

УДК 681.5.013

Степанець О.В.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Маріяш Ю.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОНАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА МІНІМУМ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЗВАЖЕНОГО В ЧАСІ МОДУЛЬНОГО КРИТЕРІЮ ЯКОСТІ РОБОТИ

У статті пропонується методика автоматичного налаштування параметрів ПІД-регулятора, що забезпечують мінімум ІТАЕ. Обґрунтовано доцільність автоналаштування ПІД-регуляторів. Проаналізовано існуючі методи автоналаштування. Наведені отримані залежності параметрів ПІД-регулятора від властивостей об'єкта керування та результати моделювання замкнутої системи автоматичного регулювання. Проводяться порівняльні дослідження із існуючим методом налаштування.

Ключові слова: автоналаштування, ІТАЕ, ідентифікація, релейний експеримент, метод налаштування, ПІД-регулятор.

Постановка проблеми. Коректне налаштування автоматичних регуляторів для забезпечення вимог технологічних процесів є однією з ключових процедур пуско-налагоджувальних робіт. Її результат прямо впливає на якість продукції, що випускається, чи на протікання процесів. Основний парк автоматичних регуляторів – близько 90% [1, с. 1261] – реалізують пропорційно-інтегрально-диференціальний (далі – ПІД) закон регулювання. 30% з них налаштовані неправильно [2, с. 8]. Так, у багатьох ПІД-контролерах диференціальна складова частина вимкнена тільки тому, що її важко правильно налаштувати. Це пов'язано з недостатньо глибокими знаннями динаміки процесу регулювання та теорії автоматичного керування персоналу, що здійснює пусконалагоджувальні роботи. Результат – некоректні параметри налаштування, що призводить до зниження ефективності управління технологічними процесами та ККД установки в цілому. Тому великі зусилля дослідників концентруються на пошуку способів мінімізації впливу людського фактору в процесі налаштування регуляторів – алгоритмів автоматичного пошуку оптимальних параметрів регулятора.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Переважна більшість способів автоматичного налаштування використовують три принципово

важливих етапи: ідентифікація, розрахунок параметрів регулятора, введення значень отриманих параметрів у регулятор [3, с. 88; 4, с. 298; 5, с. 2].

У роботах [4, с. 299; 6, с. 31] наведено методи автоналаштування, в основі алгоритму яких лежить аналітична модель, отримана з перехідної характеристики об'єкта управління. Використання аналітичних моделей потребує прийняття ряду припущень, наприклад, об'єкт описується моделлю першого або другого порядку, не враховується нелінійність об'єкта, зокрема завжди присутня нелінійність типу «обмеження», затримка в системі є транспортною, відсутність похибок диференціювання. Внаслідок прийнятих припущень з'являється похибка ідентифікації, а тому налаштування регулятора не можна вважати оптимальними. Автоналаштування параметрів регулятора, яке базується на отриманні аналітичної моделі за допомогою зняття перехідної характеристики, реалізовано у ПІД-контролерах фірми Honeywell UDC6000 [11, с. 554, 4, с. 316].

Іншим способом виконання ідентифікації є отримання частотної характеристики об'єкта з використанням релейного експерименту. Даний метод ідентифікації є найбільш розповсюдженим для автоналаштування ПІД-регулятора [1, с. 1263; 4, с. 51; 7, с. 910], в його основі лежить режим

автоколивань у системі. Переваги даного методу ідентифікації – отримання частотних характеристик об’єкта будь-якого порядку та простота реалізації. Існують твердження, що застосування режиму автоколивань є небезпечними для технологічних процесів і їх потрібно уникати [5, с. 5]. Під час проведення експериментів потрібно обмежити амплітуду автоколивань, тоді даний режим є настільки ж безпечним, як і будь-який інший тестовий сигнал.

Також існує велика кількість комерційних програмних засобів настройки регуляторів [8, с. 41]. Типова система для настройки ПІД-регулятора складається з комп’ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням під керуванням операційної системи Windows, комплекту модулів вводу-виводу і сполучних кабелів. Об’єкт включається в контур регулювання, система налаштовується бажаним способом, потім отримані коефіцієнти регулятора записуються в ПІД-контролер. Завдяки зручному для користувача інтерфейсу, значній продуктивності комп’ютера і відсутності обмежень на алгоритми ідентифікації системи, вдається отримати параметри регулятора, близькі до оптимальних.

