

Метою технологічного процесу ідентифікації і являється рішення комплексу питань, пов'язаних з оперативним визначенням поточного стану ТП і ГЕМК, що контролюються, і характеру зміни цього стану в часі і просторі. При цьому треба підкреслити, що апіорна (логічна) та апостеріорна (вимірювана) інформації технологічних процесів, які використовуються при діагностуванні та ідентифікації, тісно пов'язані ймовірнісним описом функціонально зв'язаної множини випадкових подій.

**Список літератури**

1. Мещеряков Л.И. Математические основы представления стохастических состояний диагностируемых горных агрегатов / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ. – Днепропетровск, 2002. – №6. – С. 95–98.
2. Мещеряков Л.И. Разработка и результаты промышленных испытаний системы ранней диагностики затираний в подшипниковых узлах барабанных мельниц / Л.И. Мещеряков, И.К. Младецкий, О.В. Модзилевский, В.П. Попов, С.Г. Рудоманова, С.В. Семенов, В.В. Кукинов, / Метрологическое обеспечение и автоматизация технологических процессов – основа повышения качества продукции горнорудных предприятий // Материалы научно-технической конференции. – Губкин. – 1988. – С. 58–59.
3. Мещеряков Л.И. Идентификация и диагностирование технического состояния технологических агрегатов / Л.И. Мещеряков. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – №1,2. – С. 30–31.
4. Дисперсионная идентификация / Под редакцией Н.С. Райбмана. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 С.
5. Мещеряков Л.И. Моделирование динамики горных электромеханических систем для оптимизации задачи их автоматического диагностирования / Л.И. Мещеряков. // Вибрации в технике и технологиях, 2000. №4(16). С. 68–70.
6. Мещеряков Л.И. Основні задачі енергоінформаційних технологій діагностування бурових комплексів / Л.И. Мещеряков // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 2006. – №7. – С. 71–74.
7. Мещеряков Л.И. Стан і тенденції розвитку інтегрованих комп'ютерних технологій діагностування гірничих електромеханічних систем / Л.И. Мещеряков. // Научный вестник НГАУ.: Науч.-техн. журнал, 1999. №1. – С. 113–115.

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

УДК 669.162-58

**А.В. Подгородецкий, А.И. Швачка, канд. техн. наук**

*(Украина, Днепр, ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»)*

**НАСТРОЙКА ПИД - РЕГУЛЯТОРА  
ИНЕРЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНО - МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

***Анотація.** На підставі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень визначено безпошуковий метод настройки ПИД - регулятора інерційними об'єктами гірничо-металургійного комплексу з запізненням. Отримано настройки регулятора в залежності від каналу внесення обурює впливу з використанням субоптимального регулятора на мінімум інтегрального квадратичного показника якості, а також обґрунтовано рекомендації по налаштуванню безітераційної розрахункової моделі. Проаналізовано необхідні вимоги по роботі автоматичного регулятора і обґрунтований вибір єдиних налаштувань регулятора з ПИД - законом регулювання з урахуванням вимог підвищення швидкодії і показниками якості автоматичної системи регулювання.*

***Ключові слова:** ПИД - регулятор, настройка, якість регулювання, інтегральна квадратична оцінка, перехідна характеристика.*

***Аннотация.** На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований определен беспысловый метод настройки ПИД – регулятора инерционными объектами горно-металлургического комплекса с запаздыванием. Получены настройки регулятора в зависимости от канала внесения возмущающего воздействия с использованием субоптимального регулятора на минимум интегрального квадратичного показателя качества, а также обоснованы рекомендации по настройке безитерационной расчетной модели. Проанализированы необходимые требования по работе автоматического регулятора и обоснован выбор единственных настроек регулятора с ПИД - законом регулирования с учетом требований повышения быстродействия и показателям качества автоматической системы регулирования.*

***Ключевые слова:** ПИД - регулятор, настройка, качество регулирования, интегральная квадратичная оценка, переходная характеристика.*

