

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ОБОРУДОВАНИЯ КОМПАНИИ HONEYWELL

САМИГУЛИН Т.И.^{1,3}, ШИРЯЕВА О.И.^{2,3}

¹Казахстанско-Британский технический университет

²Институт информационных и вычислительных технологий

³Satbayev University

Аннотация: В статье рассматривается вопрос оптимального управления сложным ММО объектом на основе современных методов роевого интеллекта. В качестве типового объекта управления выбрана дистилляционная колонна для процесса очистки газа, на базе которого реализуется интеллектуальное управление. Для решения задач оптимального синтеза промышленных регуляторов предлагается использовать метаэвристические алгоритмы на основе поведения стрекозы и оптимизации серого волка. В статье обосновывается перспективность внедрения разработанных методов для системы автоматического управления технологическим процессом в среде Experion PKS на базе оборудования компании Honeywell. Реализована стратегия управления интеллектуального ПИ-регулирования для программируемого логического контроллера С300, сконфигурирована станция управления и операторский экран, отображающий мнемосхему технологического процесса.

Ключевые слова: управление сложным ММО объектом, промышленные регуляторы, метаэвристические алгоритмы роевого интеллекта, алгоритм стрекозы, оптимизация серого волка

HONEUWELL КОМПАНИЯСЫНЫҢ ЖАБДЫҚТАРЫ ЖӘНЕ ҮЙІРЛІ ИНТЕЛЛЕКТІҢМЕТАЭВРИСТИКАЛЫҚАЛГОРИТМІНІҢНЕГІЗІНДЕГІКҮРДЕЛІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ОҢТАЙЛЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ЖАСАУ

Аңдатпа: Мақалада үйірлі интеллекттің заманауи әдістеріне негізделген күрделі ММО объектісін оңтайлы басқару мәселесі қарастырылады. Типтік басқару объектісі ретінде газды тазарту процесіне арналған дистилляциялық баған таңдалды, оның негізінде интеллектуалды басқару жүзеге асырылады. Өнеркәсіптік реттегіштердің оңтайлы синтездеу мәселелерін шешу үшін инеліктің мінез-құлқына және сұр қасқырды оңтайландыруға негізделген метаэвристикалық алгоритмдерді қолдану ұсынылады. Мақала Honeywell компаниясының жабдықтарына негізделген Experion PKS ортасында технологиялық процестерді автоматты басқару жүйесі үшін жасалған әдістерді енгізу перспективасын негіздейді. С300 бағдарламаланатын логикалық контроллері үшін интеллектуалды ПИ-реттегіш басқару стратегиясы жүзеге асырылды, технологиялық процестің мнемосхемасын бейнелейтін басқару станциясы мен оператор экраны конфигурацияланды.

Түйінді сөздер: ММО Smart-жүйе, күрделі нысандарды басқару, эволюциялық алгоритмдер, био-пайдаланылған алгоритмдер, ыдырау процедурасы, PI-реттегіші

DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL CONTROL SYSTEM FOR A COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESS BASED ON METAHEURISTIC ALGORITHMS OF SWARM INTELLIGENCE AND INDUSTRIAL EQUIPMENT OF THE HONEYWELL COMPANY

Abstract: The article discusses the issue of optimal control of a complex MIMO object based on modern methods of swarm intelligence. A distillation column for the gas purification process was chosen as a typical control object, which was implemented by intelligent control. It is proposed to use metaheuristic algorithms based on the behavior of a dragonfly and optimization of a grey wolf to solve the problem of optimal synthesis of industrial controllers. The article introduces the prospects for the implementation of the developed methods for an automatic process control system in the Experion PKS environment based on Honeywell equipment. The intelligent PI control strategy has been implemented for the C300 PLC, the control station and the operator screen has been configured for the technological process.

Key words: control of a complex MIMO object, industrial controllers, metaheuristic algorithms of swarm intelligence, Dragonfly algorithm, Grey wolf optimization

Введение

В настоящее время разработка и внедрение в промышленное производство искусственного интеллекта (ИИ) является первоочередной задачей для реализации программы «Индустриализация 4.0». Мировые лидеры по созданию распределённых систем управления и промышленного оборудования повсеместно внедряют результаты научных исследований в области ИИ в свои технологии. Перспективными направлениями являются системы анализа и прогнозирования больших данных, технологии цифровизации предприятий и разработка систем управления на основе биоинспирированных алгоритмов оптимизации [1].