Постановка завдання. Для розробки методу автоналаштування ПІД-регулятора потрібно вирішити такі задачі:

1. обрати типову структуру моделі об’єкта керування та межі зміни її параметрів, що характеризують область застосування методу;
2. отримати аналітичні залежності оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора від ключових точок перехідного процесу для обраного методу ідентифікації;
3. перевірити результати роботи запропонованого методу на типовому об’єкті керування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досліджень було обрано стандартну структуру ПІД-регулятора, згідно з рекомендаціями ISA [10, с. 206].

Процедура моделювання виконувалася у середовищі Matlab Simulink. Було обрано алгоритм вирішення рівнянь ode23s (stiff/mod. Rosenbrock) зі зміною величиною кроку (variable-step). Абсолютна і відносна точність розрахунків – 0,001.

За основу практичної реалізації автоналаштування взято метод Åström-Hägglund’s Relay [4, с. 302]. Цей метод автоналаштування параме-

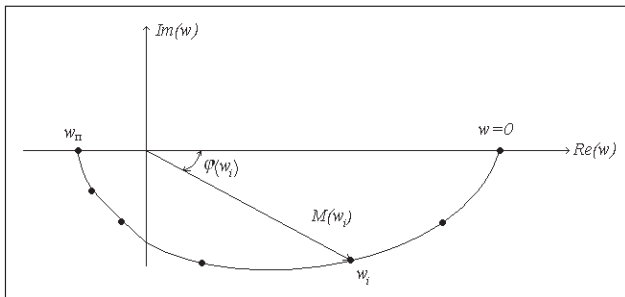


Рис. 1. Годограф АФХ системи із домінуючими аперіодичними властивостями

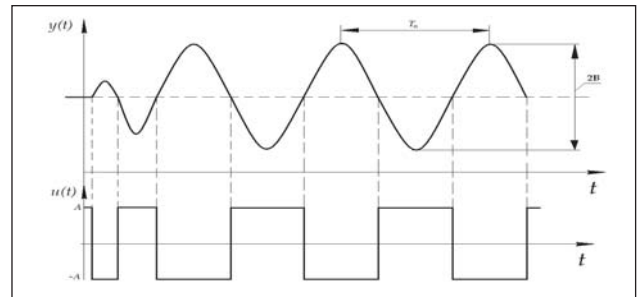


Рис. 2. Графіки експерименту з отримання точки годографа АФХ на частоті ω_L

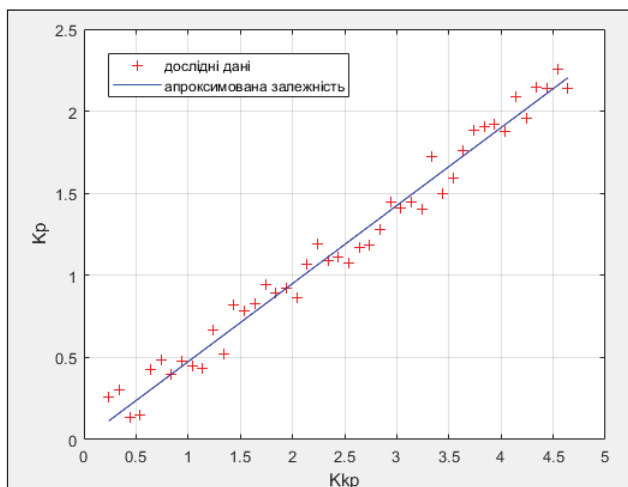


Рис. 3. Залежність коефіцієнта підсилення регулятора K_p від критичної точки K^{Kp}_p

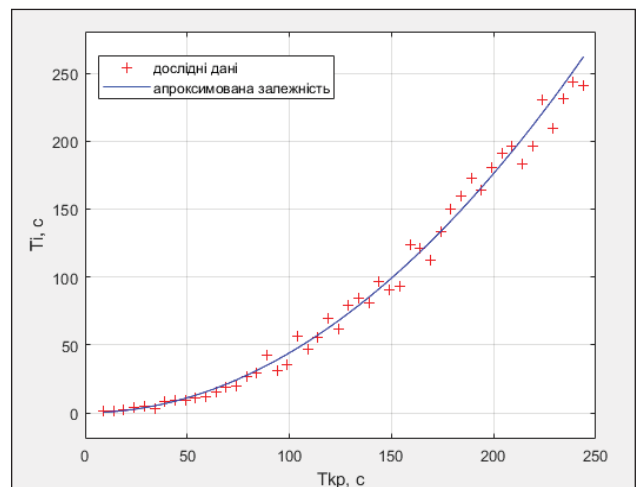


Рис. 4. Залежність сталої часу інтегрування регулятора T_i від критичної точки T^{Kp}

