

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5.013

О.И. Ширяева

Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК,

Алматы, Казахстан

E-mail: oshiryayeva@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ

В данной статье сформулированы теоретические основы для синтеза сложных систем управления с использованием алгоритмов искусственных иммунных систем управления сложными объектами: канонического алгоритма клональной селекции (CLONALG), алгоритма негативной селекции (NSA). В качестве сложной системы представлен многомерный многосвязный объект, для которого синтезировано оптимальное управление на основе алгоритмов искусственных иммунных систем. Поставлена задача синтеза оптимального управления сложным объектом, для решения которой сформированы выражения типовых регуляторов и квадратичных критериев качества. С целью минимизации выбранных критериев качества применены поисковые алгоритмы CLONALG и NSA. Построены теоретические основы синтеза сложной системы, включающей шаги синтеза оптимального управления для изолированных подсистем сложной системы, включение взаимосвязей и применения процедуры развязывания для учёта данных взаимосвязей.

Ключевые слова: искусственная иммунная система, синтез оптимального управления, сложная система, алгоритм клональной селекции, алгоритм негативной селекции.

Введение

Проблема синтеза управления сложными технологическими процессами является актуальной задачей в теории управления. Перспективным направлением при проектировании подобных сложных (ММО-систем) является применение биоинспирированных алгоритмов, эффективно использующихся при решении оптимизационных задач [1].

В настоящее время разработано большое количество биоинспирированных методов для синтеза оптимального управления для одномерных (SISO) систем [2,3], в том числе таких, как искусственная иммунная система (AIS) [4]. Алгоритмы, сформированные на основе функционирования искусственных иммунных систем, хорошо зарекомендовали себя при решении задач нахождения оптимальных решений, что эффективно используется для синтеза оптимального управления одномерных систем [5].

В данной статье сформулированы теоретические основы для синтеза сложных систем управления с использованием алгоритмов искусственной иммунной системы: алгоритма CLONALG, алгоритма NSA. Алгоритм клональной селекции основан на механизмах иммунного ответа при внедрении в организм чужеродных антигенов. При этом проводится

процесс распознавания антителами чужеродных антигенов [6]. Для решения задач управления, с целью обнаружения локальных минимумов оптимизационной задачи, разработано программное обеспечение алгоритма негативной селекции, NSA. В ходе реализации программного обеспечения сделан вывод, что данный механизм позволяет распознать и проигнорировать нежелательные экстремумы при поиске оптимальных значений критериев качеств. Методом исключения найденных локальных минимумов задача поиска глобального минимума на основе модифицированного алгоритма решается эффективнее.

Механизм негативной селекции, свойственный иммунной системе, заключается в том, чтобы различать клетки организма от чужеродных клеток. Базовый алгоритм на основе теории отрицательной селекции, созданный Форрестом [7], включает механизм вычисления допустимых отклонений от стандартного функционирования системы. В алгоритме отрицательного отбора используется процесс генерирования отрицательных положений системы. Начальная популяция генерируется случайным образом, но в дальнейшем отрицательные положения системы устраняются [8,9]. Результатом всего этого процесса являются обнаруженные аномалии, и это представляет интерес в рамках обнаружения локальных минимумов.

В биологических системах процесс негативной селекции используется перед клональной селекцией. В данной работе принцип негативной селекции используется для формирования алгоритма начального нахождения оптимумов после алгоритма клональной селекции нахождения глобального минимума.

Алгоритм CLONALG представляет интерес в качестве развития его на класс МИМО-систем управления. Целью данной статьи является формирование теоретических основ синтеза оптимального управления на основе алгоритма клональной селекции CLONALG искусственных иммунных систем для сложной многомерной и многосвязной системы управления. Пусть математическая модель, описывающая сложную систему управления, имеет вид:

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & \dots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & \dots & G_{2n}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{n1}(s) & G_{n2}(s) & \dots & G_{nn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где $G_{ij}, i = j$ – передаточные функции подсистем;

$G_{ij}, i \neq j$ – передаточные функции взаимосвязей между подсистемами.

1. Постановка задачи

Необходимо синтезировать сложную систему управления (1) с целью достижения заданных значений выходных сигналов на основе алгоритмов AIS.

Синтез системы управления определяется нахождением управляющих воздействий, для которых выбран PI-закон регулирования:

$$u_i(s) = P_i \cdot e_i(s) + I_i \cdot \frac{1}{s} \cdot e_i(s), \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $e_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ – ошибки между заданными, $r_i(t)$, и выходными сигналами, $y_i(t)$.

