

УДК 004.89

Г.А. Самигулина<sup>1</sup>, З.И. Самигулина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК

<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет, г.Алматы, Казахстан

E-mail: [kz.galinasamigulina@gmail.com](mailto:kz.galinasamigulina@gmail.com), [samigulinaresearch@gmail.com](mailto:samigulinaresearch@gmail.com)

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Осуществлён аналитический обзор разработанных современных приложений на основе перспективного биоинспирированного направления искусственных иммунных систем для интеллектуального управления сложными объектами за последние пять лет. Показана актуальность и возможности развития данного подхода искусственного интеллекта для решения задачи по интеллектуализации промышленного сектора и успешного осуществления концепции индустриальной модернизации «Индустрия 4.0». Рассматриваются особенности и трудности, возникающие при разработке данных систем, а также возможные пути их реализации. Особая роль отведена изучению модифицированных алгоритмов искусственных иммунных систем, которые позволяют объединить достоинства различных подходов и существенно нивелировать их недостатки при совместном использовании. Полученные результаты будут применяться при разработке унифицированной искусственной иммунной системы, позволяющей наиболее эффективно формировать иммунный ответ для различных по характеру и размеру данных.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы управления, сложные объекты, информационная технология, искусственные иммунные системы, модифицированные алгоритмы, промышленное оборудование, современная микропроцессорная техника.

### Введение

Широкое использование полученных результатов в области искусственного интеллекта (ИИ) и активное внедрение их в автоматизацию современного производства открывает большие возможности по созданию интеллектуальных систем прогнозирования и управления нового поколения, увеличивает производительность предприятия, а также существенно повышает безопасность на производстве при реализации концепции четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» [1]. Одним из основных трендов этой программы является широкомасштабное внедрение киберфизических систем в промышленное производство [2], способных самонастраиваться и самообучаться в режиме реального времени с целью оптимизации процессов управления.

В настоящее время на промышленных объектах повсеместно применяются распределённые системы управления (например, Experion PKS фирмы Honeywell), которые способны осуществлять мониторинг и управлять сложными технологическими процессами в режиме реального времени, а также собирать и обрабатывать производственные данные для оптимизации производства и предотвращения аварийных сценариев. Проблема заключается в том, что огромный объём текущей информации о функционировании технологического процесса (показания с различных датчиков, устройств и т.д.) не успевает обрабатываться в режиме реального времени, поэтому очень актуальна разработка инновационных технологий искусственного интеллекта для прогнозирования и управления сложными объектами [3].

Современные промышленные предприятия состоят из сложного дорогостоящего оборудования и технологических средств, оснащённых высокопроизводительной микропроцессорной техникой (например, фирм производителей Schneider Electric, Siemens и Honeywell), связанных с распределёнными системами управления [4]. Поэтому еще одной важной проблемой является разработка эффективной технологии диагностики промышленного оборудования, которая способна выявлять текущие неисправности, прогнозировать отказы оборудования и оценивать степень опасности выхода из строя оборудования для всего производства [5].

Большое распространение в последнее время получили метаэвристические подходы ИИ, основанные на моделировании биологических прототипов. Наиболее развитыми являются нейронные сети [6], генетические алгоритмы [7], алгоритмы роевого интеллекта [8], искусственные иммунные системы [9] и др. В последнее время искусственные иммунные системы представляют особый интерес, так как обладают рядом достоинств: памятью, способностью к обучению и адаптации, могут принимать решение в незнакомой ситуации, успешно решать задачи распознавания образов и прогнозирования.

### **1. Постановка задачи**

Постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо проанализировать современное состояние и определить дальнейшие перспективы развития биоинспирированного подхода искусственных иммунных систем (AIS, Artificial Immune System), а также различных модифицированных алгоритмов AIS для интеллектуального управления сложными объектами с использованием современной микропроцессорной техники ведущих фирм производителей промышленного оборудования с целью успешного выполнения программы «Индустрия 4.0» по интеллектуализации промышленности.

### **2. Инженерные приложения на основе алгоритмов AIS**

Применение современных подходов искусственного интеллекта является очень перспективным для решения сложных технических проблем по управлению современным высокотехнологичным и наукоёмким производством. Подход искусственных иммунных систем является биологическим направлением искусственного интеллекта, которое основано на принципах работы иммунной системы человека. Современные AIS реализуют различные механизмы функционирования иммунитета, но наиболее распространёнными являются: молекулярное узнавание, клональный отбор и негативная селекция [10,11].

Глубокое изучение и осмысление основных принципов обработки информации молекулами белков в биологическом прототипе иммунной системы человека и построение на их основе новых оригинальных моделей AIS способны привести к прорывным результатам при разработке интеллектуальных систем управления сложными объектами, функционирующими в режиме реального времени.

