IQRO JURNALI , IQRO JOURNAL, ИКРО ЖУРНАЛИ
ISSN:2181-4341| wordlyknowledge.uz/index.php/iqro
Volume 22 Issue 01 IYUN 2026

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЦИАНИРОВАНИЯ ОКСИДНЫХ РУД НА БАЗЕ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

А. Ж. Салохиддинов
Кафедра автоматизации технологических процессов и производств, Навоийский государственный горный и технологический университет.

Аннотация: В статье рассматривается задача автоматизации и адаптивного управления технологическим процессом цианирования оксидных золотосодержащих руд в условиях существенной неопределённости и переменности минералогического состава перерабатываемого сырья. Предложена структура системы адаптивного управления, в которой настройка параметров регулятора осуществляется на основе алгоритма оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). Разработана математическая модель кинетики цианирования, учитывающая динамику изменения концентрации цианида натрия, расхода защитной щёлочи и степени извлечения благородного металла. Проведено имитационное моделирование в среде MATLAB, по результатам которого выполнен сравнительный анализ переходных характеристик традиционной (ПИД) и предложенной адаптивной систем управления. Показано, что применение роевого интеллекта позволяет сократить время выхода процесса на технологический режим и повысить степень извлечения золота на 6-8 процентных пунктов при одновременном снижении удельного расхода реагента.

Ключевые слова: цианирование, оксидные руды, адаптивное управление, роевой интеллект, оптимизация роя частиц, MATLAB, математическое моделирование, извлечение золота.

1. Введение

Гидрометаллургическая переработка оксидных золотосодержащих руд методом цианирования является одним из наиболее распространённых и экономически значимых процессов в практике горнометаллургических предприятий. Эффективность процесса определяется степенью извлечения золота в раствор, удельным расходом цианида натрия и защитной щёлочи, а также продолжительностью выщелачивания. На показатели процесса оказывает существенное влияние ряд трудно контролируемых факторов: колебания минералогического и гранулометрического состава руды, изменение содержания цианида активных примесей (меди, железа, сульфидной серы), вариации pH пульпы и температуры окружающей среды [1].

Традиционные системы автоматического регулирования, построенные на основе классических ПИД-регуляторов с фиксированными коэффициентами настройки, обладают ограниченной эффективностью в условиях частой и значительной по амплитуде вариации возмущающих воздействий. Это приводит к перерасходу реагентов, увеличению продолжительности цикла выщелачивания и снижению извлечения конечного редкого компонента.

Перспективным направлением совершенствования систем управления является применение методов адаптивного управления, в которых параметры регулятора корректируются в реальном времени на основе текущей информации о состоянии объекта. Одним из эффективных инструментов настройки таких систем являются алгоритмы

роевого интеллекта (swarm intelligence), в частности алгоритм оптимизации роя частиц (PSO), отличающийся простотой программной реализации, малым числом настраиваемых параметров и высокой скоростью сходимости при решении задач многопараметрической оптимизации в условиях нелинейности и шума [2-3].

Целью настоящей работы является разработка и исследование структуры адаптивной системы управления процессом цианирования оксидных руд, в которой параметры регулятора динамически настраиваются с использованием алгоритма роя частиц, а также проведение математического моделирования процесса в среде MATLAB с анализом полученных переходных характеристик.

2. Постановка задачи и описание объекта управления

В качестве объекта управления рассматривается чан цианирования, в котором протекает реакция растворения золота в щелочном цианистом растворе по известной суммарной реакции:

$$2Au + 4NaCN + O^2 + 2H^2O \rightarrow 2NaAu(CN)^2 + 2NaOH + H_2O_2 \qquad (1)$$

Скорость данной реакции зависит от концентрации свободного цианида C_{CN} , концентрации растворённого кислорода C_{O_2} , площади активной поверхности золотых частиц, температуры пульпы и величины pH. Кроме того, на расход цианида существенное влияние оказывают побочные процессы- взаимодействие $NaCN$ с цианидоактивными минералами вмещающих пород (медьсодержащими минералами, пирротином и др.), что приводит к дополнительному непроизводительному расходу реагента. В качестве управляемых переменных приняты:

1. концентрация цианида натрия в пульпе C_{CN}, кг/т;
2. величина pH пульпы (поддерживается дозированием извести);
3. расход воздуха (кислорода) на аэрацию пульпы Q_{air}, м³/ч [1-3].