Простота реализации, высокое быстродействие и производительность являются основными качествами ИИ по сравнению с классическими методами управления. Существует множество научных трудов, в которых обосновывается применение методов и алгоритмов искусственного интеллекта для решения оптимизационных задач [2], связанных с различными технологическими процессами, в том числе и нефтегазовой отрасли.

Предлагается следующая структура статьи: в разделе 2 рассматривается сложный объект управления – дистилляционная колонна; раздел 3 посвящён постановке задачи исследования; методы и алгоритмы ИИ представлены в разделе 4; результаты моде-

лирования и экспериментов приведены в разделе 5; раздел 6 посвящён реализации системы интеллектуального управления на оборудовании компании Honeywell и в заключении (раздел 7) представлены основные выводы по работе.

1. Технологический процесс очистки газа в дистилляционной колонне

В исследовании в качестве объекта управления выбрана дистилляционная колонна (ДК), представляющая собой многомерный и многосвязный (Multi Input Multi Output, MIMO) объект.

Сложность управления процессом характеризуется наличием перекрёстных связей в контурах управления, негативно влияющих на качество процесса.

Математическое описание ДК рассматривается в работах [3,4] и имеет следующий вид:

$$G(s) = \frac{1}{75s + 1} \begin{bmatrix} 87.8 & -86.4 \\ 108.2 & -109.6 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $G(s)$ – передаточная функция многомерного объекта управления, s – оператор Лапласа.

Предложенная L-V структура объекта (рис. 1) содержит две входные переменные: L – скорость потока рефлюксной жидкости, V – скорость потока пара с ребойлера.

Выходными сигналами являются концентрации дистиллята X_d и концентрации продуктов с нижней части колонны X_b .

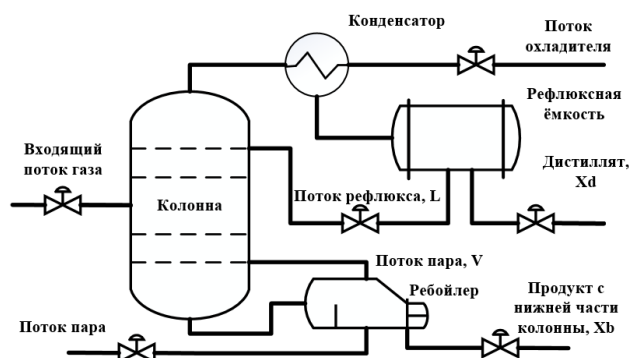


Рис. 1 – Технологическая схема дистилляционной колонны

Для стабилизации режимов работы выходных сигналов необходимо синтезировать два управляющих регулятора.

3. Постановка задачи

Целью исследования является разработка автоматизированной системы для оптимальной настройки промышленных ПИ-регуляторов на основе интеллектуального алгоритма стрекозы (Dragonfly algorithm, DA) и алгоритма оптимизации серого волка (Grey Wolf Optimization, GWO) для сложного многомерного объекта управления – дистилляционной колонны. Оптимальный подбор коэффициентов регулятора должен обеспечивать минимум интегрального квадратичного критерия качества по времени (Integral of time multiply squared error, ITSE) следующего вида:

$$I_{ITSE} = \int_{t=0}^n t(\hat{y}(t) - y(t))^2 dt, \quad (2)$$

где I_{ITSE} – критерий качества, $\hat{y}(t)$ – желаемое значение переменной, $y(t)$ – текущее значение, $t = \overline{0, n}$ – время моделирования.

В качестве структуры регулятора предлагается использовать ПИ-закон регулирования:

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_i e(t) dt, \quad (3)$$

где K_p , K_i – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющей регулятора, $e(t)$ – ошибка рассогласования между уставкой и показанием с датчиков, $u(t)$ – сигнал управления.

Далее нужно произвести сравнительный анализ алгоритмов DA и GWO и выбрать наилучшее решение, удовлетворяющее критерию качества (2). Синтезированные регуляторы необходимо реализовать на промышленном контроллере фирмы Honeywell.

4. Разработка оптимальной системы управления на основе метаэвристических алгоритмов роевого интеллекта

Для решения многопараметрической задачи поиска оптимальных коэффициентов регуляторов с наложенными ограничениями используются алгоритмы DA и GWO.