трів ПД-регулятора базується на дослідженні та обробці частотної характеристики об'єкта. Його суть полягає в тому, що динамічна система із домінуючими аперіодичними властивостями має властивість пропускати через себе гармонічні коливання з частотою $\omega < \omega_{зр}$ ($\omega_{зр}$ – частота зрізу) без зміни їх частоти, амплітуда та кут зсуву фаз вихідного сигналу залежить від частоти вхідного сигналу (рис. 1). Таким чином, на відміну від перехідних та імпульсних характеристик, які характеризують поведінку динамічної ланки в області частот, близьких до нуля, частотні характеристики описують властивості динамічної ланки в діапазоні частот, для яких проводяться дослідження.

У реалізованому методі автоналаштування проводиться визначення точки годографа амплітудно-фазової характеристики (далі – АФХ) динамічного об'єкта на частоті ω_l . Для цього зі сталого режиму подають вхідний тестовий сигнал заданої амплітуди (A) у будь-який бік. Після помітного відхилення вихідного сигналу від початкового сталого значення виконують перемикання вхідного сигналу на величину $2A$ у протилежному напрямку (рис. 2). Наступні перемикання вхідного сигналу виконують у ті моменти часу, коли вихідний сигнал перетинає уявну лінію свого початкового значення.

Внаслідок проведення експерименту визначаються критичні точки: K^{KP}_p та T^{KP} . Якщо розмах прямокутних імпульсів на вході об'єкта дорівнює $2A$, то амплітуда першої гармоніки на виході об'єкта – $4A/\pi$. Для визначення значення K^{KP}_p використовується формула (1):

$$K^{KP}_p = \frac{4A}{\pi B}, \quad (1)$$

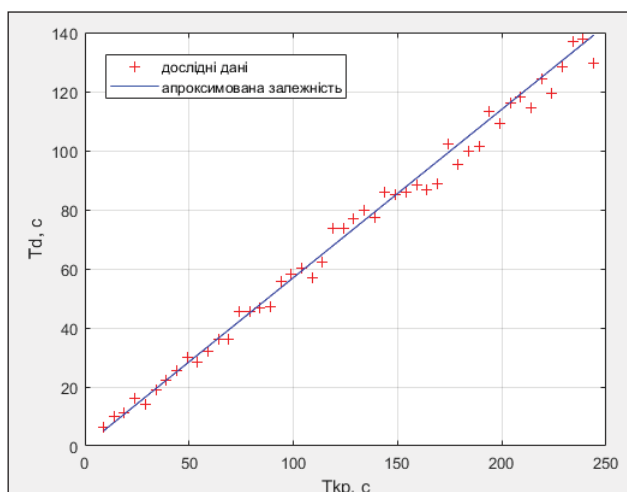


Рис. 5. Залежність сталої часу диференціювання регулятора T_d від критичної точки T^{KP}

де A – амплітуда імпульсів реле;
 B – амплітуда гармонічних коливань на виході;
 T^{KP} – чисельно дорівнює періоду гармонічних коливань у секундах.

Наступним етапом виконання автоналаштування є розрахунок параметрів налаштування ПД-регулятора. Для розрахунку цих параметрів застосовуються експрес-методи [11, с. 554; 8, с. 45], що використовують типові прості інтегральні критерії.

У якості цільової функції запропонованого методу налаштування було використано інтегральний показник абсолютного розбалансу, зважений у часі (Integral of the time weighted absolute error – ІТАЕ):

$$ITAE = \int_0^{t_p} t \cdot |e(t)| dt \quad (2)$$

Якість процесу регулювання під час використання ІТАЕ визначається розбалансом, зваженим у часі. У даному показнику мінімізується вплив початку процесу регулювання, коли відхилення від уставки є досить великим, а більша увага приділяється розбалансу, що зберігається з часом. Тому ІТАЕ є показовим критерієм та використовується у багатьох методах налаштування регуляторів, оскільки приводить до більш сталих та надійних перехідних процесів [9, с. 210].