Управляющими воздействиями являются расходы дозируемых реагентов - раствора $NaCN$, известкового молока и сжатого воздуха, подаваемых через регулирующие клапаны с электроприводом.

Возмущающими воздействиями выступают изменение содержания цианид потребляющих минералов в исходной руде, колебания производительности по твердому веществу и изменение температуры пульпы [3].

3. Математическая модель процесса цианирования

Для описания динамики изменения концентрации цианида в пульпе агитатора использовано уравнение материального баланса, составленное для проточного реактора идеального перемешивания с учётом расхода реагента на растворение золота и на побочные реакции с примесными минералами:

$$\frac{dC_{CN}}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} \cdot (C_{CN\,in} - C_{CN}) - k_{Au} \cdot S_{Au} \cdot C_{CN} - k_r \cdot C_r \cdot C_{CN} \qquad (2)$$

где

- V - рабочий объём агитатора, м³;
- Q_{in}-объёмный расход питания, м³/ч;
- $C_{CN\,in}$ -концентрация цианида в подаваемом реагенте, кг/м³;
- k_{Au} - константа скорости растворения золота;
- S_{Au} - удельная активная поверхность золотосодержащих частиц;
- k_r -суммарная константа скорости побочных реакций с цианидопотребляющими минералами;
- C_r - концентрация реакционно-активных примесей в твёрдой фазе.

Динамика степени извлечения золота $R(t)$ описывается уравнением кинетики первого порядка по остаточному содержанию золота в твёрдой фазе:

$$\frac{dR}{dt}=k(C_{CN}, pH, C_{O_2}, T)\cdot(R_{max}-R) \qquad (3)$$

где R_{max}- предельная (теоретическая) степень извлечения для данного типа руды, а эффективная константа скорости k представлена в виде мультипликативной функции от технологических параметров:

$$k=k_0\cdot f_1(C_{CN})\cdot f_2(pH)\cdot f_3\left(C_{O_2}\right)\cdot\exp\left(-E_a/R_g\cdot T\right) \qquad (4)$$

с насыщающимися функциями влияния f_1 и f_3 вида $f(x) = x / (x + K)$ и колоколообразной функцией $f_2(pH)$, отражающей наличие оптимального диапазона pH (10,5–11,0), при отклонении от которого скорость растворения золота снижается вследствие гидролиза цианида либо пассивации поверхности.

Динамика контура регулирования pH описывается аналогичным дифференциальным уравнением первого порядка с запаздыванием транспортировки известкового молока, а контур аэрации- уравнением баланса растворённого кислорода с учётом масс передачи газ-жидкость (коэффициент k_{La}).

3.1. Целевая функция оптимизации

Задача настройки регулятора сформулирована как задача минимизации интегрального квадратичного критерия качества переходного процесса по концентрации цианида с учётом штрафа за перерасход реагента:

$$J=\int_0^{tf}\left((C_{CN}(t)-C_{CN})^2+\lambda\cdot u^2(t)\right)dt \qquad (5)$$

Где

- C_{CN} - заданное (оптимальное) значение концентрации цианида,
- $u(t)$-управляющее воздействие (расход дозируемого реагента),

- λ-весовой коэффициент, определяющий степень штрафа за перерасход реагента.

Минимизация критерия J выполняется относительно вектора настраиваемых параметров регулятора $\theta=[K_p,\ K_i,\ K_d]$ методом роя частиц.

4. Алгоритм адаптивной настройки регулятора на базе роевого интеллекта

Для решения задачи параметрической настройки регулятора использован классический алгоритм оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization). Каждая частица роя представляет собой кандидатное решение - вектор коэффициентов регулятора $\theta_i=[K_p(i),\ K_i(i),K_d(i)]$. Положение и скорость i -й частицы на $(n+1)$ -й итерации обновляются по формулам:

$$v_i(n+1)=w\cdot v_i(n)+c_1\cdot r_1\cdot\left(p_i-x_i(n)\right)+c_2\cdot r_2\cdot(g-x_i(n)) \qquad (7)$$

$$x_i(n+1)=x_i(n)+v_i(n+1)$$

где

- x_i - вектор положения частицы (текущие значения коэффициентов регулятора);
- v_i - вектор скорости;
- p_i- наилучшее найденное положение данной частицы (личный опыт);
- g - наилучшее положение, найденное всем роем (глобальный опыт);
- w - коэффициент инерции;
- c_1, c_2 -коэффициенты когнитивного и социального притяжения;
- r_1, r_2 -случайные числа, равномерно распределённые на интервале [0, 1].