***Abstract.** Based on the theoretical analysis and experimental studies, a non - reference method for tuning the PID regulator by inertial objects of the mining and metallurgical complex with delay is defined. Regulator settings are obtained depending on the channel of disturbance input with the use of a suboptimal regulator for a*

*minimum of the integral quadratic quality index, and also recommendations for tuning the non-wasting calculation model are justified. The necessary requirements for the operation of the automatic controller have been analyzed and the choice of the only controller settings with the PID regulation law is justified taking into account the requirements for increasing the speed and quality indicators of the automatic control system.*

**Keywords:** PID - controller, tuning, quality of regulation, integral quadratic estimation, transient response.

### **Введение**

Объекты горно-металлургического комплекса (ГМК), в том числе добыча и обогащение руд, выплавка металла, занимают значительное место в структуре энергопотребления предприятия [1]. Поэтому, актуальным является снижение расходов на производство путем повышения показателей качества автоматической системы регулирования (АСР) при управлении ими.

С позиции управления указанные объекты являются сложными, содержащими нестационарные шумленные параметры, характеризующиеся перекрестными связями, содержащими нелинейности. Трудности управления связаны со значительной инерционностью объекта и запаздыванием [2].

Одним из составляющих факторов комплексной проблемы задачи управления является автоматическое поддержание технологических параметров на заданном уровне. С этой целью на предприятиях широко используются ПИД - регуляторы [3]. Накоплен огромный опыт эксплуатации и разработаны различные методы настройки ПИД - регуляторов. Известные методы настройки имеют определенные преимущества и недостатки, различные области применения. В связи с усложнением технологических процессов, а также наличием запаздывания в объектах управления, вопрос определения параметров настройки ПИД - регулятора, которые обеспечивали бы высокие показатели качества переходных процессов и достаточный уровень запаса устойчивости, остается актуальным [4].

### **Литературный обзор**

В соответствии с классификации [5], существующие методы настройки, условно можно разделить на точные и приближенные. Точные методы дают качественные показатели переходного процесса и делятся на поисковые и беспоисковые. Поисковые методы позволяют получить параметры настройки с проведением итерационной процедуры поиска. Беспоисковые методы не требуют большого количества итераций поиска параметров настройки. Приближенные методы дают параметры, которые в дальнейшем подлежат уточнению. Режимы работы АСР в рассматриваемых методах: «online», «offline».

Точные методы настройки: Дудникова Е.Г., Ротача В. Я., Вишняковой Ю.Н., по номограммам [6]. Метод Дудникова Е.Г. позволяет проводить оценку запаса устойчивости системы по распределению корней характеристического уравнения для одно- и многоконтурных систем. Метод Ротача В.Я. обеспечивает оценку запаса устойчивости системы с частотными характеристиками при ограничении на показатель колебательности. Метод Вишняковой Ю.С. заключается в последовательном выборе точек в пределах параметров настройки, вычислении в каждой точке критерия оптимальности, а также в проверке запаса устойчивости системы по всем контурами. Из полученного массива выбирают значения, где достигается минимум. Метод номограмм применяется для объектов первого и второго порядка с запаздыванием и характеризуется использованием большого количества итераций для достижения оптимального результата.

Метод масштабирования относится к беспоисковым [7]. Суть этого метода заключается в использовании информации об эталонной АСР с другим объектом, но тем же регулятором что и в замкнутой системе. Недостатком метода является необходимость наличия библиотеки эталонных АСР.

Приближенные методы позволяют сравнительно простыми способами определить ориентировочные значения оптимальных настроек, которые в процессе наладки регулятора могут быть уточнены. К приближенных «online» методам относятся метод Зиглер-Никольса, метод CHR, адаптивные методы Ротача В.Я [8]. Зиглер и Никольс предложили две разновидности настройки. Один из них основан на параметрах отклика объекта на единичный ступенчатый влияние, а второй - на частотных характеристиках объекта управления. Метод Зиглер-Никольса не учитывает требований к запасу устойчивости системы, а полученные параметры настройки дают удаленный от оптимального результат. Метод CHR (Чина-Хронеса-Ресвика) является модификацией метода Зиглер-Никольса и позволяет получить больший запас устойчивости. Адаптивные методы Ротача В.Я. заключаются в процедуре адаптации по частотным характеристикам, использовании синусоидальных сигнальных воздействий или переходной характеристики системы. Недостатками этих методов является необходимость осуществления большого количества итераций и непригодность для многоконтурных АСР.

