

УДК 004.89
МРНТИ 28.23.27

РАЗРАБОТКА SMART-СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОИНСПЕРИРОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ

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

¹Казахстанско-Британский технический университет

²Казахский Национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева

³Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК

Аннотация: Статья посвящена разработке алгоритма управления многомерным и многосвязным процессом очистки газа в дистилляционной колонне на основе алгоритма клональной селекции (CLONAG) и генетического алгоритма (GA). Произведен сравнительный анализ и выбор наилучшего критерия качества для реализации ПИ-регулирования изолированными подсистемами. В работе объясняется актуальность внедрения разработанной системы для задач управления сложными технологическими производствами нефтегазовой отрасли, а также перспективность применения процедур искусственного интеллекта при решении задач оптимизации многопараметрическими процессами.

Ключевые слова: Smart-система, управление сложными объектами, эволюционные алгоритмы, биоинспирированные алгоритмы, ПИ-регулирование

DEVELOPMENT OF SMART-SYSTEM OF MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESS OF OIL AND GAS INDUSTRY WITH APPLICATION OF BIO-INSPECTED ALGORITHMS

Abstract: The article is devoted to the development of a control algorithm for a multidimensional and multiply connected gas purification process in a distillation column based on clonal selection algorithm (CLONAG) and a genetic algorithm (GA) using the decoupling procedure. A comparative analysis and the selection of the best quality criterion for the implementation of PI control were made. The paper explains the relevance of the implementation of the developed system for the control of complex technological production in the oil and gas industry, as well as the prospect of using artificial intelligence procedures to solve optimization problems by multi-parameter processes.

Keywords: Smart-system, control of complex objects, evolutionary algorithms, decoupling procedure, PI control

БИО-ПАЙДАЛАНЫЛҒАН АЛГОРИТМДЕРДІ ҚОЛДАНУ МҰНАЙЫ ЖӘНЕ ГАЗ ӨНЕРКӘСІПТІҢ КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ТӘСІЛІН БАСҚАРУДЫҢ СМАРТ-ЖҮЙЕСІН ДАМЫТУ

Аңдатпа: Мақала ыдырау процедурасын қолдану арқылы клондық таңдау алгоритмі (CLONAG) және генетикалық алгоритм (GA) негізінде дистилляциялық бағандағы көпөлішемді қосылған газды тазарту процесін басқару алгоритмін жасауға арналған. Салыстырмалы талдау және PI регулятор енгізу үшін ең жақсы сапа критерийін таңдау жасалды. Мақала мұнай-газ саласындағы күрделі технологиялық өндірісті басқарудың дамыған жүйесін ендірудің өзектілігін, сондай-ақ көп параметрлі процестер

арқылы оңтайландыру мәселелерін жүзеге асыруда жасанды интеллектуалды процедураларды қолдану туралы жан-жақты түсіндіреді.

Түйінді сөздер: Smart-жүйе, күрделі нысандарды басқару, эволюциялық алгоритмдер, биопайдаланылған алгоритмдер, ыдырау процедурасы, PI-регулятор

1. Введение

В современном промышленном производстве для эффективного управления технологическими процессами актуально применение новых подходов, где широкое распространение получили методы искусственного интеллекта, такие как генетические алгоритмы, алгоритмы колонии муравьев, искусственных иммунных систем. Данные приложения позволяют решать задачи, связанные с оптимальным регулированием переменных технологического процесса, диагностикой и прогнозированием состояния промышленного оборудования, выполнять расчёты экстремальных задач. Основными преимуществами искусственного интеллекта являются высокая точность, быстрое действие и возможность решения сложных математических задач, обусловленных распределёнными параметрами в режиме реального времени.

В научном труде [1] генетические алгоритмы применяются для оптимизации профилактического обслуживания газовых турбин. Основной целью предлагаемого алгоритма является обеспечение баланса между затратами на техническое обслуживание газовой турбины Siemens SFT600 и затратами времени простоя при сохранении доступности системы на заранее определенном уровне. При этом общая стоимость обслуживания снижена более чем на 80%.

Исследование [2] рассматривает модифицированный генетический алгоритм с алгоритмом колонии муравьев (ACO) для задачи оптимизации метода попеременного нагнетания в нефтяную залежь воды и газа (WAG), являющийся сложной нелинейной проблемой, требующей большое количество вычислительных расчётов и времени. Комбинация GA с ACO показала себя эффективной для задачи WAG, повышающей конечный объем нефтедобычи.