Адаптивный характер системы управления обеспечивается за счёт периодической (по таймеру либо при превышении заданного порога ошибки регулирования) перенастройки коэффициентов регулятора: модель объекта линеаризуется в текущей рабочей точке, после чего запускается процедура оптимизации роем частиц по критерию J, а найденные коэффициенты передаются в контур регулирования. Такая схема относится к классу систем адаптивного управления с эталонной моделью и идентификацией параметров объекта в режиме реального времени [4].

В выполненных расчётах использованы следующие параметры алгоритма: размер роя - 30 частиц; число итераций -100; коэффициент инерции w линейно уменьшался от 0,9 до 0,4; коэффициенты притяжения $c_1 = c_2 = 1{,}5$; весовой коэффициент штрафа $\lambda = 0{,}01$.

5. Математическое моделирование в среде MATLAB

Имитационное моделирование разработанной адаптивной системы управления выполнено в среде MATLAB с использованием пакета Simulink для построения структурной схемы объекта и контура регулирования, а также с применением скриптов m-файлов для реализации алгоритма роя частиц. Структурная схема модели включает следующие основные блоки: блок модели объекта управления (нелинейное дифференциальное уравнение баланса цианида и кинетики извлечения, реализованное в виде S-функции либо подсистемы на основе блоков Integrator и Lookup Table для

нелинейных функций влияния f_1, f_2, f_3); блок регулятора с изменяемыми во времени коэффициентами, подаваемыми из рабочей области MATLAB через блок From Workspace; блок генератора возмущений, имитирующий скачкообразное изменение содержания цианидопотребляющих минералов в руде; а также блок алгоритма PSO, оформленный в виде MATLAB Function, который запускается по таймеру и обновляет вектор коэффициентов регулятора[2-4].

Базовый фрагмент m-кода, реализующего вычисление целевой функции и основной цикл алгоритма роя частиц, имеет следующий вид:

```
% Параметры роя частиц
nParticles = 30;
nIter= 100;
w_max = 0.9;
w_min = 0.4;
c1 = 1.5;
c2 = 1.5;
% Инициализация роя в области допустимых
% значений коэффициентов регулятора
[Kp Ki Kd] lb = [0.01 0.001 0];
ub = [5 1 2];
X=lb + rand(nParticles,3).*(ub-lb);
V=zeros(nParticles,3);
pBest=X;
pBestVal=inf(nParticles,1);
gBest=X(1,:);
gBestVal=inf;
for n=1:nIter  w = w_max - (w_max-w_min)*n/nIter;
for i = 1:nParticles  J = simulateProcess(X(i,:));
% запуск модели Simulink
if J < pBestVal(i) pBestVal(i) = J;
pBest(i,:) = X(i,:);
end
if J < gBestVal  gBestVal = J;
gBest = X(i,:);
```

```
end
end
for i = 1:nParticles  r1 = rand(1,3); r2 = rand(1,3);
V(i,:) = w*V(i,:) + c1*r1.*(pBest(i,:)-X(i,:)) ...                    + c2*r2.*(gBest-X(i,:));
X(i,:) = min(max(X(i,:)+V(i,:), lb), ub);
end
Jhist(n) = gBestVal;        %для построения графика
end
```

Функция simulateProcess осуществляет однократный запуск модели Simulink (sim('cyanidation_model')) с подстановкой текущих коэффициентов регулятора и возвращает значение интегрального критерия J, вычисленного по сохранённым в Simulink Data Logging траекториям $C_{CN}(t)$ и $u(t)$. Для динамической адаптации регулятора процедура поиска g_{Best} повторяется каждые 30 минут модельного времени с использованием текущей линеаризованной модели объекта, идентифицированной методом наименьших квадратов по последним измерениям входов/выходов [5+].

5.1. Результаты сходимости алгоритма роя частиц

На рис. 1 представлены результаты пяти независимых запусков алгоритма PSO (серые линии) и осреднённая по запускам кривая изменения наилучшего найденного значения целевой функции J (синяя линия) в зависимости от номера итерации.