К приближенных «offline» методам относятся методы Куна, Латцеля, Кесслера [9]. Метод Куна применяется для медленных переходных процессов, а уточнение параметров настройки может выполняться на объекте в процессе ввода в эксплуатацию системы. Метод позволяет быстро получить результат, однако в системах с высоким порядком имеет место значительное запаздывание. Метод Латцеля позволяет при наличии переходной функции путем интегрирования рассчитать различные характерные коэффициенты, с

помощью которых находятся параметры регулятора. В методе Кесслера оптимизация происходит только по заданию, запаздывание объекта не учитывается, а результаты могут быть далекими от оптимальных.

Несмотря на наличие совокупности достаточно разработанных и неоднородных алгоритмов, все еще остается большой разрыв между теорией и практикой. Во многом он связан с использованием хорошо зарекомендовавших алгоритмов настройки и их модификаций. Потребности ГМК с каждым годом растут, что вызвано ростом темпов производства, изменением технологии, гибкостью. Проведенные же исследования качества работы 100 тыс. контуров регулирования на 350 предприятиях обнаружили, что от 49 до 63% контуров работают со "слабыми" (приблизненными к размыканию контура) настройками [10]. В среднем треть контуров работает с нормальными настройками, треть - с "ослабленными", треть - практически "слабыми" настройками. Это ставит задачу совершенствования методов регулирования по более сложным моделям, позволяющие оптимизировать регулирования и порождает проблему поиска алгоритмов их настройки, исследования влияния коэффициентов регулятора на переходные процессы.

### Цель исследования

Совершенствование бесперебойного метода настройки ПИД - регулятора для объектов с запаздыванием, а также выдача рекомендаций по реализации алгоритма в составе автоматической системы регулирования для повышения быстродействия и качества ее функционирования.

### Методологи вычислительного эксперимента

Переходные процессы в АСР при минимизации интегрального квадратичного критерия ( $I_2$ ) обеспечивают высокое качество, поэтому для настройки регулятора выбран бесперебойный метод на минимум указанной оценки [11]. Вариант расчета определяется местом внесения возмущения (рис. 1).

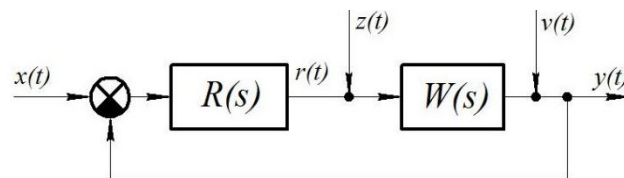


Рис. 1. Структурная схема АСР:

$x(t)$  – задающее,  $z(t)$  – внутреннее,  $v(t)$  – внешнее воздействие,  $r(t)$  – выход регулятора,  $y(t)$  – регулируемая величина

Идея метода заключается в МНК - приближении комплексной частотной характеристики (КЧХ) ПИД - регулятора к частотной характеристике оптимального регулятора в существенном диапазоне частот. Передаточная функция такого регулятора определяется по оптимальной передаточной функции замкнутой системы. Особенностью оптимального регулятора является наличие разрывов непрерывности с периодом ( $\tau$  - время запаздывания) на его КЧХ. Это приводит к плохой обусловленности решения и система может потерять устойчивость даже при малых вариациях ( $\tau$ ). Поэтому, принят субоптимальный регулятор, обеспечивающий близкую, но гладкую переходную характеристику. Так, передаточная функция субоптимального регулятора относительно задающего воздействия имеет вид:

$$\tilde{W}_p^{opt}(p) = \frac{1}{\tilde{W}_o(p)} \cdot \frac{1}{(T_c p + 1) - e^{-p\tau}},$$

где  $W_o(p)$  - передаточная функция объекта,  $T_c$  - постоянная времени сглаживателя,  $p$ - оператор Лапласа.

