

**А.І. Швачка, Е.В. Титова, канд-ти техн. наук, Ю.К. Тараненко, докт. тех. наук,  
Г.І. Манко, Е.В. Чернецкий, канд-ти техн. наук, Л.Д. Чумаков, докт. тех. наук**  
(Україна, Дніпр, ГВУЗ "Український державний хімико-технологічний університет")

## РОЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ ДИНАМИКИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Анотація.** Показана актуальність розвитку методології настройки пропорційного інтегро - диференціального регулятора. Для розширення і поглиблення інформаційного забезпечення стратегічних і оперативних завдань автоматичних систем управління процесів гірських електромеханічних комплексів запропоновано побудову моделі синтезується системи у вигляді диференціального рівняння зв'язку, її розв'язку з використанням динамічних бібліотек мови програмування високого рівня Python. На підставі проведених досліджень структур нелінійних елементів обґрунтовано, що система вимірювання по структурам «вхід - вихід» є в певній формі новими знаннями, які можуть бути використані в якості інформаційних модулів формування предметної області інтелектуальних систем підтримки прийняття рішення в умовах невизначеного стану гірських агрегатів.

**Ключові слова:** структурна схема, регулятор, система, моделювання, переходна характеристика, якість регулювання.

**Аннотация.** Показана актуальность развития методологии настройки пропорционального интегро – дифференциального регулятора. Для расширения и углубления информационного обеспечения стратегических и оперативных задач автоматических систем управления процессов горных электромеханических комплексов предложено построение модели синтезируемой системы в виде дифференциального уравнения связи, ее разрешения с использованием динамических библиотек языка программирования высокого уровня Python. На основании проведенных исследований структур нелинейных элементов обосновано, что система измерения по структурам «вход – выход» является в определенной форме новыми знаниями, которые могут быть использованы в качестве информационных модулей формирования предметной области интеллектуальных систем поддержки принятия решения в условиях неопределенного состояния горных агрегатов.

**Ключевые слова:** структурная схема, регулятор, система, моделирование, переходная характеристика, качество регулирования.

**Abstract.** The relevance of the development of the methodology for setting the proportional integro - differential controller is shown. To expand and deepen the information support for strategic and operational tasks of automatic control systems for mining electromechanical complexes, it is proposed to build a model of the system being synthesized in the form of a differential equation for the connection of its resolution using dynamic libraries of Python's high-level programming language. On the basis of the conducted studies of the structures of non-linear elements, it is justified that the "input-output" measurement system is in a certain form new knowledge that can be used as information modules for the formation of the subject domain of intellectual decision support systems in the conditions of an undetermined state of mining aggregates.

**Keywords:** block diagram, regulator, system, simulation, transient response, quality of regulation.

### Введение

Автоматизация процессов горных электромеханических комплексов стала закономерным процессом развития тяжелой промышленности. С ростом спроса и желанием получить оптимальные технико-экономические показатели, возникла необходимость повышения производительности и повышения качества. Это, в свою очередь, привело к быстрому разворачиванию и совершенствования существующих автоматических систем регулирования (АСР). В условиях гранично допустимого уровня совершенствования показателей функционирования при ограничениях требований к процессу, единственным решением является совершенствование системы управления для повышения надежности, быстродействия и других показателей работы объектов горно-металлургического комплекса [1].

Широкое распространение в системах управления электромеханических комплексов получил пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) алгоритм управления. Это обусловлено простотой использования, возможность применения для широкого круга задач, реализацией на современных микропроцессорных средствах. Высокая чувствительность систем регулирования с ПИД – регуляторами к отклонениям оптимума их настроек требует выбора оптимальных параметров настроек регуляторов с учетом возможного изменения динамики объекта регулирования [2].

### Аналіз существуючих досягнень і публікацій

Для оценки качества синтезируемой АСР по виду переходного процесса необходимо построение зависимости переходного процесса от времени. Рассмотрим традиционные подходы к решению указанной проблемы [3].

1. Непосредственное построение графика переходного процесса по результатам решения дифференциального уравнения системы. Решение такого уравнения определяется двумя составляющими: вынужденной, представляющей частное решение исходного неоднородного уравнения с правой частью; свободной, решение однородного дифференциального уравнения без правой части. Этот метод позволяет получить точное решение, но его практическое использование для систем высокого порядка имеет ряд ограничений.

2. Метод с использованием преобразования Лапласа. Для практического использования данного метода необходимо воспользоваться основными свойствами преобразования Лапласа: теорема разложения, теорема свертки и др. Данный метод менее трудоемкий по сравнению с предыдущим.

