

УДК 681.5

DOI: 10.20998/2411-0558.2020.01.04

**О. И. ШИРЯЕВА**, канд. техн. наук, доц., КазННТУ им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

**Т. И. САМИГУЛИН**, докторант, КазННТУ им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

## **РЕАЛИЗАЦИЯ SMART-ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ**

Разработана методология построения оптимальной системы управления с использованием модифицированных алгоритмов SMART-технологии. Синтезирована система оптимального управления с целью решения многокритериальной задачи ММО-системы на основе алгоритмов искусственной иммунной системы (AIS), и генетического алгоритма (GA). Ил.: 4. Библиогр.: 12 назв.

**Ключевые слова:** SMART-технологии; оптимальная система; модифицированный алгоритм; искусственная иммунная система (AIS); генетический алгоритм (GA).

### **Постановка проблемы и анализ литературы.**

Модифицированные алгоритмы для решения задач синтеза оптимальных систем в настоящее время дают лучшие результаты, чем традиционные методы настройки типовых регуляторов. В работе рассматривается модифицированный алгоритм, для которого используются механизмы и преимущества алгоритмов искусственной иммунной системы (AIS), и генетического алгоритма (GA).

Алгоритмы искусственных иммунных систем часто применяются для решения задач оптимизации и распознавания образов, напоминающие параллельный алгоритм с восхождением к вершине и генетический алгоритм без оператора кроссинговера [1]. В работах [2 – 4] результаты моделирования показывают, что алгоритмы иммунной системы для настройки ПИД-регуляторов оптимальных одномерных систем имеют высокую точность решения и скорость сходимости.

Например, алгоритм искусственной иммунной системы был применён для решения задач оптимизации управления скоростью сервопривода постоянного тока [5]. Контроллер ПИД-регулятора был настроен с использованием алгоритма AIS путем минимизации абсолютной ошибки по времени. Результаты сравнивались с результатами метода настройки Циглера-Николса, и было очевидно, что AIS дает лучшие результаты. Алгоритм AIS показал, что он способен находить глобальное оптимальное решение, и он дал решение лучше, чем

результат традиционных методов настройки с точки зрения времени переходного процесса, перегулирования, времени нарастания, динамической точности, интегральных оценок.

В свою очередь алгоритмы, объединяющие преимущества алгоритма AIS и алгоритма GA, являются более быстрыми и точными по сравнению с каждым отдельно: GA или AIS подходом [6 – 9]. В работе [8] автоматически настроенный ПИД-регулятор настраивается по закону иммунной обратной связи, основанной на нелинейном пропорциональном усилении, чтобы реализовать новый ПИД-регулятор. Интеграция алгоритмов GA и AIS, в соответствии с механизмом иммунной обратной связи, приводит к созданию надежного ПИД-регулятора, который в конечном итоге оценивается с помощью сценариев имитационного контроля, демонстрирующих быструю реакцию, хорошую робастность и удовлетворительные характеристики подавления помех.

**Цель статьи.** Разработать методологию построения оптимальной системы управления с использованием модифицированного алгоритма SMART-технологии, включающего механизмы и преимущества алгоритмов искусственной иммунной системы, и генетического алгоритма, для ММО-системы, на примере двумерной системы.

**Синтез ПИ-регулятора двумерной системы оптимального управления.**

Пусть  $G_{11}(s), G_{12}(s), G_{21}(s), G_{22}(s)$  – передаточные функции объекта, связывающие входы и выходы двумерной системы [10]:

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $G_{11} = \frac{k_1}{Ts+1}$ ,  $G_{22} = \frac{k_2}{Ts+1}$  – передаточные функции изолированных подсистем;  $G_{12}, G_{21}$  – передаточные функции взаимосвязей между подсистемами.

**Постановка задачи.** Для двумерной системы управления (1) необходимо синтезировать регулятор на основе алгоритмов AIS и GA с целью наискорейшего достижения желаемых режимов.