Сглаживатель в АСР в виде А-звена в случае объектов с экстремальной переходной характеристикой.

Процедура настройки ПИД - регулятора начинается с определения диапазона частот приближения, поскольку форма годографа КЧХ объекта управления отличается от КЧХ субоптимального регулятора. ПФ субоптимальной замкнутой системы относительно внутреннего возмущения содержит корректирующий коэффициент ( $k$ ), который появляется в момент времени ( $2\tau$ ), для смягчения требований к динамической ошибке системы. ПФ субоптимального регулятора относительно задания и внешнего возмущения совпадают, процедура настройки ПИД - регулятора производится относительно двух каналов – задания и внутреннего возмущения. В целом, процедура настройки модели регулятора предусматривает определение: диапазона частот приближения ( $\omega$ ); постоянной сглаживателя ( $T_c$ ); корректирующего коэффициента ( $k$ ) (по каналу внутреннего возмущения).

### Основная часть

В качестве объекта управления принят кожухотрубный теплообменник [12], описываемый А-звеном второго порядка и звеном запаздывания с параметрами настройки:  $k_o = 1$  – коэффициент передачи объекта;  $T_1 = 4c$ ,  $T_2 = 10c$  – постоянные времени;  $\tau = 4c$  – время запаздывания.

Расчет параметров настройки относительно канала задания начинается с выбора диапазона частот приближения. На Рис. 2 показаны годографы КЧХ объекта управления и субоптимального регулятора с обозначением начального диапазона частот приближения ( $\omega$ ).

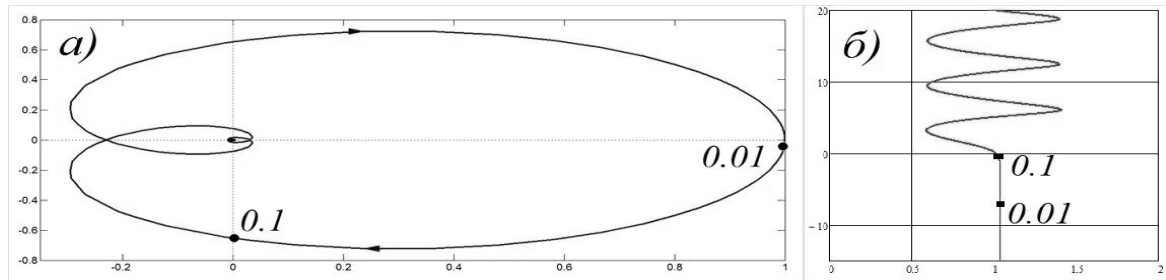


Рис. 2. Годографы КЧХ: а) – объект управления; б) – субоптимальный регулятор

Для выбора конечной частоты приближения ( $\omega_k$ ) на рис. 3 приведены графики переходных процессов при разных значениях конечной частоты приближения и постоянной времени  $T_c = 5$  с. При расширении диапазона частот приближения происходит увеличение колебательности, при этом времени регулирования не уменьшается. Значение  $\omega_k = 0.1$  рад/с обеспечивает наименьшее время достижения уставки и отсутствие перерегулирования. Т.е., выбранный диапазон частот  $\omega = 0.01 \dots 0.1$  рад/с.

Для обоснования значения ( $T_c$ ) проведено исследование качество переходного процесса (табл. 1).