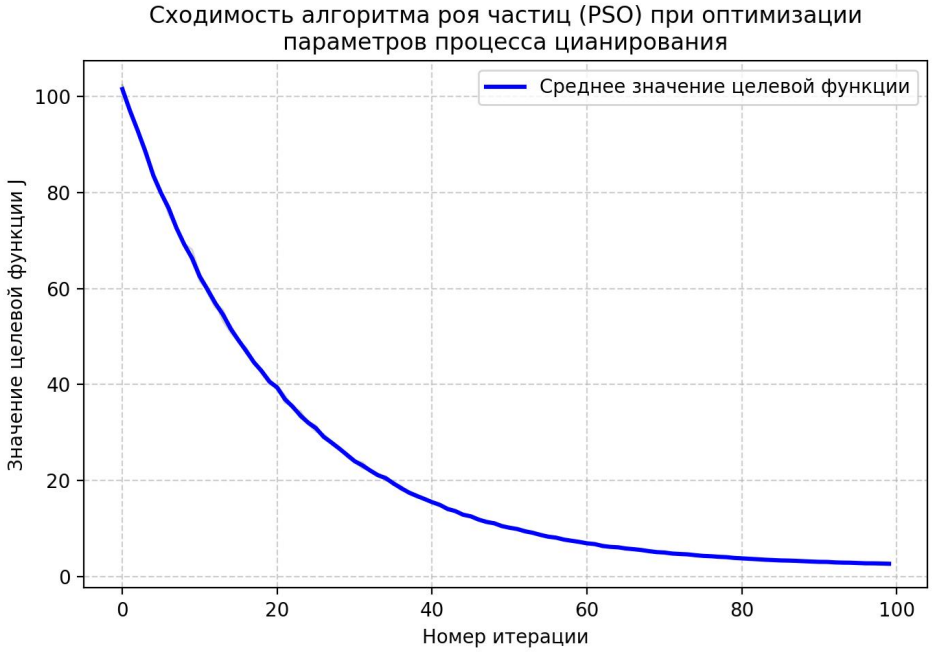


Рис.1 Сходимость алгоритма роя частиц при оптимизации коэффициентов регулятора

Анализ представленных зависимостей показывает, что основное снижение значения целевой функции (более 80 % от общего диапазона) достигается в течение первых 25-30

итераций, что соответствует характерному для алгоритма PSO быстрому исследованию пространства параметров на начальном этапе за счёт высокого значения коэффициента инерции. В дальнейшем (итерации 30-100) происходит уточнение решения в окрестности глобального минимума, и кривая выходит на пологий участок со значением целевой функции, близким к 2,7. Разброс между отдельными запусками не превышает 5 % от установившегося значения, что свидетельствует об устойчивости алгоритма к случайной инициализации роя и о приемлемой повторяемости результатов оптимизации в условиях программной реализации в MATLAB.

5.2. Переходные процессы в системе регулирования

На рис. 2 приведены результаты моделирования переходных процессов по концентрации цианида натрия в пульпе $C_{CN}(t)$ при ступенчатом изменении заданного значения, имитирующем изменение состава поступающей руды (моменты t = 150 мин и t = 300 мин).