Для решения поставленной задачи, в связи с наличием взаимосвязей в системе (1), необходимо реализовать следующие методологические шаги:

- 1) выбрать критерии качества для выходных сигналов  $y_1, y_2$  подсистем с целью решения задачи стабилизации;
- 2) выбрать законы типовых регуляторов для решения задачи стабилизации выходных сигналов;
- 3) решить задачу синтеза типовых регуляторов для изолированных подсистем без взаимосвязей на основе модифицированного алгоритма;
- 4) для сложной системы с взаимосвязями, с включёнными регуляторами в подсистемах, реализовать процедуру развязывания, чтобы компенсировать влияние взаимосвязей на выходные сигналы.

Для изолированных подсистем (1) необходимо рассчитать параметры PI-регуляторов:

$$C_{PI1}(s) = P_1 + I_1 \frac{1}{s} = x_1 + x_2 \frac{1}{s}; \quad C_{PI2}(s) = P_2 + I_1 \frac{1}{s} = x_3 + x_4 \frac{1}{s}.$$

Выберем для определения регуляторов один из алгоритмов AIS [10]. В качестве критериев качества – интегральные квадратичные критерии, обеспечивающие решение задачи стабилизации:

$$ISE_i = \int_{t=0}^{\infty} e_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1,2}. \quad (2)$$

где  $e_i(t)$  – ошибки рассогласования между желаемыми и выходными сигналами  $y_1, y_2$  для рассматриваемых подсистем.

Для расчёта PI-регулятора на основе алгоритма AIS используем процедуру вычисления интегральной квадратичной оценки, в результате которой можно получить критерии качества (2) в следующем виде [10]:

$$ISE = \frac{1}{2a_n^2 \Delta} (B_m \Delta_m + B_{m-1} \Delta_{m-1} + \dots + B_0 \Delta_0) - \frac{b_m b_{m-1}}{a_n^2}, \quad (3)$$

где коэффициенты  $a_n, b_m, b_{m-1}$  находятся из передаточных функций замкнутых подсистем системы (1).

Окончательная формула критерия качества для первой изолированной подсистемы (1),  $G_{11}$ , имеет вид:

$$I_1 = \frac{(1 + k_1 \cdot x_1)^2 + k_1 \cdot x_2 \cdot T + (k_1 \cdot x_1)^2}{2 \cdot (k_1 \cdot x_2 \cdot (1 + k_1 \cdot x_1))} - \frac{x_1}{x_2}. \quad (4)$$

Интегральная квадратичная оценка для второй подсистемы,  $G_{22}$ , определяется выражением:

$$I_2 = \frac{(1 + k_2 \cdot x_3)^2 + 0.0072 \cdot x_4 \cdot T + (k_2 \cdot x_3)^2}{2 \cdot (k_2 \cdot x_4 \cdot (1 + k_2 \cdot x_3))} - \frac{x_3}{x_4}. \quad (5)$$

Постановка задачі сводиться к оптимізації критерієв якості (4) и (5) с использованием модифіцированного алгоритма AIS.

Модифікація заключається в том, что для формирования начальной популяції алгоритма AIS используется генетический алгоритм GA, который имеет лучшие характеристики, чем традиционные алгоритмы настройки ПИ-регуляторов [11]. Для получения параметров регуляторов используется алгоритм, представленный на рис. 1.