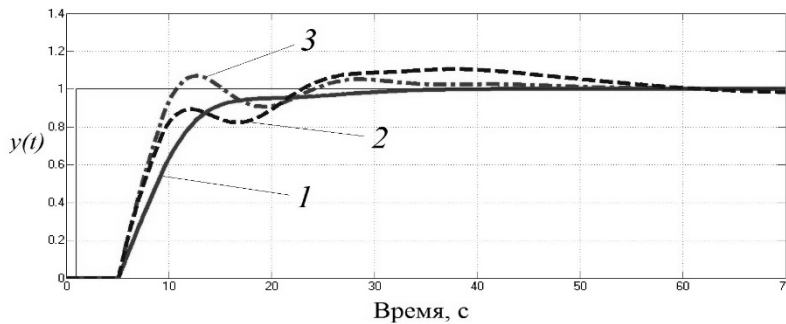


Рис. 3. Переходные характеристики АСР при  $\omega_k$ , рад/с:  
1 – 0.1; 2 – 0.4; 3 – 0.6

При увеличении постоянной времени сглаживателя перерегулирование снижается, время регулирования и интегральная квадратичная оценка увеличивается, т.о. принято  $T_c = 3$  с.

Таблица 1

Исследование влияния постоянной времени сглаживателя на качество АСР (канал задания)

| №/№ | $T_c$ | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ | $I_2$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | 2     | 2.523 | 0.166 | 9.72  | 5.76  |
| 2   | 3     | 2.141 | 0.143 | 7.951 | 5.94  |
| 3   | 5     | 1.642 | 0.111 | 5.752 | 6.70  |
| 4   | 10    | 1.036 | 0.071 | 3.394 | 9.08  |

Проведенный расчет настройки ПИД - регулятора беспоисковым методом относительно канала задания позволил сделать вывод:  $k_p = 2.141$ ,  $k_i = 0.143$ ,  $k_d = 7.951$  ( $p$ - пропорциональная,  $i$ - интегральная,  $d$ - дифференциальная составляющая,  $k$ - коэффициент пропорциональности).

Расчет параметров настройки относительно канала внутреннего возмущения начинается с выбора значения корректирующего коэффициента (рис. 4) при  $T_c = 6$  с,  $\omega = 0.01 \dots 0.1$  рад/с. Перемещение КЧХ субоптимального регулятора со смещением нижней точки диапазона частот вверх, приводит к уменьшению коэффициентов настройки регулятора и повышению запаса устойчивости системы, обеспечив при это минимальное перерегулирование. Окончательно принято  $k = 1.91$ .

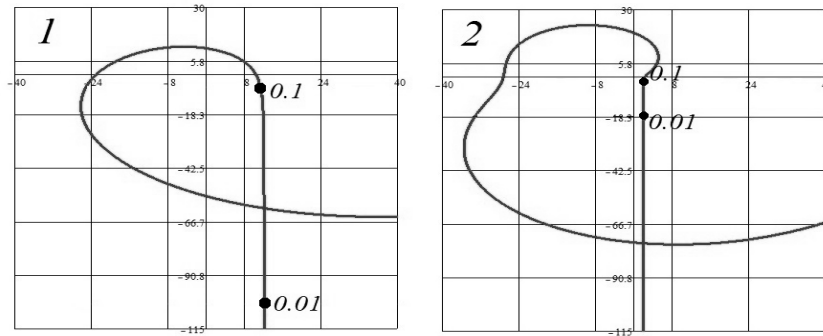


Рис. 4. Годографы КЧХ субоптимального регулятора при  $k$ : 1 – 1; 2 – 1.91

Исследования влияния постоянной сглаживателя на качество переходного процесса приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Исследование влияния постоянной времени сглаживателя на качество АСР (внутреннее возмущение)**

| №/№ | $T_c$ | $k_p$ | $k_i$ | $k_d$ | $I_2$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | 2     | 2.863 | 0.285 | 6.443 | 1.03  |
| 2   | 4     | 2.401 | 0.222 | 5.187 | 1.29  |
| 3   | 6     | 2.122 | 0.181 | 4.523 | 1.56  |
| 4   | 8     | 1.937 | 0.154 | 4.109 | 1.80  |

Оценка влияния постоянной сглаживателя соответствует проведенному выше соответствующему анализу по каналу задания и принято  $T_c = 4c$ . Параметры настройки ПИД – регулятора, полученные беспорядочным методом относительно канала внутреннего возмущения:  $k_p = 2.141$ ,  $k_i = 0.143$ ,  $k_d = 7.951$ .