Передаточные функции PI-регуляторов (2) имеют вид [10]:

$$C_{PIi}(s) = P_i + I_i \frac{1}{s}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

Настройка регуляторов выполняется с целью минимизации интегральных квадратичных критериев:

$$ISE_i = \int_{t=0}^{t_1} e_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1, n} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Критерии качества (4) соответствуют локальным регуляторам, u_i , $i = \overline{1, n}$, которые стоят в отдельных контурах [10].

2. Решение задачи

Решение поставленной задачи осуществляется на основе сформированных шагов, включающих алгоритмы AIS:

Шаг 1. Ввод в рассмотрение изолированные контура системы без взаимосвязей:

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{22}(s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & G_{nn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{pmatrix}.$$

Шаг 2. Решение задачи синтеза типовых регуляторов изолированных подсистем без взаимосвязей, регуляторы AIS.

Шаг 3. Подключение взаимосвязей сложной системы.

Шаг 4. Реализация процедуры развязывания в развязывающем устройстве для компенсации влияния взаимосвязей объекта управления (рис. 1).

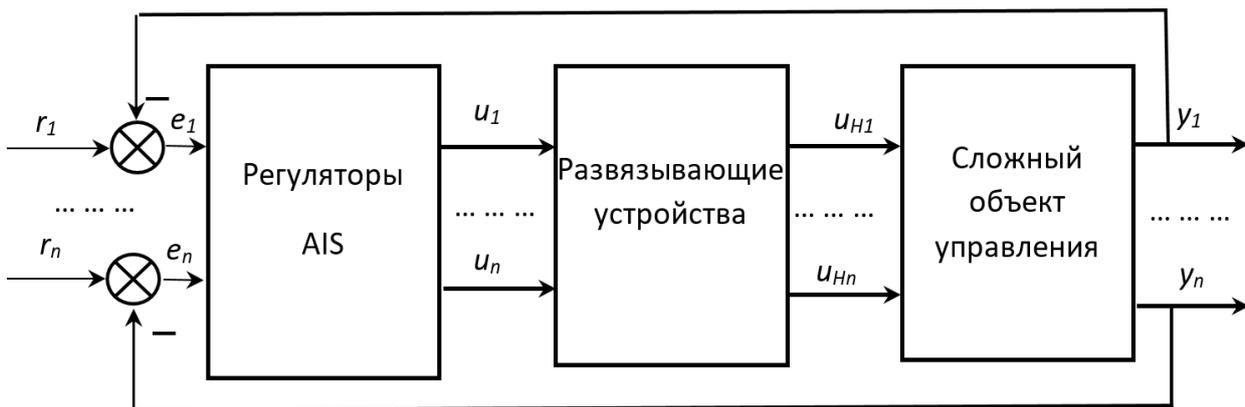


Рисунок 1 – Сложная система управления

Для расчёта параметров регуляторов, обеспечивающих минимум критериям (4), используются алгоритмы искусственных иммунных систем [10]: AIS-NSA, AIS-CLONALG (рис. 2).

В соответствии со свойствами систем автоматического управления и системным требованиям к PI-регуляторам сформулируем ограничения на решения (4):

$$P_i > 0, \quad I_i > 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

при этом имеют место ограничения на область изменения параметров регуляторов для обеспечения устойчивости системы.

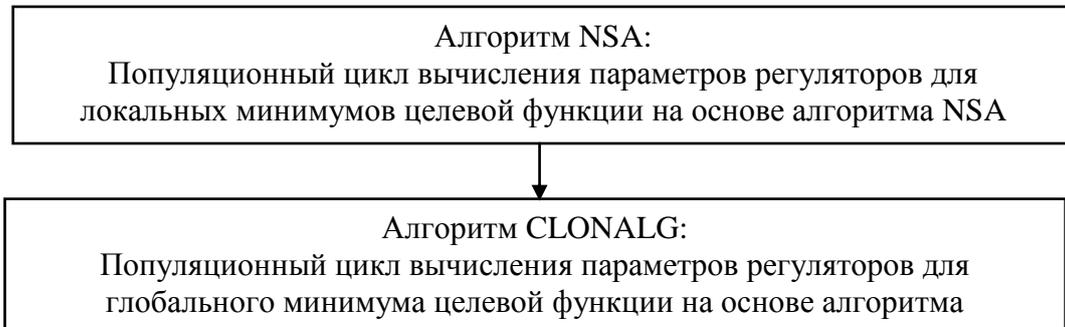


Рисунок 2 – Алгоритмы AIS

Для поиска локальных минимумов и определения диапазона нахождения глобального минимума критериев качества реализуется алгоритм AIS-NSA – алгоритм негативной селекции. На основе представленного алгоритма для критериев качества (4) была реализована технология негативной селекции построения интеллектуальной системы управления в среде MATLAB.