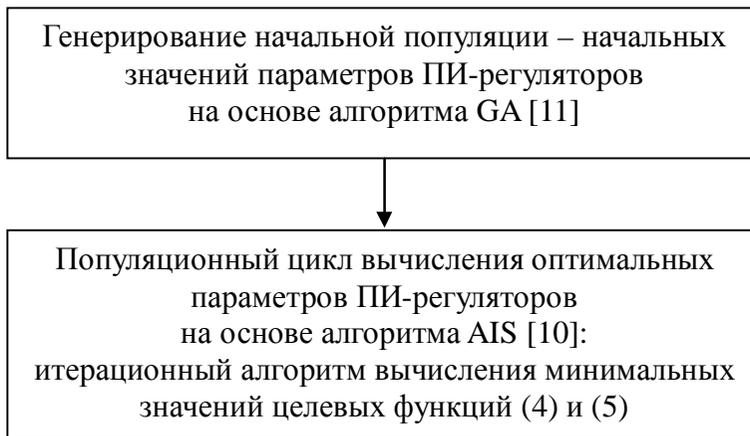


Рис. 1. Работа модифицированного алгоритма

В результате реализации модифицированного алгоритма AIS для синтеза изолированных подсистем [10]:  $G_{11} = \frac{0.0042}{1.9588s+1}$ ,  $G_{22} = \frac{0.0072}{1.9588s+1}$ , выражения для регуляторов (4) и (5):

$$C_{PI1}(s) = 19.54 + 48.12 \frac{1}{s}; \quad C_{PI2}(s) = 22.73 + 23.86 \frac{1}{s}. \quad (6)$$

Результаты моделирования изолированных подсистем с PI-регуляторами представлены на рис. 2.

При моделировании системы управления (1) с взаимосвязями,  $G_{12} = \frac{-0.0062}{1.9588s+1}$ ,  $G_{21} = \frac{-0.0052}{1.9588s+1}$ , можно сделать вывод, что взаимосвязи влияют на выходные сигналы системы, с включёнными в контур регуляторами (рис. 3).

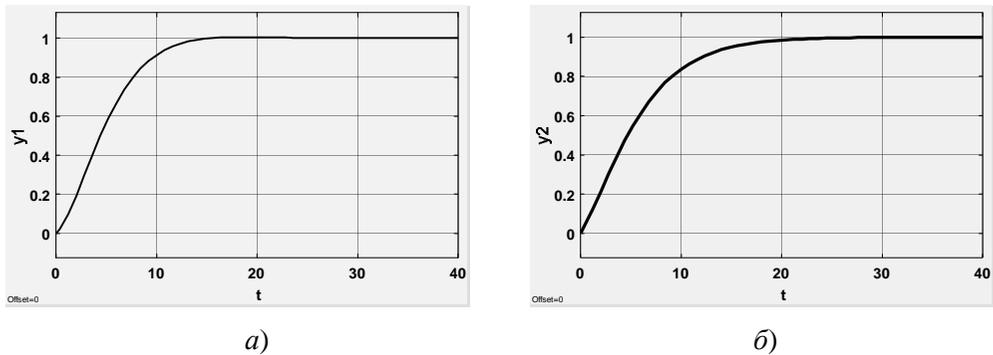


Рис. 2. Результаты моделирования изолированных подсистем с регуляторами

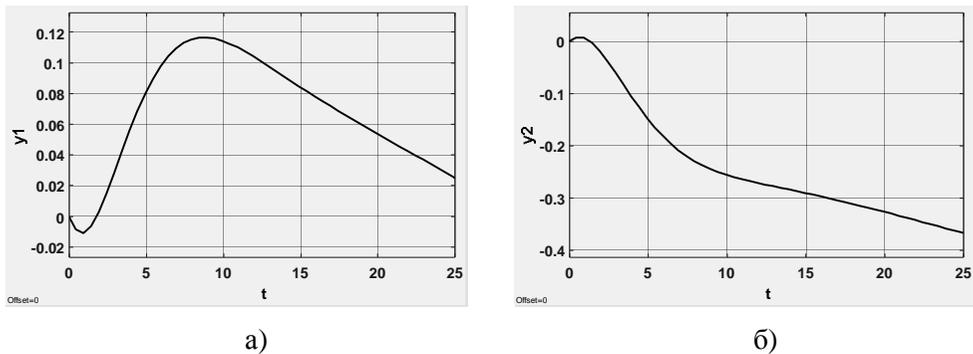


Рис. 3. Результаты моделирования сложной системы с взаимосвязями

Для того чтобы обеспечить двумерной системе с синтезированными регуляторами желаемую динамику применим процедуру развязывания. Основная идея данной процедуры заключается в применении дополнительных контроллеров для компенсации влияния взаимосвязей, с целью уменьшения их взаимодействия в контуре управления [12].