Многовариантность процедуры расчета настроек регулятора определяет необходимость поиска единых настроек, удовлетворяющих различным каналам внесения воздействия. Для этого проведем сравнительное моделирование работы регулятора при различных вариантах возмущения (рис. 5).

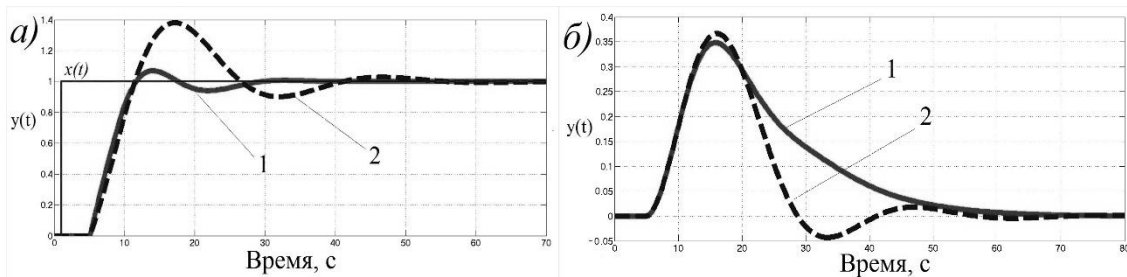


Рис. 5. Переходные характеристики при возмущении по заданию (а) и нагрузке (б) при расчете: 1 – канал задания; 2 – внутреннее возмущения

Настройки относительно задания обеспечивают повышение качества процесса регулирования при нанесении воздействия по каналу задания более, чем настройки относительно внутреннего возмущения (снижается динамическая ошибка, время регулирования). По каналу внутреннего возмущения оба варианта настройки получили примерно равные время протекания переходного процесса и динамическую ошибку. Однако, настройки относительно задания обеспечили отсутствие перерегулирования. Поэтому, рекомендуемые единственные настройки регулятора относительно задания.

**Выводы**

1. Показано, что управление объектами ГМК усложняется в результате наличия запаздывания. При построении АСР, оно является фактором определяющим структуру системы и оказывает влияние на устойчивость и качество. Настройка ПИД – регуляторов для данного класса систем являются актуальным.

2. Выполнено расчет настроек ПИД – регулятора по МНК - приближению КЧХ регулятора к частотной характеристике субоптимального регулятора в существенном диапазоне частот на основании критерия минимума интегральной квадратичной оценки для объекта, описываемого А-звеном и звеном запаздывания.

3. Обосновано переход к единственной настройке ПИД – регулятора в не зависимости от канала внесения воздействия, а также даны рекомендации по настройке модели расчета, позволяющей повысить качество и точность АСР.

**Список литературы**

1. Бородулин А.В. Домна в энергетическом измерении / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, Г.И. Орел.-Кривой Рог- 2006, 436с.
2. Швачка А.И. Развитие информационной базы АСУТП принятия решения в условиях множественного выбора / А.И. Швачка, Е.В. Титова, О.Ю. Олейник // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. –Вип. 95. – С. 41 – 46.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с., ил.
4. Wescott T. PID Without a PhD / T. Wescott. – Wescott Design Services, 2016. – 30p.
5. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления / В.Я. Ротач. – М: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
7. Бурцева Ю.С. Универсальный безпоисковый метод настройки линейных регуляторов / Ю.С. Бурцева // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. – 2014. – С. 2294-2299.
8. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления / А.А. Первозванский. – Специальная литература: Лань, 2010. – 624 с.
9. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. –Специальная литература: Лань, 2016 г. – 200 с.
10. Dovhopolyi Ya. Development of the program for self-tuning a proportal-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.
11. Pikina G. Searchless tuning of linear controllers for the minimum of quadratic criterion / G.A. Pikina, Yu.S. Burtseva // Thermal Engineering. - 2014. – Vol. 3(61). – pp. 198-202.
12. Довгополий Я.О. Аналіз корисних структурних схем ПІД-регуляторів з додатковою керуючою дією / Я.О. Довгополий, О.В. Лещенко, С.Д. Блонський // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 3. – С. 191-194.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*