3. Построение переходного процесса с использованием вещественной частотной характеристики (ВЧХ) замкнутой системы. Использование ВЧХ базируется на определенных соотношениях, связывающих между собой функцию оригинал и ее изображения, т.е. в формулах обратного преобразования Лапласа в Фурье.

Недостатком всех экспериментальных методов настройки регуляторов является неполнота информации о запасе устойчивости системы и робастности. Выбор оптимальной модели объекта должен быть основан на критерии достаточного качества управления при минимальной сложности модели. Расчет параметров настройки регулятора по формулам не может дать оптимальных настроек регулятора, поскольку аналитически полученные результаты основаны на сильно упрощенных моделях объекта [4].

В современных информационных технологиях важное место отводится инструментальным средствам и среде разработки АСР. Инструментальные средства проектирования относятся к проблемно ориентированным программным средствам. Проектировщик может сосредоточиться на решении поставленной задачи и решать ее в наиболее удобной форме. Составляющими частями средств являются языки высокого уровня [5].

Развитие программных средств идет в направлении расширения диапазона поддерживаемых регуляторов, использования методов искусственного интеллекта, развития интерфейса пользователя. Несмотря на большое количество коммерческих продуктов, которые в основной своей массе являются «закрытыми», остается много нерешенных проблем, связанных с методологией принимаемого решения, а также качеством регулирования, влиянием нелинейности объекта управления и влияния возмущений.

### Цель и задачи исследования

Целью исследования является стабилизировать движение системы с ПИД - регулятором около выбранной траектории с учетом нелинейности характеристик объекта и неопределенности информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи

- разработать и обосновать структурную схему синтезируемой системы;
- составить математическое описание системы в виде уравнения связи переменных;
- разрешить дифференциальное уравнение системы и проанализировать результаты.

### Синтез структурной схемы АСР

Структурная схема АСР представлена на рис. 1. Передаточная функция объекта охвачена отрицательной обратной связью, в цепи которой включен регулятор с ПИД – законом регулирования.

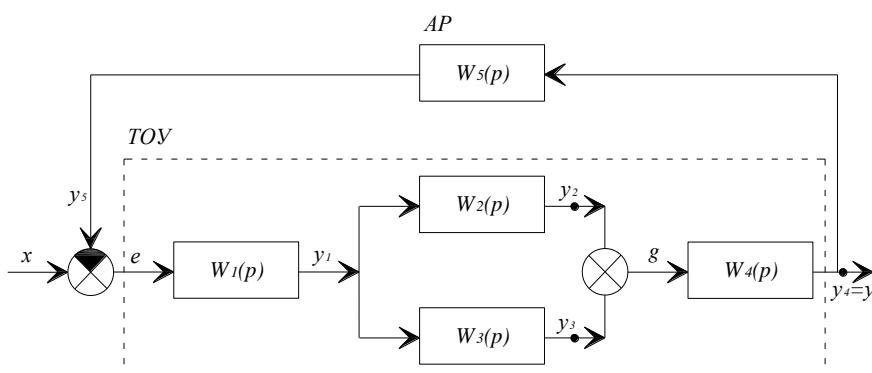


Рис. 1 Структурная схема АСР:  
TOU – технологический объект управления, AP – автоматический регулятор

Рассмотрим основные динамические звенья в составе системы:

1. Колебательное звено. Математическое описание в виде дифференциального уравнения:

$$T_1^2 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \xi_1 \cdot T_1 \cdot \frac{dy_1}{dt} + y_1 = k_1 \cdot e, \quad (1)$$

где  $T_1$  ( $k_1$ ) – постоянная времени (коэффициент пропорциональности) колебательного звена;  $y_1$  – выходной сигнал;  $e$  – входной сигнал, сигнал ошибки,  $e = x - y_5$ ;  $\xi$  – коэффициент демпфирования.

2. Линейное статическое звено. Зависимость выхода ( $y_2$ ) от входа ( $y_1$ ) определяется по табличным данным, которые могут быть получены экспериментальным путём. Из-за погрешностей снятия данных следует применять линейную аппроксимацию:

$$y_2 = a_2 y_1, \quad (2)$$

где  $a_2$  – коэффициент аппроксимации линейного статического звена.