В идеале развязывающее управление позволяет влиять только на желаемые регулируемые переменные. Динамически развязанные подсистемы – система, у которой каждый выход зависит от одного и только одного входа. Если все перекрестные функции передачи равны нулю или пренебрежимо малы, многоконтурная система вырождается в набор независимых (развязанных) однопетлевых систем.

Задача развязывания была решена авторами в работе [12]. Такая система представляется в виде нескольких независимых подсистем, которые могут управляться с помощью одномерных методов и управление производится по двум независимым контурам.

Для системы (1) с регуляторами (4), (5) развязывающая матрица состоит из элементов:

$$H_1 = -35; \quad H_2 = -45. \quad (7)$$

Результаты моделирования сложной системы управления процессами в дистилляционной колонне с взаимосвязями (1), ПИ-регуляторами и развязывающими коэффициентами, показана на рис. 4.

Блоки развязки-усиления: "Decoupling-Gain", являются элементами контроллера развязки. При полной развязке многомерная система разделяется таким образом, что в системах управления нет взаимодействий [12]. По результатам моделирования (рис. 4) можно сделать вывод о том, что процедура развязывания обеспечивает сложной системе с синтезированными регуляторами желаемую динамику.

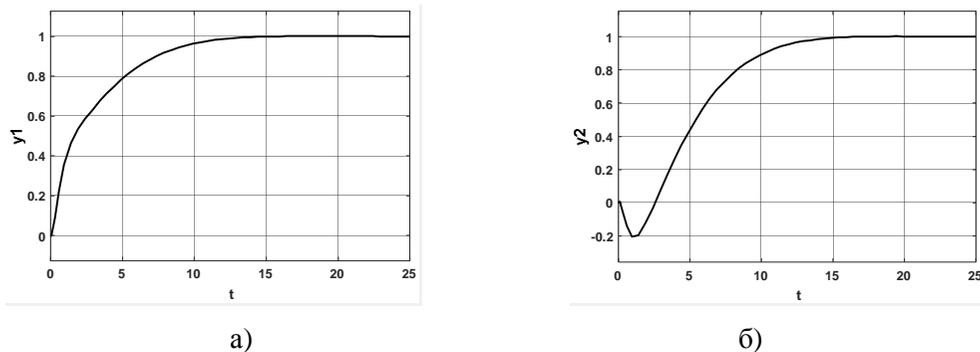


Рис. 4. Результаты моделирования сложной системы

Данный этап развязывания является основной процедурой при применении модифицированного алгоритма AIS для решения задачи синтеза оптимального управления двумерной системой.

**Выводы.** В соответствии с полученными результатами можно сделать выводы о применимости алгоритмов SMART-технологий, в частности модифицированного алгоритма AIS, для решения задачи синтеза оптимальных ПИ-регуляторов двумерной системы. В качестве алгоритма формирования начальных значений ПИ-регуляторов рекомендуется использовать генетический алгоритм GA, который имеет лучшие характеристики, чем традиционные алгоритмы настройки ПИ-регуляторов. Для решения проблемы влияния взаимосвязей на выходные сигналы, реализована процедура развязывания для двумерной системы. Результаты моделирования позволяют сделать вывод об эффективности использования методологии модифицированного AIS.

Работа выполнена по гранту КН МОН РК по теме: "Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления

сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта" № AP05130018 (2018-2020 гг.).