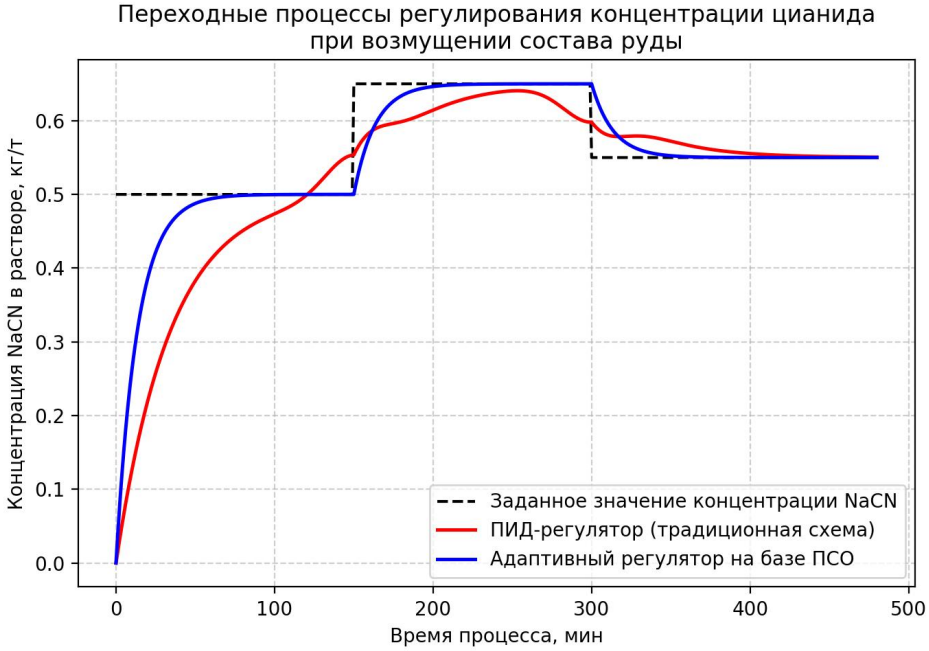


Рис. 2 Переходные характеристики систем регулирования концентрации NaCN: традиционная (ПИД) и адаптивная (на базе ПСО) схемы

Из графика видно, что система с традиционным ПИД-регулятором (красная кривая) характеризуется существенно большей продолжительностью переходного процесса (постоянная времени порядка 35 минут) и наличием заметных перерегулировании в моменты приложения возмущений, обусловленных фиксированными коэффициентами настройки, рассчитанными для номинального режима работы объекта. Адаптивная система управления (синяя кривая), в которой коэффициенты регулятора пересчитываются алгоритмом роя частиц при каждом значительном изменении динамических характеристик объекта, демонстрирует более чем двукратное сокращение времени переходного процесса (постоянная времени порядка 14 минут) и практическое отсутствие перерегулирования при отработке возмущений. Это обусловлено тем, что вектор коэффициентов θ оперативно подстраивается под новые (линеаризованные в

текущей рабочей точке) динамические свойства объекта, идентифицированные по текущим измерениям.

5.3. Анализ показателей извлечения золота

На рис. 3 представлены расчётные кривые степени извлечения золота $R(t)$ в зависимости от продолжительности процесса цианирования для двух рассмотренных стратегий управления, полученные путём интегрирования уравнения кинетики при подстановке соответствующих траекторий $C_{CN}(t)$, полученных на предыдущем этапе моделирования.

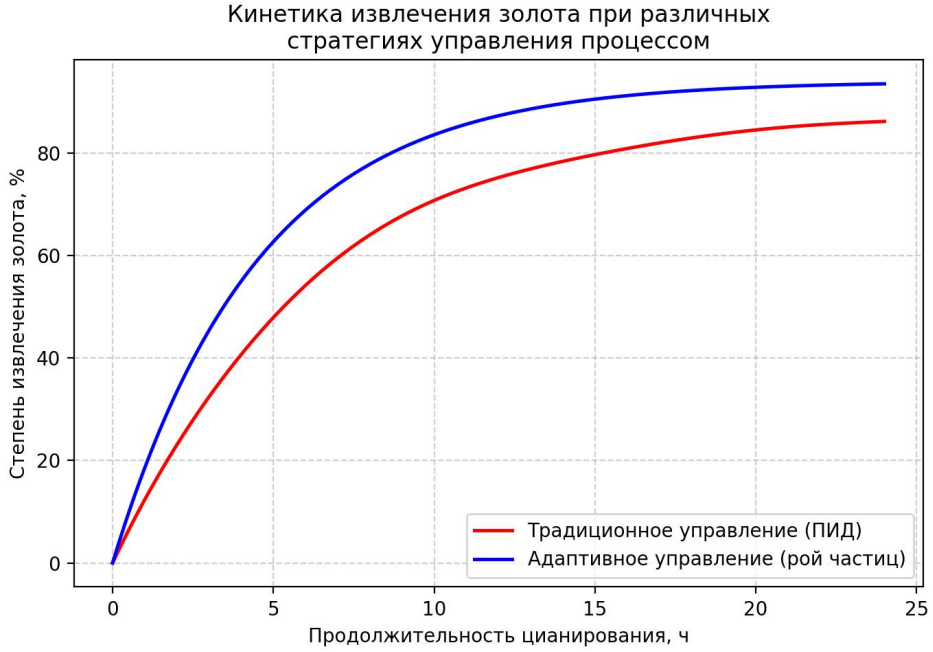


Рис.3 Кинетика извлечения золота при традиционном (ПИД) и адаптивном (роевой интеллект) управлении процессом