У процесі розробки експрес-методу, що забезпечує мінімум ІТАЕ (2), було виконано моделювання системи автоматичного регулювання з ПД-регулятором. Математична модель об'єкта дослідження описується інерційною ланкою першого порядку з транспортним запізненням (3):

$$W_{об}(s) = \frac{K_{об}}{T_{об}s + 1} e^{-\tau_{об}s} \quad (3)$$

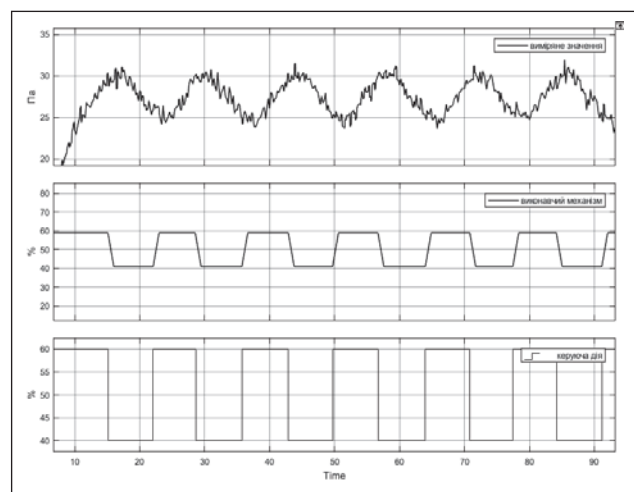


Рис. 6. Перехідні процеси автоналаштування ПД-регулятора системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату

Параметри налаштування ПІД-регулятора було знайдено за допомогою модифікованого методу Ньютона. Цільова функція – ІТАЕ. Масив дослідних даних було отримано шляхом варіації динамічних властивостей об'єкта ($K_{об} \in [0.05...10]$; $T_{об} \in [2...500]$; $\tau_{об} \in [0...100]$). Для кожного варіанту визначалися критичні точки (K^{KP}_p , T^{KP}) й оптимальні параметри налаштування ПІД-регулятора.

Внаслідок моделювання було отримано залежності параметрів налаштування регулятора, що забезпечують мінімум ІТАЕ, від критичних точок K^{KP}_p та T^{KP} (рис. 3–5).

Отримані масиви дослідних даних (рис. 3–5) апроксимовані залежностями (4) параметрів налаштування ПІД-регулятора від критичних точок:

$$\begin{cases} K_p = 0.46 \cdot K^{KP}_p, \\ T_i = 0.0045 \cdot (T^{KP})^2 + 0.3 \cdot T^{KP}, \\ T_d = 0.57 \cdot T^{KP}. \end{cases} \quad (4)$$

Середня квадратична похибка апроксимації не перевищує 3%, що є прийнятним для практичного застосування.

Перевірку якості роботи методу налаштування виконаємо на прикладі типового для теплоенергетики об'єкта – котлоагрегата, а саме контура регулювання розрідження в топці котла.

Наявність незначного розрідження у верхній топці котла потрібне для забезпечення стійкості полум'я у зоні горіння, виведення димових газів із котла. Проблеми регулювання розрідження в топці котла – наявність високочастотних шумів при вимірах, зовнішнього збурення, зміна витрати повітря та внутрішнього збурення, порушення газоповітряного режиму. Об'єкт керування за каналом «частота обертів димососа – розрідження у топці котла» має передавальну функцію [12, с. 241]:

$$W_{об}(s) = \frac{0,55}{5s + 1} e^{-2s} \quad (5)$$

Вихід об'єкта керування, тобто показники датчика розрідження, зашумлений із дисперсією високочастотних шумів 0,4664. Це наближає моделювання до реальних умов роботи системи автоматичного керування.