Концептуальной основой применения алгоритма CLONALG для решения синтеза типовых регуляторов для ММО-систем является формирование понятий, соответствующих теории иммунных систем и алгоритму клональной селекции. В контексте постановки задачи для системы управления (1) обобщённая форма антител соответствует вектору аргументов:

$$Ab = (y_i, u_i, i = \overline{1, n}), \quad (6)$$

и представляет собой набор решений системы.

В качестве антигенов используются критерии качества (4):

$$Ag = f(e_i, u_i, i = \overline{1, n}). \quad (7)$$

В соответствии с полученными выражениями критериев качества (4) и (7) подмножество антигенов тождественно выражению, включающему параметры PI-регуляторов (3), $(P_i, I_i, i = \overline{1, n})$:

$$Ag = f(P_i, I_i, u_i, P_i, I_i, i = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Формально алгоритм клональной селекции можно представить в виде [10]:

$$\text{CLONALG} = (Ag, Ab, G, S, C, M, f, d, t),$$

где Ag – подмножество антигенов;

Ab – популяция антител;

G – представление пространства;

S – оператор селекции;

C – оператор клонирования;

M – оператор мутации;
 f – критерий качества;
 d – количество антител, подлежащих замене новыми;
 t – номер поколения.

На рис. 3 представлена схема алгоритма клональной селекции, AIS-CLONALG, который используется для синтеза сложной системы.