В работе [3] представлен новый подход к задаче оптимального размещения скважин на нефтяных месторождениях с использованием эволюционных вычислений. Предлагается использовать клеточные генетические алгоритмы (с англ. Cellular genetic algorithms), которые гарантируют улучшенное разнообразие популяции при выполнении итераций. Эксперименты с резервуаром UNISIM-I показывают увеличение в 6-10 раз конечного NPV при сравнении с классическим генетическим алгоритмом. Данные модели полезны не только для проблем нефтегазовой отрасли, но и для любой задачи целочисленной оптимизации, в которой используются эволюционные алгоритмы.

Метод оптимизации маршрутов полётов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для сети нефтегазопроводов на базе эволюционных алгоритмов рассмотрен в научной работе [4]. Применение БПЛА позволяет повысить надежность и безопасность сети коммуникаций нефтепроводов путём проверки на утечку, а также документирования фактических происшествий. В исследовании произведен сравнительный анализ генетического алгоритма, алгоритма имитации отжига (SA) и адаптивного алгоритма генетической имитации отжига (AGASA) при решении задачи планирования маршрутов полётов. В результате подтвердилась эффективность алгоритма AGASA ввиду лучшей стабильности и сходимости.

В исследовании [5] рассматривается три гибридных алгоритма для управления частотой вращения асинхронного двигателя, такие как PID-PSO, Fuzzy-PSO, и GA-PSO. В сравнении с классическими методами ПИД-управления, данные методы позволяют снизить пульсации крутящего момента и устранить помехи, влияющие на характеристики привода.

В настоящее время разработано большое количество биоинспирированных методов для синтеза оптимального управления для одномерных (single input single output) систем, в том числе, таких как искусственные иммунные системы (AIS) [6]. Такие алгоритмы имеют ряд существенных особенностей, таких как высокая точность вычислений, быстрое действие, возможность работы алгоритмов при отсутствии полноты информации о технологическом объекте управления. Алгоритм искусственных иммунных систем (AIS) показал [7], что он способен находить глобальное оптимальное решение в отличие от классических методов настройки регуляторов, имея ряд преимуществ, таких как: отсутствие перерегулирования, установившейся ошибки регулирования, высокой точности решения и скорости сходимости.

Одним из видов AIS является алгоритм клональной селекции (CLONAG), применение которого даёт более эффективные результаты при решении задач оптимизации и настройки регуляторов. Теория клональной селекции подразумевает применение механизмов иммунного ответа при распознавании иммунными клетками образов чужих антигенов антителами [8]. Основным преимуществом данного алгоритма является способность к самообучению.

Исходя из литературных источников, описанных выше, можно утверждать, что применение интеллектуальных подходов широко распространено в нефтегазовой отрасли и актуально развитие данной области.

1. Процесс очистки газа в дистиляционной колонне

В качестве объекта нефтегазовой отрасли рассматривается дистиляционная колонна, которая является наиболее распространенным инструментом для процесса очистки природного газа от различных примесей. Математическая модель, разработанная в [9], системы управления очистки газа в дистиляционной колонне основываются на структуре баланса энергии. В этой структуре входами являются скорость потока жидкости, L , и скорость потока пара, V , а выходами – концентрации продуктов χ_D и χ_B .

Модель дистиляционной колонны может быть представлена системой с двумя входами и двумя выходами [9], что соответствует двумерной системе управления:

$$\begin{cases} \frac{d\chi_D(t)}{dt} = -\frac{1}{1.9588} \cdot \chi_D(t) + \frac{0.0042}{1.9588} \cdot L(t) - \frac{0.0062}{1.9588} \cdot V(t) \\ \frac{d\chi_B(t)}{dt} = -\frac{1}{1.9588} \cdot \chi_B(t) + \frac{0.0072}{1.9588} \cdot V(t) - \frac{0.0052}{1.9588} \cdot L(t) \end{cases}$$

где $L(t)$ – скорость потока жидкости;

$V(t)$ – скорость потока пара;

χ_B – концентрация жидкости в нижней части колонны;

χ_D – концентрация жидкости в дистилляте.

Данный процесс характеризуется многосвязной структурой, как показано на рисунке 1.