На основе данного подхода разработано много различных приложений для решения проблем машинного обучения, кластеризации, распознавания образов, прогнозирования, диагностики и т.д. Уникальные адаптивные свойства иммунной системы [12] вдохновляют на создание высокоэффективных алгоритмов AIS, которые составляют серьёзную конкуренцию другим интеллектуальным подходам и при определённых условиях показывают лучший результат.

Например, в работе [13] рассматриваются проблемы удалённых промышленных объектов нефтегазового сектора и разработки прогностических и диагностических подходов на основе искусственных иммунных систем с мультиагентной архитектурой для технического обслуживания оборудования. Рассматриваются такие свойства AIS, как самообучение на предыдущем опыте и самовосстановление. Приводится сравнение разработанной гибридной системы прогнозирования и диагностики для различных условий эксплуатации. Исследования [14] посвящены области робототехники и отказоустойчивого управления исполнительных механизмов в опасных средах с использованием генетических алгоритмов и AIS. Анализируются основополагающие принципы функционирования и адаптивные свойства искусственных иммунных систем, а также рассматриваются возможности диагностики и безопасной работы приводов на основе компенсирующих контроллеров в реальном времени. В работе [15] предлагается использование искусственного иммунного алгоритма для решения задачи планирования работы промышленных роботов. Представлена интеллектуальная модель планирования с целью оптимального распределения ресурсов, которая позволяет скоординировать работу роботов в различных подразделениях. Модель позволяет сократить производственные расходы и равномерно распределять нагрузку между роботами. Программная реализация осуществляется в MATLAB. Результаты моделирования показали высокий результат и перспективность использования данного подхода.

Статья [16] посвящена вопросам создания киберфизической системы для распределённой диагностики на современных производственных предприятиях с использованием биовдохновлённых алгоритмов AIS с возможностью обучения. Предложенная многоагентная архитектура и полученные результаты исследований доказывают устойчивость парадигмы разработанной AIS для распределённой диагностики.

В исследовании [17] рассматривается несколько подходов AIS для проблем обнаружения и устранения неисправностей на основе алгоритмов отрицательного отбора. Приводится анализ и оценка трёх методов для различных условий обнаружения неисправностей.

Работа [18] рассматривает решение сложной проблемы диагностики неисправностей асинхронных двигателей, и в частности излома стержня ротора с использованием алгоритма AIS на основе клональной селекции. Проведён анализ существующих методов и описаны их недостатки, связанные с большими объёмами вычислений. В результате проведённых исследований был предложен новый метод выделения информативных признаков и оптимизации детекторов для различных состояний ротора асинхронного двигателя, а также разработано программное обеспечение для онлайн-диагностики. Тестирование показало хороший результат и возможность использования данного подхода на производстве.

В статье [19] предлагается новый подход для мониторинга и прогнозирования состояния сложных электромеханических систем с целью выявления аварийных ситуаций и обеспечения безопасной и надёжной работы. При построении модели идентификации рабочих параметров системы для определения аномальных характеристик используется искусственная иммунная система и инкрементное обучение (incremental learning) с целью наблюдения за динамическими изменениями шаблонов в реальном времени и адаптивных

обновлений. Достоинством данного подхода является отсутствие необходимости переобучения для обновления идентификационной модели.

### **3. Модифицированные алгоритмы AIS**

В связи с тем, что до сих пор нет универсальных алгоритмов AIS, способных высокоэффективно обрабатывать разнородную информацию, возникает необходимость разработки модифицированных алгоритмов AIS для решения определённых задач с учётом особенностей и условий их выполнения. Появление множества таких модифицированных алгоритмов, созданных на основе базовых алгоритмов, требует систематизации и детального изучения данной области для развития теоретических основ AIS и перехода на более высокий уровень при создании приложений.

Модифицированные алгоритмы AIS широко используются для оптимизационных задач. Например, исследования [20] посвящены разработке инженерного приложения с использованием нового модифицированного алгоритма иммунной клональной системы. Решается оптимизационная задача для конструкции зубчатого привода. Сравнительный анализ с существующим дизайном показал значительное превосходство нового оптимизационного решения.

В работе [21] предложен улучшенный алгоритм отрицательного отбора с применением специализированных детекторов, который предназначен для обнаружения неисправностей технических процессов и систем. Данный модифицированный алгоритм менее специфичен и может быть использован при неограниченных типах неисправностей.

