как расстояние между моделью и группой, в которую входят остальные главные модели популяции;

4) турнирный (или рулеточный) отбор родительских пар;

5) применение генетических операторов скрещивания и мутации для получения новых моделей;

6) формирование новой популяции главных моделей путем добавления новых к прежней популяции, последующего применения метода иерархической классификации и определения новых главных моделей. Переход к этапу 2;

7) получение представления кластеризации и останов процедуры.

Предложенная процедура позволяет получить «равномерное» распределение центроидов в пространстве выбора моделей взаимосвязанных процессов.

### **Процедура эволюционной селекции моделей**

После кластеризации совокупности моделей задача нахождения наилучшей модели предполагает последовательное решение следующих подзадач:

– нахождение кластера, в котором находится наилучшая модель;

– нахождение наилучшей модели в найденном кластере.

Обе подзадачи решаются при помощи единой процедуры эволюционной селекции, которая в первом случае применяется для характерных моделей каждого кластера (в качестве которых могут быть использованы медианы Кемени), а во втором случае – для всех моделей выбранного кластера.

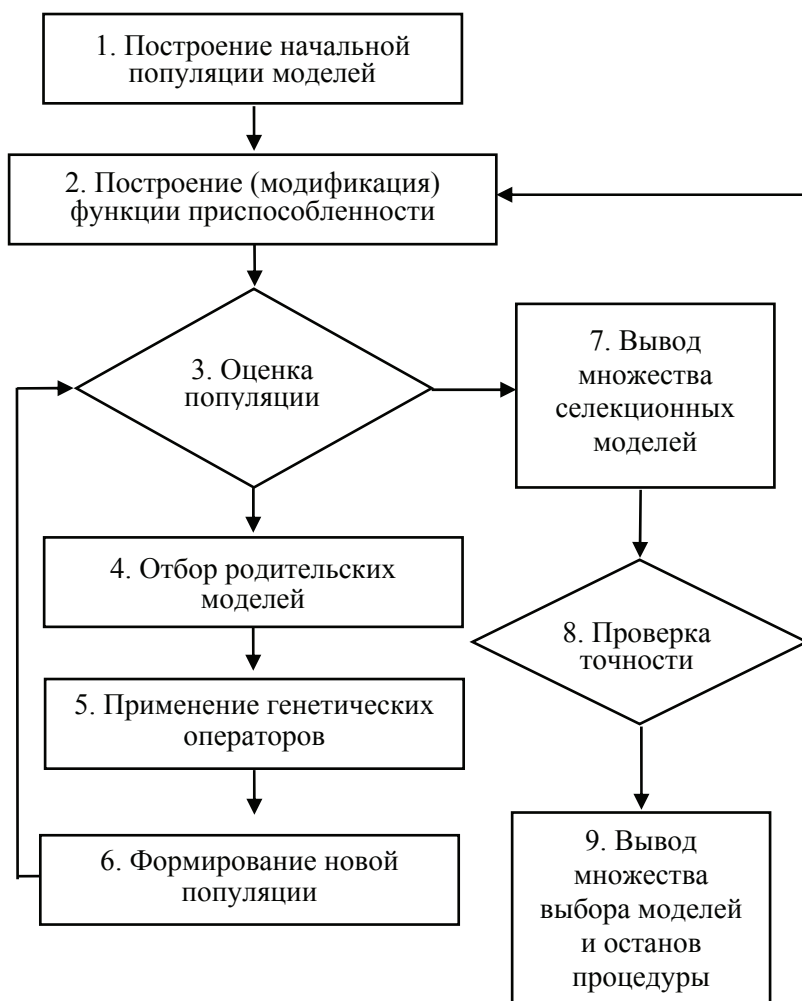
Разработанная эволюционная процедура селекции моделей взаимосвязанных процессов (рис. 2) включает следующие основные этапы:

1) построение начальной популяции моделей случайным выбором из класса моделей;

2) построение (модификация) функции приспособленности  $F$  в виде суммы критерия сложности  $K_{\text{def}}$  (определяемого числом учитываемых дефектов связанности и сложностью их учета) и выступающего в качестве штрафной функции критерия адекватности  $K_{\text{adeq}}$  (определяемого погрешностью модели при численном решении тестовых задач):

$$F = K_{\text{def}} + pK_{\text{adeq}},$$

где  $p$  – штрафной коэффициент;



**Рис. 2. Схема процедуры селекции**

3) проверка стандартных [6] условий останова эволюционного процесса. Если они выполнены, то переход на п. 7;

4) турнирный (или рулеточный) отбор родительских пар;

5) применение генетических операторов скрещивания и мутации;

6) формирование новой популяции;

7) вывод множества селекционных моделей, удовлетворяющих оценке;

8) проверка выполнения требуемой точности. Если она не достаточна, то возврат на п. 2 с увеличением штрафного коэффициента при критерии адекватности;

9) вывод множества моделей для выбора ЛПР и останов процедуры.