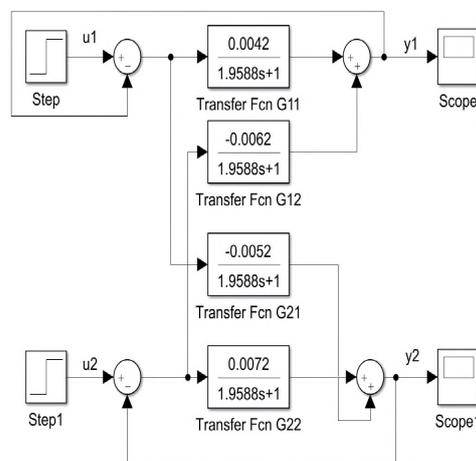


Рис. 1 – Многосвязная структура модели дистиляционной колонны

Наличие взаимосвязей на выходные сигналы существенно влияет на управление контурами G_{11} , G_{22} . Для решения этой проблемы в дальнейшем необходимо выполнить операцию развязки (англ. decoupling), заключающейся в компенсации элементов G_{12} , G_{21} .

В работе [9] произведена процедура развязки, для которой необходимо рассчитать регуляторы для двух независимых контуров:

$$G_{11}(s) = \frac{0.0042}{1.9588s + 1} \tag{1}$$

$$G_{22}(s) = \frac{0.0072}{1.9588s + 1} \quad (2)$$

Необходимо выбрать закон типовых регуляторов для решения задачи стабилизации выходных сигналов независимых контуров (1), (2).

2. Постановка задачи

На основе алгоритма клональной селекции CLONAG и генетического алгоритма GA необходимо рассчитать параметры регуляторов для подсистем (1,2), сложной системы управления очистки газа в дистилляционной колонне, обеспечивающей минимум интегрального квадратичного критерия качества:

$$ISE_i = \int_{t=0}^{\infty} e_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1,2}. \quad (3)$$

где $e_i(t)$ – ошибка рассогласования между желаемыми сигналами и сигналами выхода,

y_1, y_2 ; $i = \overline{1, n}$ – количество подсистем.

Типовым законом управления предлагается выбрать ПИ-регулирование для двух контуров (1,2):

$$C_{PI1}(s) = P_1 + I_1 \frac{1}{s} \quad (4)$$

$$C_{PI2}(s) = P_2 + I_2 \frac{1}{s} \quad (5)$$

Произвести сравнительный анализ генетического алгоритма и алгоритма клональной селекции и выбрать лучший.

3. Метод клональной селекции

Основой для применения алгоритма CLONALG для решения синтеза типовых регуляторов для МИМО-систем является формирование понятий, соответствующих теории иммунных систем и алгоритму клональной селекции. В контексте постановки задачи для системы управления (3) обобщённая форма антител соответствует вектору аргументов:

$$Ab = (y_1, y_2, u_1, u_2), \quad (6)$$

и представляет собой набор решений системы.

В качестве антигенов используются критерии качества (3), выраженные в виде функций:

$$Ag = f(e_1, e_2, u_1, u_2). \quad (7)$$

Формально алгоритм клональной селекции для решения задач синтеза оптимального управления сложными системами можно представить в виде [12]:

$$CLONALG = (Ag, Ab, G, S, C, M, f, d, t).$$

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.

В среде MATLAB сформирована программа, которая позволяет получить график определения минимальных точек критериев качеств и значений параметров регуляторов. Начальные условия и значения параметров алгоритма представлены в таблице 1.

Для формирования первоначальных границ изменения параметров x_{\min} , x_{\max} получены параметры PI-регуляторов на основе метода рабочего инструмента PID Tuner среды программирования MATLAB (рисунок 2).

	Tuned	Block
P	248.1916	248.1916
I	380.2635	380.2635
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a

	Tuned	Block
P	144.7784	144.7784
I	221.8204	221.8204
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a

Рис. 2 – Параметры PI-регуляторов

Выражения для регуляторов (5), (6), настроенных на основе алгоритма клональной селекции:

$$C_{PI1}(s) = 19.54 + 48.12 \frac{1}{s},$$

$$C_{PI2}(s) = 22.73 + 23.86 \frac{1}{s}.$$

4. Генетические алгоритмы

Основная идея алгоритма заключается в организации структуры «естественного отбора» среди множества решений. В связи с тем, что ГА используют биологические подходы, вводится свойственная им терминология. Под популяцией подразумевают группу всех пробных решений, в то время как единичное решение, которое записано в двоичном коде, называют хромосомой либо особью.

Имеется набор пробных решений (популяция). Необходимо создать на основе исходной популяции новую, таким образом, чтобы пробные решения находились ближе к глобальному минимуму заданной целевой функции. Сформируются брачные пары для скрещивания из исходной популяции.