4.1. Оптимизация с помощью алгоритма DA

Алгоритм на основе поведенческой реакции стрекозы является одним из современных методов роевого интеллекта, в основе которого заложена особенность перемещения роя стрекоз при переселении большими группами и процесса охоты на мелких насекомых [5]. Во время охоты рой стрекоз разделяется на группы в определенном участке окружающей среды с целью поиска источников пищи. Выделяют пять манер поведения одиночной особи стрекозы [6].

Алгоритм DA имеет следующий вид:

1. Сепарация. Процесс отделения особи от роя.

$$s = - \sum_{i=1}^N X - X_i, \quad (4)$$

где N – количество окружающих особей, X – вектор расположения особи на текущей итерации, X_i – вектор расположения соседней особи на текущей итерации.

2. Выравнивание скорости движения стрекозы в рое:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i, \quad (5)$$

где V_i – скорость движения соседней особи на текущей итерации, A – стабилизация скорости движения особи на текущей итерации.

3. Совокупное движение роя стрекоз (Cohesion):

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i - X. \quad (6)$$

4. Передвижение i -ой стрекозы к найденному источнику пищи:

$$F_i = F_{loc} - X, \quad (7)$$

где F_{loc} – расположение источника пищи.

5. Защитная реакция i -ой особи от нападения хищников:

$$E_i = E_{loc} + X, \quad (8)$$

где E_{loc} – место расположения хищника.

Суммарный шаг корректирующего движения стрекозы для каждой итерации имеет вид:

$$\Delta X_{(t+1)} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + \omega X_t \quad (9)$$

где s, a, c, f, e, ω – весовые коэффициенты каждой составляющей.

Следующая позиция стрекозы в пространстве просчитывается при помощи формулы:

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (10)$$

Структурная схема алгоритма DA изображена на рис.2.

Алгоритм стрекозы подходит для решения бинарных и многокритериальных задач оптимизации, а также имеет высокую скорость сходимости [7]. Достоинствами являются устойчивость и простота реализации [8], что позволяет использовать алгоритм DA для различных приложений.

4.2. Оптимизация с помощью алгоритма GWO

В алгоритме оптимизации серого волка рассматривается поведение стаи волков во

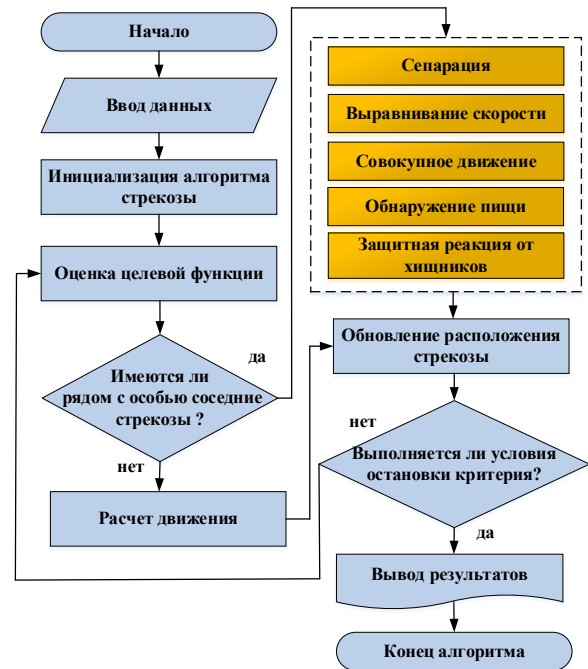


Рис. 2 – Структурная схема DA



Рис. 3 – Блок-схема алгоритма оптимизации серого волка

время охоты. Существует четыре типа волков: α – принимает решение об охоте и координирует движение других волков; β – выдвигается в роли помощника α при принятии решений; δ и ω подчиняются по иерархии вышестоящим типам волков [9]. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 3.

Стая волков сначала окружает добычу (что является оптимальным решением) и преследует её до тех пор, пока жертва не устанет, только потом волки атакуют. Таким образом, появляется возможность охотиться на больших особей.

Математическая модель алгоритма представлена ниже [10]:

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \times \vec{D}, \quad (11)$$

где $\vec{X}(t+1)$ – позиция волка на итерации $t+1$, \vec{X}_p – позиция волка на итерации t , \vec{A} – коэффициент уровня разведки, \vec{D} – дистанция между добычей и волком.