3. Линейное статическое звено. Зависимость выхода ( $y_3$ ) от входа ( $y_2$ ) определяется по табличным данным, которые могут быть получены экспериментальным путём. Из-за погрешностей снятия данных следует применять линейную аппроксимацию:

$$y_3 = a_3 y_2, \quad (3)$$

где  $a_3$  – коэффициент аппроксимации линейного статического звена.

4. Линейное динамическое звено, определяемое суммой входных сигналов блоков 2 и 3 ( $g$ ):

$$g = a_2 y_1 + a_3 y_2, \quad (4)$$

Звено описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$T_4 \frac{dy}{dt} + y = k_4 g, \quad (5)$$

где  $T_4$  ( $k_4$ ) – постоянная времени (коэффициент пропорциональности) линейного динамического звена.

5. Математическое описание автоматического регулятора (ПИД – закон регулирования):

$$y_5 = \mu_1 y + \mu_2 \frac{dy}{dt} + \mu_3 \int y(t) dt, \quad (6)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент пропорциональности при линейной функции,  $\mu_2$  – коэффициент дифференцирования при первой производной,  $\mu_3$  – коэффициент интегрирования при неопределенном интеграле.

#### Составление дифференциального уравнения системы

Установка управления принята в виде единичного ступенчатого воздействия ( $I(t)$ ). Переведём в операторную форму уравнения (1) и распишем его с учетом сигнала ( $e$ ) при подаче на вход ( $I(t)$ ):

$$(T_1^2 p^2 + \xi_1 T_1 p + 1) y_1 = k_1 \left( \frac{1}{p} - \left( \mu_1 + \mu_2 p + \mu_3 \frac{1}{p} \right) y \right). \quad (7)$$

Продифференцируем уравнение (7):

$$(T_1^2 p^3 + \xi_1 T_1 p^2 + p) y_1 = k_1 \left( 1 - \left( \mu_1 p + \mu_2 p^2 + \mu_3 \right) y \right). \quad (8)$$

Переходя в уравнения (4) и (5) к операторной форме и выражая ( $y_1$ ), получим:

$$y_1 = \frac{T_4 p + 1}{k_4 (a_2 + a_3)} y. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в (8) и выполняя предварительное преобразование:

$$\left( T_1^2 T_2 p^4 + (\xi_1 T_1 T_2 + T_1^2) p^3 + [T_2 + \xi_1 T_1 + \mu_2 k_1 k_2 (a_2 + a_3)] p^2 + [1 + \mu_1 k_1 k_2 (a_2 + a_3)] p + \mu_3 k_1 k_2 (a_2 + a_3) \right) y = k_1 k_2 (a_2 + a_3) \quad (10)$$

Получено однородное дифференциальное уравнение четвертого порядка. Переидем во временную область, для этого операторную форму заменим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dy^4}{dt^4} + A \frac{dy^3}{dt^3} + B \frac{dy^2}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + Dy = E, \quad (11)$$

где

$$A = \frac{\xi_1 T_1 T_2 + T_1^2}{T_1^2 T_2}, \quad B = \frac{T_2 + \xi_1 T_1 + \mu_2 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2},$$

$$C = \frac{1 + \mu_1 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}, \quad D = \frac{\mu_3 k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}, \quad E = \frac{k_1 k_2 (a_2 + a_3)}{T_1^2 T_2}.$$

### Имитационное моделирование динамики системы

Исходными данными являются динамические характеристики объекта управления (табл. 1, 2).

Таблица 1  
Параметры настройки объекта управления

$T_1$	$\zeta$	$k_2$	$k_3$	$T_4$
7	0,4	5,5	5,5	5

Таблица 2  
Характеристики динамических звеньев (для аппроксимации)

$y_1$	0	1	2	3	4	5
$y_2$	0	-11	-22	-33	-44	-55
$y_3$	0	17	34	51	68	85

Регулятор отключен от объекта, т.е.  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$ . Порядок подбора коэффициентов рекомендуется следующий: сначала подбирается коэффициент пропорционального члена ( $\mu_1$ ), затем управление по скорости – демпфер ( $\mu_2$ ), и в последнюю очередь – коэффициент интеграла ( $\mu_3$ ). Следует иметь в виду, что большие значения коэффициентов ( $\mu_1, \mu_3$ ), могут сделать систему неустойчивой.

Решение задачи проведено на языке программирования PYTHON. Основные этапы программирования включают: аппроксимация характеристик статических объектов; инициализация параметров объекта управления; оценка параметров ПИД – регулятора; решение дифференциального уравнения системы регулирования.