Процесс работы генетического алгоритма состоит из нескольких этапов (рисунок 3) [10]:

1. Генерация начальной популяции, состоящей из n хромосом.
2. Вычисление пригодности каждой отдельной хромосомы.
3. Выборка пар хромосом-родителей с помощью одного из известных способов отбора.
4. Кроссинговер пар родителей с произведением двух потомков, с вероятностью p_c .
5. Мутация потомков с вероятностью p_m .
6. Повтор итераций 3-5 до тех пор, пока не будет сгенерировано новое поколение популяции, которое будет содержать n хромосом.
7. Повтор итераций 2-6 до тех пор, пока не будет выполнен критерий останова процесса.

Критерием останова процесса работы

ГА может быть заданным количеством m поколений или сходимостью популяции.



Рис. 3 – Схема простого генетического алгоритма

Для решения задачи используются следующие параметры: количество особей в популяции – 50; число хромосом, автоматически попадающих в следующую популяцию – 0.05 от размера популяции; коэффициент скрещивания – 0.08.

Закон управления для ПИ-регуляторов, настроенных с помощью генетического алгоритма, имеет вид:

$$C_{PI1}(s) = 29.94 + 59.984 \frac{1}{s},$$

$$C_{PI2}(s) = 29.592 + 29.972 \frac{1}{s}.$$

5. Результаты моделирования

На рисунке 4 представлена модель, описывающая регулирование с помощью алгоритмов CLONALG и GA. Результаты моделирования изолированных подсистем с PI-регуляторами (рисунок 5,6) показывают, что переходные процессы сходятся к желаемым сигналам.

Алгоритм клональной селекции систем и генетический алгоритм позволяет реализовывать ПИ-регуляторы, обеспечивающие минимум заданного критерия качества.

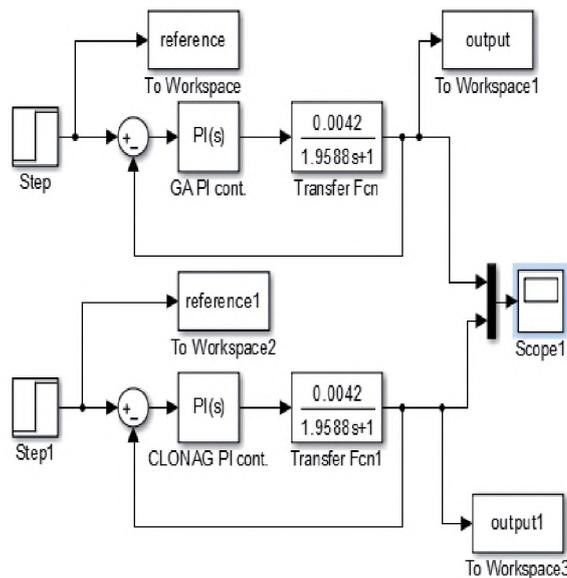


Рис. 4 – Модель Simulink

В первой изолированной подсистеме оба регулятора имеют одинаковое время регулирования, однако в GA имеется перерегулирование в размере 6.5%.

Во второй подсистеме время переходного процесса ниже у регулятора, настроенного с помощью генетического алгоритма (рисунок б):