Специализированные детекторы не нуждаются в предварительных сведениях о типах неисправностей. При тестировании алгоритма на трёх наборах данных показано, что в отличие от базового алгоритма отрицательного отбора и ряда распространённых алгоритмов машинного обучения точность рассматриваемого метода выше в условиях ограниченного времени (онлайн-режим). В статье [22] рассматривается интеллектуальная модель анализа данных для поиска аномалий с использованием улучшенного алгоритма отрицательного отбора NSA и алгоритма классификации. При моделировании разработанный метод продемонстрировал преимущества улучшенного алгоритма.

В исследованиях [23] разработан алгоритм искусственных иммунных систем с механизмом социального обучения (AIS-AL). Антитела разделяются на два ряда: элитарный ES и общий CS. Соответственно антитела тоже будут двух видов, и в операторе мутации элитарные ES – антитела самообучаются, а общие CS – антитела осуществляют два вида социального обучения (стохастическое SSL и эвристическое HSL) для улучшения сходимости и увеличения точности решения. Оценка эффективности разработанного модифицированного алгоритма осуществлялась для промышленного приложения по настройке пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. Моделирование на тестовых функциях и сравнительный анализ с алгоритмами opt-aiNet, IA-AIS и AAIS-2S показал более высокую точность и скорость сходимости.

В исследованиях [24-26] разработаны и протестированы следующие модифицированные алгоритмы: RF-AIS<sub>G</sub> с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest) для выделения информативных дескрипторов и иммуносетевого алгоритма на основе гомологов (AIS<sub>G</sub>); GWO-AIS<sub>G</sub> на основе алгоритма оптимизации серых волков (Grey Wolf Optimization) и иммуносетевого алгоритма прогнозирования;

CPSOIW-AIS<sub>G</sub> с использованием кооперативного алгоритма роя частиц с весом инерции (Cooperative Particle Swarm Optimization with Inertia Weight) и алгоритма на основе искусственных иммунных сетей, FPA-AIS<sub>G</sub> с алгоритмом опыления цветов (Flower Polination Algorithm) и иммунносетевым алгоритмом. На примере реальных производственных данных с различных узлов технологической установки 300 по очистке газа от кислых компонентов нефтегазового предприятия «Тенгизшевройл» осуществлён сравнительный анализ эффективности применения разработанных модификаций AIS с другими известными алгоритмами AIS (алгоритмом клональной селекции CLONALG, алгоритмами распознавания искусственной иммунной системой AIRS1 и AIRS2, алгоритмом негативной селекции NSA, а также с наивным Байесовским алгоритмом NB, алгоритмом глубокого обучения DL, алгоритмом деревьев решений DT, алгоритмом случайного леса RF, методом опорных векторов SVM), который показал перспективность применения данного подхода.

Полученные результаты по анализу состояния и развитию подхода искусственных иммунных систем будут применяться при разработке унифицированной искусственной иммунной системы [27], позволяющей наиболее эффективно формировать иммунный ответ для различных по характеру и размеру данных.

#### ***Заключение***

Таким образом, проведённый аналитический обзор современных публикаций за последние пять лет по применению искусственных иммунных систем показал актуальность и перспективность развития данного направления по интеллектуализации современных промышленных предприятий для управления сложными объектами, прогнозирования и диагностики состояния оборудования, а также широкого применения в различных областях науки и техники.

#### ***Благодарности***

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. Gioacchino de Candia. Industry 4.0 and its aberrations. – 2019. – P. 1–14. DOI:10.13140/RG.2.2.36086.96323.
2. Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing / Ed. A. Arockiarajan, M. Duraiselvam, Ramesh Raju // Lecture Notes in Mechanical Engineering. –Springer Singapore, 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-4739-3.
3. Rieger C., Ray I., Zhu Q., Haney M. Industrial Control Systems Security and Resiliency. – Springer, 2019. – P.1–276. DOI: 10.1007/978-3-030-18214-4.
4. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Development of Smart technology for complex objects prediction and control on the basis of a distributed control system and an artificial immune systems approach // Advances in Science. Technology and Engineering Systems Journal. – 2019. – Vol. 4, №.3. – P. 75–87.
5. Mohapatra S., Khilar P.M., Swain R.R. Fault diagnosis in wireless sensor network using clonal selection principle and probabilistic neural network approach // International Journal of Communication Systems. – 2019. – № 32(12). DOI:10.1002/dac.4138.