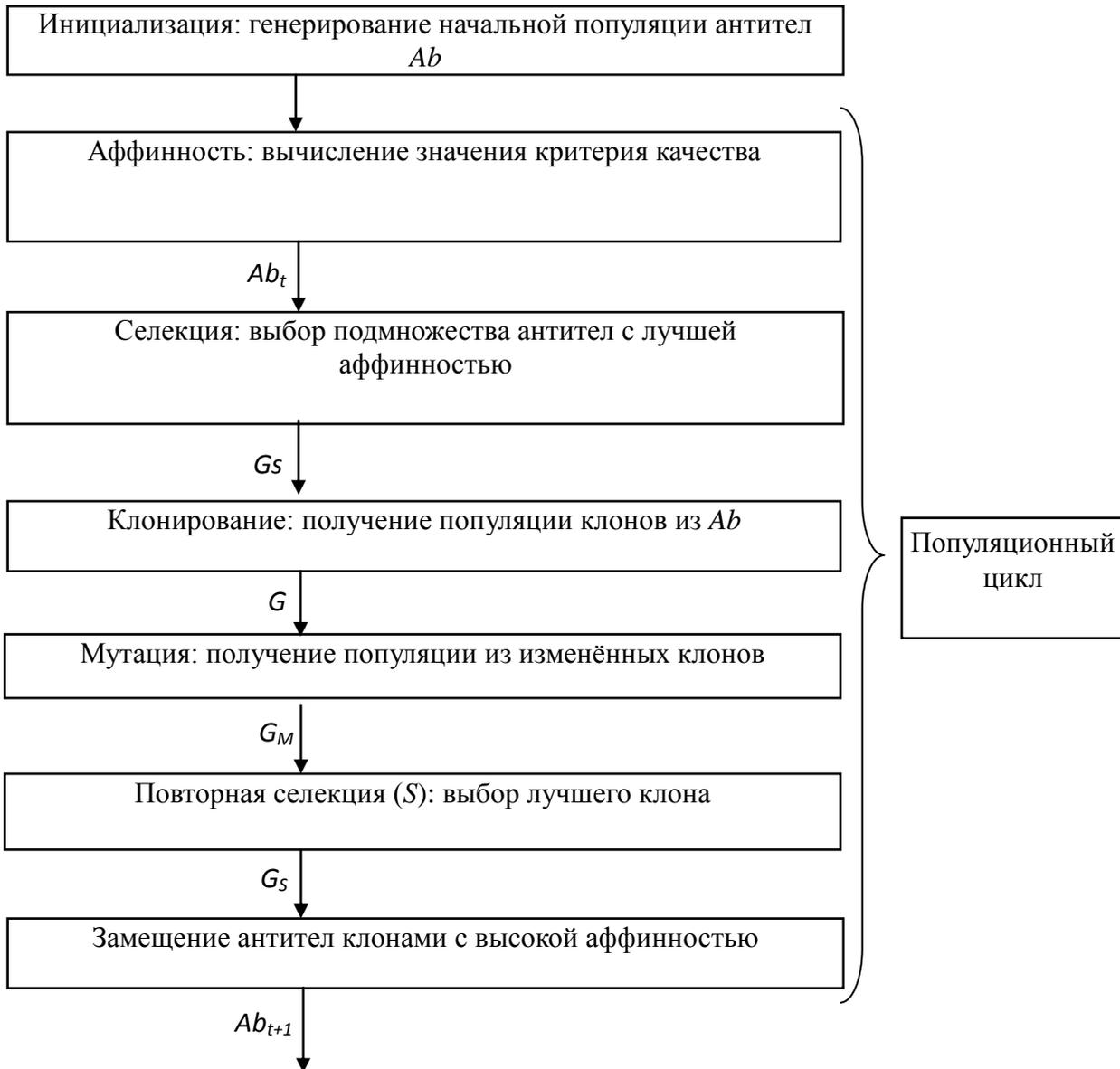


Рисунок 3 – Алгоритм клональной селекции для синтеза оптимального регулятора

В ходе определения глобального минимального значения оптимизационной задачи сложной системы управления и реализации алгоритма AIS-NSA выполнены следующие шаги алгоритма:

Шаг 1. Вероятностное формирование популяции.

Шаг 2. Вычисление аффинности каждого члена популяции с целевой функцией.

Шаг 3. Выбор членов популяции с наилучшими характеристиками (негативных).
Нахождение локальных минимумов.

Шаг 4. Проверка полученного решения на соответствие выражению (4).

Представленные шаги алгоритма обеспечивают решение задачи оптимального управления сложным объектом.

Заключение

В данной работе приведены результаты формирования теоретических основ построения алгоритмов решения задач оптимального управления сложными системами.

В частности, синтезированы оптимальные PI-регуляторы для подсистем сложной системы управления на основе алгоритма клональной селекции (CLONALG) искусственных иммунных систем (AIS). В результате реализации процедуры синтеза оптимального управления получены коэффициенты типовых PI-регуляторов изолированных подсистем. Среди шагов синтеза системы сформулирован этап реализации процедуры развязывания для решения задачи влияния взаимосвязей.

Исследования проводятся по гранту №AP09258508 КН МОН РК «Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы для промышленной автоматизации с использованием современной микропроцессорной техники» (2021-2023 гг.).

Литература

1. Бобиков А.И. Настройка весовых матриц ЗСУР регулятора с помощью биоинспирированных алгоритмов оптимизации // Вестник РГРТУ. – 2016. – №55. – С. 77– 83.
2. Bo X, Wen-Jing G. Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms. – Springer, 2014. – 469 p.
3. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ, 2017. – 446 с.
4. Кушнир Н.В., Кушнир А.В., Анацкая Е.В., Катышева П.А., Устинов. Искусственные иммунные системы: обзор и современное состояние // Научные труды КубГТУ. – 2015. – №12. – 10 с.
5. Wang J., Song N., Jiang E., Xu D., Deng W., Mao L. The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System. – Springer Singapore: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration, 2017. – P. 529– 536.
6. Ali M., Koh S.P., Chong K.H. Design a PID Controller of BLDC Motor by Using Hybrid Genetic-Immune // Modern Applied Science. – 2011. – Vol. 5. – No.1 – P. 74– 85.
7. Forrest S. Principles of a Computer Immune System // Proceedings of the Second New Security Paradigms Workshop. – 1997. – P. 75– 82.
8. Ayara M., Timmis J., Lemos R., Castro L., Duncan R. Negative Selection: How to Generate Detectors // UK: In: Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS). – 2002. – Vol.1. – P. 89– 98.

9. Marciniak J., Wawryn K. An Artificial Immune Negative Selection Algorithm to Control Water Temperature in the Outlet of the Chamber // Poland: International conference on signals and electronic systems (ICSES). – 2018. – P. 236– 241.
10. Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Реализация SMART-технологии построения оптимальных систем на основе модифицированных алгоритмов // – Харків: Вісник Національного технічного університету. – 2020. – № 1 (3). – С.41– 49.