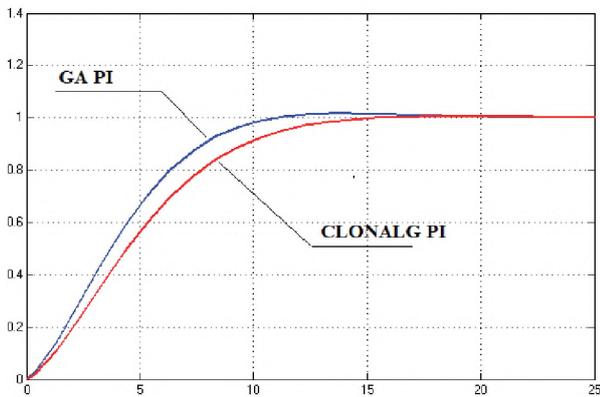


Рис. 5 – Переходной процесс первой подсистемы

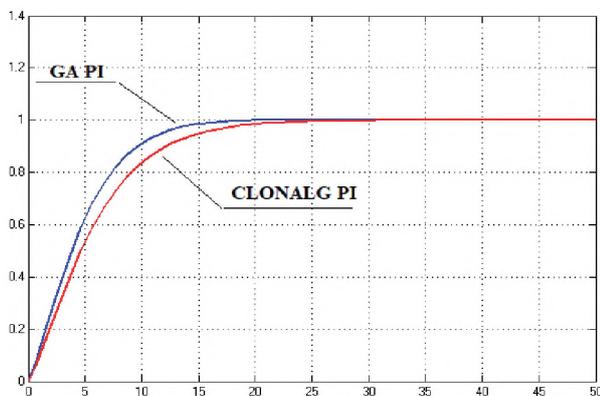


Рис. 6 – Переходной процесс второй подсистемы

6. Заключение

В результате проведенных экспериментов (таблица 1) можно утверждать, что генетический алгоритм имеет лучшее быстродействие, в отличие от алгоритма CLONALG, однако менее стабильный (возможно перерегулирование). Алгоритм клональной селекции незначительно уступает в быстродействии, но имеет ряд других преимуществ. Так, например, при поиске оптимальных параметров регулятора алгоритм менее подвержен преждевременной сходимости и отсутствует перерегулирование. Применение обоих методов позволяет существенно сократить время и затраты на создание систем управления сложными объектами нефтегазовой отрасли.

Таблица 1 – Сравнение алгоритмов

Подсистема/ алгоритм	Время регулирования (сек)	Перерегулирование (%)
GA 1	16,36	6,5
CLONALG 1	17,41	0
GA2	17,39	0
CLONALG 2	25,04	0

Работа выполнена по гранту КН МОН РК №AP05130018 по теме: «Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта» (2018-2020 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fatemeh Moinian, Hamed Sabouhi, Jafar Hushmand, Ahmad Hallaj, Hiwa Khaledi, Mojtaba Mohammadpour. Gas turbine preventive maintenance optimization using genetic algorithm // International Journal of System Assurance Engineering and management. – 2017. – Vol. 8, Issue 3. – P. 594-601.
2. Menad Nait Amar, Nourddine Zeraibi, Kheireddine Redouane. Optimization of WAG process using dynamic proxy, genetic algorithm and ant colony optimization // Arabian Journal for Science and Engineering, - 2018. – Vol. 42, Issue 11. – P. 6399-6412.
3. Alexandre Ashade L. Cunha, Giulia Duncan, Alan Bontempo, Marco Aurelio C. Pacheco. Optimum wells placement in oil and fields using cellular genetic algorithms and space efficient chromosomes / Proceeding of SAI Intelligent Systems Conference // IntelliSys 2016: Intelligent Systems and Applications. – Springer Cham. – 2017. – P. 15-38.
4. Yamin Yan, Yongtu Liang, Haoran Zhang, Wan Zhang, Huixia Feng, Bohong Wang, Qi Liao. A two-stage optimization method for unmanned aerial vehicle inspection of an oil and gas pipeline network // Petroleum Science. Chine University of Petroleum (Beijing). – 2019. – Volume 16, Issue 2. – P. 458-468.
5. Ghoulemallah Boukhalifa, Sebti Belkacem, Abdesselem Chiklhi, Said Benaggoune. Genetic algorithm and particle swarm optimization tuned fuzzy PID controller on direct torque control of dual star induction motor // Journal of Central South University. - 2019. – Vol. 26, Issue 7. – P. 1886-1896.
6. Minian F, Sabouhi H., Hushmand J., Hallaj A., Khaledi H., Mohammadpour M. Gas turbine preventive maintenance optimization using genetic algorithm // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – Springer, 2016. – Vol. 8. – P. 594-601.
7. Changdar Ch., Pal R. K., Mahapatra G. S. A genetic ant colony optimization based algorithms for solid multiple travelling salesman problem in fuzzy rough environment // Soft Computing. – Springer, 2018. – Vol. 21, Issue 16. – P. 4661-4675.
8. Castro L., Zuben F. The clonal selection algorithm with engineering applications. – Las Vegas, USA: Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications. In Workshop Proceeding of GECCO'00. – 2000. – P. 36-37.
9. Самигулин Т.И., Ширяева О.И., Самигулина Г.А. Программное обеспечение Genetic Regulator для решения задач управления сложными объектами / Т.И. Самигулин, О.И. Ширяева, Г.А. Самигулина. – Астана: Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права (на программу ЭВМ). – 2016. – №005733. – 25 с.
10. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика / М.В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2008. – 164 с.