6. T. Wang, H. Gao, J. Qiu. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. - 2016. - Vol. 27(2). - P. 416–425. DOI: 10.1109/TNNLS.2015.2411671.
7. Boonyopakorn P., Meesad P. The Evaluated Measurement of a Combined Genetic Algorithm and Artificial Immune System // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2017. – Vol. 7, №. 4. – P.2071–2084.
8. Карпенко А.П. Современные методы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – Москва: Изд-во МГТУ, 2017. – 446 с.
9. Sotiropoulos D., Tsihrintzis G. Artificial Immune Systems // *Machine Learning Paradigms. Intelligent systems reference library*. – Springer, 2017. – P. 159–235.
10. Bejoy B.J., Janakiraman S. Artificial Immune System based intrusion detection systems - comprehensive review // *International Journal of Computer Engineering & Technology*. – 2017. –Vol. 8, №. 1. – P. 85–95.
11. Mikherskii R.M., Mikherskii M.R. Analysis of the Use of Artificial Immune Systems // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1069. DOI:10.1088/1757-899X/1069/1/012025.
12. Woodland D. Plasticity in Adaptive Immunity // *Viral immunology*. – 2016. – Vol. 26, №.5. – P. 301.
13. Fasanotti L., Cavalieri S., Dovere E., Gaiardelli P., Pereira C. An artificial immune intelligent maintenance system for distributed industrial environments // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part 0: Journal of Risk and Reliability*. - 2018. – Vol. 232, №. 4. – P. 401–414. DOI: 10.1177/1748006X18769208.
14. Kidd R. Artificial Immune Systems: An Overview for Faulting Actuators // *Actuators*. – 2019. – Vol. 8(3). – P. 53. DOI: 10.3390/act8030053.
15. Suma T., Murugesan R. Artificial Immune Algorithm for Subtask Industrial Robot Scheduling in Cloud Manufacturing // *J. Phys.: Conf. Ser. National Conference on Mathematical Techniques and its Applications*. – 2018. – Vol.1000. DOI: 10.1088/1742-6596/1000/1/012096.
16. Rocha A. D., Lima-Monteiro, P., Parreira-Rocha, M., & Barata, J. Artificial immune systems based multi-agent architecture to perform distributed diagnosis // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30(4). – P. 2025–2037.
17. Silva G., Caminhas W., Palhares R. Artificial immune systems applied to fault detection and isolation: A brief review of immune response-based approaches and a case study // *Applied Soft Computing*. – 2017. – Vol. 57. – P. 118–131.
18. Aydin I., Karakose M., Karakose E., Akin E. A new fault diagnosis approach for induction motor using negative selection algorithm and its real-time implementation on FPGA // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. – 2018. – Vol. 34(1). – P. 689–701. DOI: 10.3233/JIFS-161964.
19. Wang Rongxi, Xu Gao, Jianmin Gao, Zhiyong Gao. An artificial immune and incremental learning inspired novel framework for performance pattern identification of complex electromechanical systems // *Science China Technological Sciences*. – 2020. – Vol. 63(1). – P.1–13. DOI: 10.1007/s11431-019-9532-5.
20. Padmanabhan S., Chandrasekaran M., Ganesan S., Khan M., Navakanth P. Optimal Solution for an Engineering Applications Using Modified Artificial Immune System // *Materials of Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – P. 1–5. DOI:10.1088/1757-899X/183/1/012025.
21. Abid A., Khan M.T., Haq I.U., Anwar S., Iqbal J. An Improved Negative Selection Algorithm-Based Fault Detection Method // *IETE Journal of Research*. – 2020. DOI: 10.1080/03772063.2020.1768158.

22. Mehare V., Thakur R.S. Data mining models for anomaly detection using artificial immune system / Eds: Tiwari B., Tiwari V., Das K., Mishra D., Bansal J // Proceedings of International Conference on Recent Advancement on Computer and Communication. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Singapore, 2018. – Vol. 34. –P.425–432. DOI: 10.1007/978-981-10-8198-9\_44.
23. Wang M., Feng S., He C., Li Z., Xue Y. An Artificial Immune System Algorithm with Social Learning and Its Application in Industrial PID Controller Design // Mathematical Problems in Engineering. – 2017. – Vol.3. – P.1–13. DOI: 10.1155/2017/3959474.
24. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Development of Smart-technologies for prediction and control of complex objects based on modified algorithms of artificial immune systems: Monograph. – Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2020. – 224 p.
25. Samigulina G.A., Samigulina Z.I. Modified immune network algorithm based on the Random Forest approach for the complex objects control // Artificial Intelligence Review. – 2019. –Vol.52. – P.2457–2473.
26. Samigulina G.A., Massimkanova Zh.A. Development of Modified Cooperative Particle Swarm Optimization with Inertia Weight for feature selection // Cogent Engineering. – 2020. –Vol. 7, №. 1. DOI: 10.1080/23311916.2020.1788876.
27. Самигулина Г.А., Самигулина З.И. Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2020. – Vol. 2(4). – С. 117–122.