Принятый решатель (def) находится в состав библиотеки **Sodeint** из подбиблиотеки **SciPy – Integrate**. Для его построения уравнение (11) необходимо перестроить так, чтобы в левой его части была производная высшего порядка, а в правой части – все остальное:

$$\frac{dy^4}{dt^4} = -A \frac{dy^3}{dt^3} - B \frac{dy^2}{dt^2} - C \frac{dy}{dt} - Dy + E. \quad (12)$$

Рассмотрим результаты работы программы. В системе, работающей без автоматического регулятора, после внесения возмущения наблюдается апериодический переходной процесс с лавинообразным отклонением значения параметра от состояния равновесия (рис. 2).

Подключение регулятора с ПИД – законом регулирования позволило стабилизировать работу системы (рис. 3). Колебательный переходной процесс сходится с течением времени к заданному значению, однако колебания затянутые и видно наложение высокочастотной составляющей помех при выходе заданный режим.

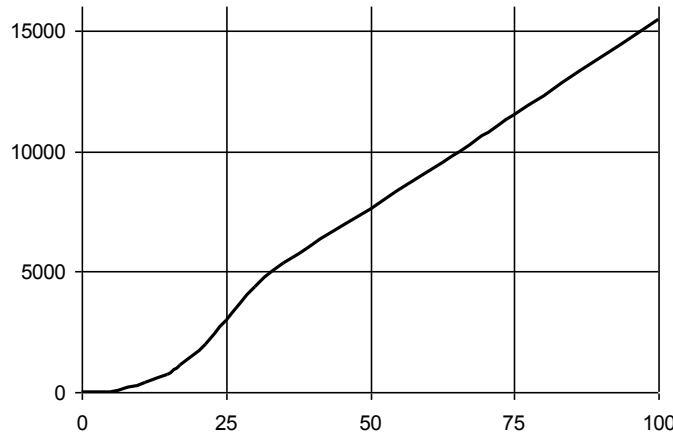


Рис. 2. Моделирование динамики АСР при отключенном регуляторе: ( $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$ )

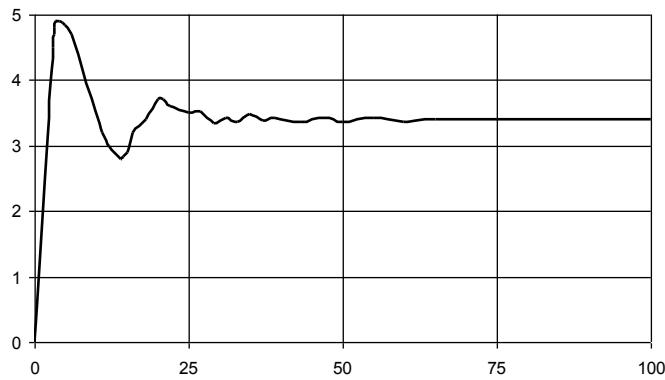


Рис. 3. Моделирование динамики АСР при подключенному регуляторе ( $\mu_1 = 0.5; \mu_2 = 2; \mu_3 = 0.3$ )

Учет нелинейных характеристик системы, а именно, внесением изменений в табличные значения для третьего звена (увеличение  $a_3$  в два раза), позволили обеспечить плавный характер затухания переменной и снижение времени регулирования.

### Выводы

Предложенный метод расчета показал свою работоспособность, а также целесообразность практической реализации для обеспечения устойчивой работы системы при суточном изменении нагрузки горных металлургических комплексов. Ограничением для реализации алгоритма является условия физической реализуемости, а именно, решение, которое соответствует корням с отрицательным значением. Данная проблема является предметом дальнейших исследований, включая определение области устойчивости решений.

### Список литературы

1. Швачка А.И., Бородулин А.В., Чернецкий Е.В., Олейник О.Ю., Довгополый Я.А. Применение информационных технологий в теплоэнергетической модели домны и повышение ее энергоэффективности // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 5 (106). – Днепр, 2016. – С. 68 – 75.
2. Wescott T. PID Without a PhD / T. Wescott. – Wescott Design Services, 2016. – 30р.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Настройка ПИД-регулятора инерционных объектов горно-металлургического комплекса / А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка // Гірнича електромеханіка та автоматика. 2017 – Вип. 99. – С. 65 – 70.
5. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a proportional-integral-differential controller with an additional controlling action / Ya. Dovhopolyi, G. Manko, V. Trishkin, A. Shvachka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control systems. – 2017. – Vol.6/2(90). – pp. 61-66.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Слесаревым В.В.*