**Список литературы:**

1. *Литвиненко В.И.* Метод индуктивного синтеза РБФ нейронных сетей с помощью алгоритма клонального отбора / *В.И. Литвиненко.* – Индуктивне моделювання складних систем, 2012. – Випуск 4. – С. 114-127.
2. *Heder S.B.* Artificial Immune Systems for Optimization / *S.B. Heder, J.C. Helio.* – Springer: Nature-Inspired Algorithms for Optimisation. Studies in Computational Intelligence book series, 2009. – Vol. 193. – P. 389-411.
3. *Sahraoui M.* Application of artificial immune algorithm-based optimisation in tuning a PID controller for nonlinear systems / *M. Sahraoui, K.M. Fayçal, S. Mohammed.* – Int. J. Automation and Control, 2015. – Vol. 9. – No. 3. – P. 186-200.
4. *Wang M.* An Artificial Immune System Algorithm with Social Learning and Its Application in Industrial PID Controller Design / *M. Wang, S. Feng, Ch. He, Zh. Li, Yu. Xue.* – Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2017. – 13 p.
5. *Saleh M.H.* Artificial Immune System based PID Tuning for DC Servo Speed Control / *M.H. Saleh, S.Z. Saad.* – International Journal of Computer Applications, 2016. – Vol. 155. – No. 2. – P. 23-26.
6. *Ali M.O.* Chong Design a PID Controller of BLDC Motor by Using Hybrid Genetic-Immune Mohammed / *M.O. Ali, S.P. Kohl, K.H. Chong.* – Modern Applied Science, 2011. – Vol. 5. – No. 1.
7. *Цзя Лу.* Иммуная сеть с генетическим алгоритмом настройки для ПИД-управления / *Лу Цзя, Л.А. Станкевич.* – Телекоммуникационные системы и компьютерные сети, 2009. – № 4. – С. 27-36.
8. *Mohammed O.A.* Design a PID Controller of BLDC Motor by using Genetic-Immune / *O.A. Mohammed, S.P. Koh, K.H. Chong.* – Modern Applied Science, 2011. – Vol. 5. – №1.
9. *Khoie M.* PID Controller Tuning using multi-objective optimization based on fused genetic-immune algorithm and immune feedback mechanism / *M. Khoie, K. Salahshoor, N. Ehsan, A.K. Sedigh.* – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – P. 267-276.
10. *Ширяева О.И.* Разработка искусственной иммунной системы управления многомерным объектом нефтегазовой отрасли / *О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин.* – Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование, 2019. – № 13 (1338). – P. 155-165.
11. *Ширяева О.И.* Разработка Smart-системы управления сложным технологическим процессом нефтегазовой отрасли с применением биоинспирированных алгоритмов / *О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин.* – Вестник КБТУ, 2019. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 164-171.
12. *Ширяева О.И.* Разработка SMART-системы управления сложным объектом нефтегазовой отрасли с использованием процедуры развязывания / *О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин.* – Алматы: Вестник КазНУТУ, 2017. – № 5. – С. 50-55.

**References:**

1. Litvinenko, V. I. (2012), "Method of inductive synthesis of RBF neural networks using the clonal selection algorithm", *Inductive modeling of folding systems*, Vol. 4, pp. 114-127.
2. Heder, S.B., and Helio, J.C. (2009), "Artificial Immune Systems for Optimization", *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*, Vol. 193, pp. 389-411.
3. Sahraoui, M., Fayçal, K.M., and Mohammed, S. (2015), "Application of artificial immune algorithm-based optimisation in tuning a PID controller for nonlinear systems", *International Journal Automation and Control*, vol. 9, No. 3, pp. 186-200.