Дистанция высчитывается следующим образом:

$$\vec{D} = |\vec{C} \times \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)|, \quad (12)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \times \vec{r}_1 - \vec{a}, \quad (13)$$

$$\vec{C} = 2 \times \vec{r}_2, \quad (14)$$

где \vec{a} – параметр для определения уровня разведки, \vec{r}_1 и \vec{r}_2 – случайные элементы, генерируемые в области от 0 до 1.

Параметр a изменяется в зависимости от текущей итерации и определяется по формуле:

$$a = 2 - t \left(\frac{2}{T} \right), \quad (15)$$

где t – текущая итерация, T – максимальное количество итераций.

Основными преимуществами алгоритма оптимизации серого волка являются высокая скорость и точность поиска, по сравнению с алгоритмами роя частиц, стрекозы, метода гравитационного поиска, а также простота реализации [11].

5. Результаты моделирования и экспериментов

Осуществлено моделирование процесса очистки газа в дистилляционной колон-

не с интеллектуальными ПИ-регуляторами, настроенными с помощью алгоритмов DA и GWO (табл. 1).

Общие параметры настройки для алгоритмов оптимизации: количество поисковых переменных – 4, количество итераций – 100, нижние границы коэффициентов регулятора – 0,01, верхние границы – 30.

Начальные параметры для алгоритма стрекозы: максимальное количество итераций – 100, количество поисковых агентов – 25; для алгоритма серого волка количество агентов – 100.

Таблица 1 – Рассчитанные коэффициенты ПИ регуляторов

Алгоритм ИИ	Первый контур управления		Второй контур управления	
	K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}
DA	20,867	0,278	25,768	16,059
GWO	7,192	0,137	30,00	2,292

Для анализа динамики системы на входы каждого контура управления подано единичное ступенчатое воздействие $u(t) = 1$. Через 40 секунд моделирования повторно подается сигнал $u(t) = 1.5$. На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса очистки газа с учётом регуляторов, настроенных с помощью алгоритмов DA и GWO.

Процент перерегулирования для первого контура управления следующий: DA – 0.0025%, GWO – 2,8%. Для второго контура управления: DA – 28,6%, GWO – 9,6%.

Время установившегося переходного процесса для первого контура регулирования: DA – 36,06 секунд, GWO – 41,39 секунд. Для второго контура 33,5 и 27,87 секунды соответственно.

Результаты моделирования показали, что лучшим алгоритмом для настройки сложного многомерного объекта ДК при помощи ПИ-регуляторов для критерия ITSE является алгоритм GWO. Настроенные данным методом контроллеры имеют допустимый уровень перерегулирования и быстроедействие.

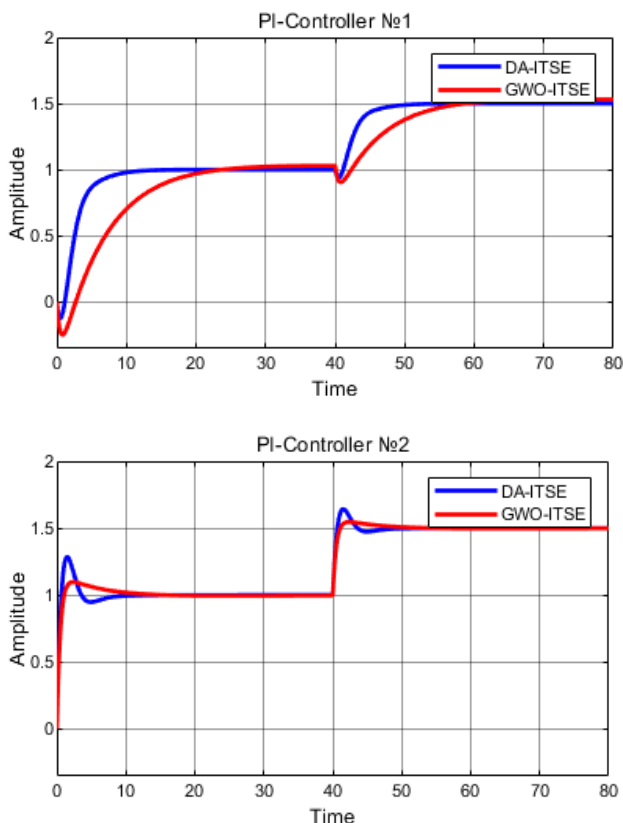


Рис. 4 – Моделирование переходных процессов ДК с интеллектуальными ПИ-регуляторами

6. Программная реализация на оборудовании компании Honeywell

Полученная оптимальная система управления сложным объектом ДК на основе интеллектуальных ПИ-регуляторов реализована с помощью программируемого логического контроллера Honeywell C300. Разработано программное обеспечение для распределённой системы управления Honeywell Experion PKS и создана мнемосхема технологического процесса ДК (рис. 5). Операторский дисплей позволяет в режиме реального времени следить за состоянием системы инженерам на флекс-станции управления.