Как и любой эвристический метод случайного поиска, предлагаемая процедура эволюционной селекции моделей не гарантирует нахождение оптимального решения, но представляется более эффективным, чем гарантирующий точное решение метод полного перебора. Процедура поддержки принятия решений при выборе модели взаимосвязанных процессов,

хотя и требует определенных вычислительных ресурсов, позволяет сократить затраты времени при проведении наиболее трудоемкой стадии компьютерного моделирования – стадии проведения вычислительных экспериментов. Расчеты, проведенные на основе программной реализации разработанной процедуры в рамках исследовательского прототипа системы поддержки принятия решений при моделировании взаимосвязанных процессов, свидетельствуют об эффективности предложенного подхода.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-07-00246.*

#### *Список литературы*

1. Акупиан, О. С. Модели и методы мониторинга реализации региональных социально-экономических проектов [Электронный ресурс] / О. С. Акупиан, В. А. Ломазов, Д. А. Петросов // *Соврем. проблемы науки и образования*. – 2012. – № 3. – Режим доступа : [www.science-education.ru/95-4569](http://www.science-education.ru/95-4569) (дата обращения: 01.04.2014).
2. Вовченко, А. И. Автоматизация оценки и прогнозирования технического состояния железнодорожных колесных пар // А. И. Вовченко, В. А. Ломазов // *Информ. системы и технологии*. – 2010. – № 4. – С. 95 – 99.
3. Ломазов, В. А. Учет термочувствительности в задаче диагностики термоупругих сред / В. А. Ломазов, Ю. В. Немировский // *Прикладная механика и техн. физика*. – 2003. – Т. 44. – № 1. – С. 176 – 184.
4. Жилияков, Е. Г. Компьютерная кластеризация совокупности аддитивных математических моделей взаимосвязанных процессов / Е. Г. Жилияков, В. И. Ломазова, В. А. Ломазов // *Вопр. радиоэлектроники*. – 2011. – № 1. – С. 115 – 119.
5. Ломазова, В. И. Формализация выбора математических моделей связанных полей при автоматизации исследований / В. И. Ломазова, В. А. Ломазов // *Информ. системы и технологии*. – 2010. – № 3. – С. 101 – 106.
6. Биоинспирированные методы в оптимизации / Л. А. Гладков [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 384 с.
7. Ломазова, В. И. Информационное описание математических моделей взаимосвязанных процессов в сложных системах / В. И. Ломазова // *Науч. ведомости Белгород. гос. университета. Сер.: История. Политология. Экономика. Информатика*. – 2011. – Т. 17, № 1-1. – С. 201 – 208.

#### *References*

1. Akupiyana O.S., Lomazov V.A., Petrosov D.A., available at: [www.science-education.ru/95-4569](http://www.science-education.ru/95-4569) (accessed 1 April 2014).
2. Vovchenko A.I., Lomazov V.A. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2010, no. 4, pp. 95-99.
3. Lomazov V.A., Nemirovskii Yu.V. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2003, vol. 44, no. 1, pp. 176-184.
4. Zhilyakov E.G., Lomazova V.I., Lomazov V.A. *Voprosy radioelektroniki*, 2011, no. 1, pp. 115-119.
5. Lomazova V.I., Lomazov V.A. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2010, no. 3, pp.101-106.

6. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M., Sorokoletov V.P. *Bioinspirirovannyye metody v optimizatsii* (Bioinspired methods in optimization), Moscow: FIZMATLIT, 2009, 384 p.

7. Lomazova V.I. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika*, 2011, vol. 17, no. 1-1, pp. 201-208.

---

## **Evolutionary Procedure of Decision Support in Modeling Interacting Processes**

**V. A. Lomazov, V. I. Lomazova, D. A. Petrosov**

*Belgorod State Agricultural Academy named after V. Ya. Gorin, Belgorod;  
Belgorod National Research University, Belgorod*

**Key words and phrases:** clustering; complex system; decision support; evolutionary procedure; interacting processes; mathematical model.

**Abstract:** A class of additive model representations of interacting processes is considered. The problem of choice in the considered class the model of minimal complexity and satisfactory adequacy is formulated. Presentation of models in the form of binary corteges describing account the interaction processes allowed to use the Hamming distance between corteges to estimate proximity of models. Proposed evolutionary clustering procedure for metric space of models, based on a modification of the method of hierarchical classification, within which the centroids of clusters are genetically produced. Subsequent model selection is made in the set of centroids first, and then in the corresponding cluster. Results of numerical experiments show the effectiveness of the proposed approach.

---

© В. А. Ломазов, В. И. Ломазова, Д. А. Петросов, 2014

*Статья поступила в редакцию 20.05.2014 г.*