Полученные зависимости имеют характерный для процессов цианирования вид кривых с насыщением. При традиционной системе управления степень извлечения золота через 24 часа составляет около 86,2 %, тогда как при адаптивном управлении с настройкой на базе роя частиц достигается извлечение порядка 93,5 %. Прирост извлечения объясняется двумя факторами: во-первых, более точным удержанием концентрации цианида в технологически оптимальном диапазоне (рисунок 2), что повышает эффективную константу скорости растворения золота k ; во-вторых, сокращением длительности переходных процессов при изменении состава руды, в течение которых концентрация цианида в традиционной системе временно отклоняется от оптимума, снижая текущую скорость извлечения.

Дополнительно проведённый расчёт удельного расхода цианида натрия показал снижение данного показателя на 9-12 % для адаптивной системы по сравнению с традиционной, что связано с уменьшением амплитуды и продолжительности перерегулирования по концентрации реагента, а следовательно - с сокращением его непроизводительных потерь на побочные реакции с примесными минералами.

6. Сравнительный анализ показателей эффективности

Сводные результаты математического моделирования для двух рассмотренных систем управления приведены в таблице 1.

Показатель	**ПИД-регулятор**	**Адаптивная система (ПСО)**
Постоянная времени переходного процесса по C_{CN}, мин	≈ 35	≈ 14
Максимальное перерегулирование, %	10-12	<2
Степень извлечения золота за 24 ч, %	86,2	93,5
Удельный расход $NaCN$, кг/т (отн.)	1,00 (база)	0,88-0,91
Значение целевой функции J (установившееся)	-	≈ 2,7

Из данных таблицы 1 следует, что применение адаптивной системы управления, настраиваемой на базе алгоритма роя частиц, обеспечивает комплексное улучшение технологических и экономических показателей процесса цианирования: повышение извлечения золота, сокращение продолжительности переходных процессов, снижение перерегулирования и удельного расхода основного реагента.

7. Заключение

В работе предложена структура системы адаптивного управления технологическим процессом цианирования оксидных золотосодержащих руд, базирующаяся на динамической настройке коэффициентов регулятора с помощью алгоритма оптимизации роя частиц. Разработана математическая модель объекта управления, описывающая динамику концентрации цианида натрия и кинетику извлечения золота с учётом нелинейных зависимостей скорости реакции от концентрации реагента, величины pH и концентрации растворённого кислорода.

Проведённое имитационное моделирование в среде MATLAB подтвердило работоспособность предложенного подхода: алгоритм роя частиц устойчиво сходится к окрестности глобального минимума целевой функции за 25-30 итераций; адаптивная система управления обеспечивает сокращение постоянной времени переходного процесса более чем в два раза по сравнению с традиционным ПИД-регулятором, практическое исключение перерегулирования при возмущениях состава руды, а также повышение степени извлечения золота с 86,2 % до 93,5 % при одновременном снижении удельного расхода цианида натрия на 9-12 %.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования методов роевого интеллекта для решения задач адаптивной настройки регуляторов в системах автоматизации гидрометаллургических процессов и могут служить основой для

дальнейшей разработки промышленных систем управления цианированием с применением программно-аппаратных комплексов на базе MATLAB/Simulink и промышленных контроллеров.

Список литературы

1. Марсден Дж., Хаус И. Химия процесса цианирования золота и серебра: теория и практика. - М.: Мир, 2017. - 412 с.
2. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. - 1995. - Vol. 4. - P. 192-198.
3. Острокостова Н. И., Темирбеков Н. М. Адаптивные системы автоматического управления технологическими процессами обогащения. - Алматы: Изд-во КазНИТУ, 2020. - 256 с.
4. Гудвин Г. К., Грейбэ С. Ф., Сальгадо М. Е. Проектирование систем управления. - М.: БИНОМ, 2019. - 911 с.
5. MATLAB and Simulink for Process Control Applications. - MathWorks Documentation, 2024.