Исследования выполнены в рамках проекта №AP09258508: «Разработка интеллектуальной технологии управления сложными объектами на основе унифицированной искусственной иммунной системы для промышленной автоматизации с использованием современной микропроцессорной техники».

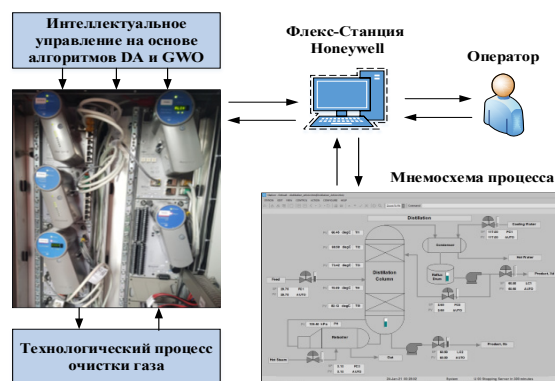


Рис. 5 – Структура системы управления, реализованной на промышленном оборудовании Honeywell для Experion PKS

Технической базой для реализации аппаратной части программного обеспечения и выполнения моделирования ДК является лаборатория «Honeywell» Казахстанско-Британского технического университета.

Заключение

В работе представлена автоматизированная система оптимальной настройки промышленных регуляторов на основе метаэвристических алгоритмов оптимизации DA и GWO. Синтезированы интеллектуальные ПИ-регуляторы для контуров управления дистилляционной колонны, эффективно минимизирующие критерий качества ITSE.

Таким образом, применение метаэвристических алгоритмов роевого интеллекта на современном промышленном оборудовании фирмы Honeywell открывает широкие перспективы по созданию высокоэффективных интеллектуальных распределённых систем управления сложными объектами нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Darwish A. Bio-inspired computing: algorithms review, deep analysis, and the scope of applications // *Future Computing and Informatics Journal*. – 2018. – Vol.3, №2. – P. 231-246.
2. Koroteev D., Tekic Z. Artificial intelligence in oil and gas upstream: trends, challenges, and scenarios for the future // *Energy and AI*. – 2021. – Vol. 3. – 10 p.
3. Skogestad S., Morari M. LV-control of a high-purity distillation column // *IFAC Proceeding Volumes*. – 1987. – Vol. 20, №5, - P. 387-396.
4. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. – 2005.
5. Zolghadr-Asli B., Bozorg-Haddad O., Chu X. Dragonfly Algorithm (DA) // *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms*. – Springer, Singapore. – 2017. – P. 151-159.
6. Magarja M., Heidari A., Faris H., Mirjalili S., Aljarah I. Dragonfly algorithm: Theory, Literature Review, and Application in Feature Selection // *Nature-Inspired Optimizers, Studies in Computational Intelligence*. – 2020. – Springer Nature, Switzerland AG.
7. Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems // *Neural Computing and Applications*. – Vol. 27, №4. – 2015. – P. 1053-1073.
8. Rahman C., Rashid T. Dragonfly algorithm and its applications in applied science-survey // *Computational Intelligence and Neuroscience*. – 2019. – 21 p.
9. Malik H., Srivastava S., Sood Y. R., Ahmad A. Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering // *Advances in intelligent systems and computing*. – Springer Nature Singapore. – Vol. 698. – 2019. – P. 501 – 507.
10. Mirjalili S., Dong J. Multi-objective Grey Wolf Optimizer // *Multi-Objective Optimization using Artificial Intelligence Techniques*. – Springer, Cham. – 2019. – P. 47-58.
11. Wang J., Li S. An Improved Grey Wolf Optimizer Based on Differential Evolution and Elimination Mechanism // *Scientific Reports*. – 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43546-3>