4. Wang, M., Feng, S., He, Ch., Li, Zh., and Xue, Yu. (2017). "An Artificial Immune System Algorithm with Social Learning and Its Application in Industrial PID Controller Design", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2017, 13 p.
5. Saleh, M.H., and Saad, S.Z. (2016), "Artificial Immune System based PID Tuning for DC Servo Speed Control", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 155, No. 2, pp. 23-26.
6. Ali, M.O., Kohl, S.P., and Chong, K. H. (2011), "Design a PID Controller of BLDC Motor by Using Hybrid Genetic-Immune Mohammed", *Modern Applied Science*, Vol. 5, No. 1.
7. Jia, Lu, and Stankevich, L.A. (2009), "Immune network with a genetic tuning algorithm for PID control", *Telecommunication systems and computer networks*, No. 4, pp. 27-36.
8. Mohammed O.A., Koh S.P., Chong K.H. (2011), "Design a PID Controller of BLDC Motor by using Genetic-Immune", *Modern Applied Science*, Vol. 5, No. 1.
9. Khoie, M., Salahshoor, K., Nouri, Ehsan, and Sedigh, A.K. (2012), "PID Controller Tuning using multi-objective optimization based on fused genetic-immune algorithm and immune feedback mechanism", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 267-276.
10. Shiryayeva, O.I., and Samigulin, T.I. (2019), "Development of an artificial immune control system for a multidimensional oil and gas industry", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Informatics and Modeling*, No. 13 (1338), pp. 155-165.
11. Shiryayeva, O.I., and Samigulin, T.I. (2019), "Development of a Smart-control system for a complex technological process of the oil and gas industry using bio-inspired algorithms", *Bulletin of KBTU*, T. 16, Vol. 4, pp. 164-171.
12. Shiryayeva, O.I., and Samigulin, T.I. (2017), "Development of a SMART-control system for a complex oil and gas industry using the decoupling procedure", *Vestnik KazNITU*, No. 5, pp. 50-55.

*Статью представил д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" С.Ю. Леонов.*

*Поступила (received) 6.03.2020*

Shiryayeva Olga, Cand.Sci.Tech, Associate Professor  
Satbayev Kazakh National Research Technical University  
Str. Satpayev, 22 A, Almaty, Kazakhstan, 050013  
Tel: +8(727)2929952, e-mail: o.shiryayeva@satbayev.university  
ORCID ID: 0000-0003-2532-0636

Samigulin Timur, doctoral student  
Satbayev Kazakh National Research Technical University  
Str. Satpayev, 22 A, Almaty, Kazakhstan, 050013  
Tel:+8(727)2929952, e-mail: timur.samigulin@yandex.kz  
ORCID ID: 0000-0001-9963-6719

УДК 681.5

**Реалізація SMART-технології побудови оптимальних систем на основі модифікованих алгоритмів / Ширяєва О.І., Самігулін Т.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1 (3). – С. 41 – 49.**

Розроблено методологію побудови оптимальної системи управління з використанням модифікованих алгоритмів SMART-технології. Синтезована система оптимального управління з метою вирішення багатокритеріальної задачі МІМО-системи на основі алгоритмів штучної імунної системи (AIS) і генетичного алгоритму (GA). Ил.: 4. Бібліогр.: 12 назв.

**Ключеві слова:** SMART-технології; оптимальна система; модифікований алгоритм; штучна імунна система (AIS); генетичний алгоритм (GA).

УДК 681.5

**Реализация SMART-технологии построения оптимальных систем на основе модифицированных алгоритмов / Ширяева О.И., Самигулин Т.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2020. – № 1 (3). – С. 41 – 49.**

Разработана методология построения оптимальной системы управления с использованием модифицированных алгоритмов SMART-технологии. Синтезирована система оптимального управления с целью решения многокритериальной задачи МІМО-системы на основе алгоритмов искусственной иммунной системы (AIS) и генетического алгоритма (GA). Ил.: 4. Библиогр.: 12 назв.

**Ключевые слова:** SMART-технологии; оптимальная система; модифицированный алгоритм; искусственная иммунная система (AIS); генетический алгоритм (GA).

UDC 681.5

**Implementation of SMART-technology for designing optimal systems based on modified algorithms / Shiryayeva O.I., Samigulin T.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 1 (3). – P. 41 – 49.**

A methodology for constructing an optimal control system using modified algorithms of SMART technology has been developed. An optimal control system was synthesized in order to solve the multicriteria problem of the MIMO system based on artificial immune system (AIS) algorithms and the genetic algorithm (GA). Figs.: 4. Refs.: 12 titles.

**Keywords:** SMART technology; optimal system; modified algorithm; artificial immune system (AIS); genetic algorithm (GA).