Виконаємо автоналаштування системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату. Отримані у процесі проведення активного експерименту (рис. 6) критичні точки (6):

$$\begin{cases} K^{KP}_p = 4.8, \\ T^{KP} = 14.9[c]. \end{cases} \quad (6)$$

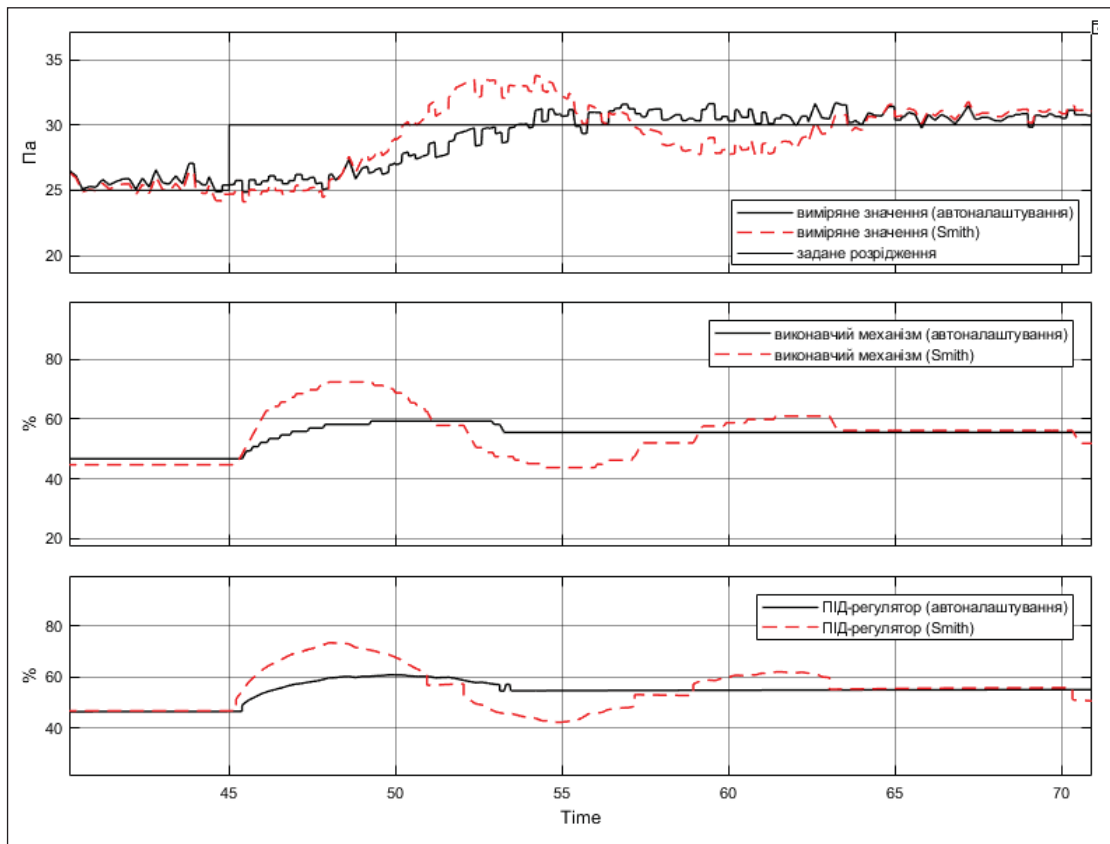


Рис. 7. Перехідні процеси системи автоматичного регулювання розрідження в топці котлоагрегату

Отримані у процесі автоналаштування параметри ПІД-регулятора (7):

$$\begin{cases} K_p = 0.46 \cdot K^{KP} = 0.46 \cdot 4.8 = 2.2 \left[\frac{\%}{Pa} \right], \\ T_i = 0.0045 \cdot (T^{KP})^2 + 0.3 \cdot T^{KP} = \\ = 0.0045 \cdot (14.9)^2 + 0.3 \cdot 14.9 = 5.47 [c], \\ T_d = 0.57 \cdot T^{KP} = 2.96 [c]. \end{cases} \quad (7)$$

Для порівняння результатів роботи запропонованого методу автоналаштування розрахуємо параметри налаштування ПІД-регулятора (8) за методикою Modified minimum ITAE – Smith [11, с. 93] та промодельємо замкнену систему автоматичного регулювання.

$$\begin{cases} K_p = \frac{0.965}{K_{об}} \cdot \left(\frac{T_{об}}{\tau_{об}} \right)^{0.855} = \frac{0.965}{0.55} \cdot \left(\frac{5}{2} \right)^{0.855} = \\ = 3.84 \left[\frac{\%}{Pa} \right], \\ T_i = 1.26 \cdot T_{об} = 6.3 [c], \\ T_d = 0.308 \cdot \tau_{об} = 0.616 [c]. \end{cases} \quad (8)$$

ITAE перехідного процесу регулювання розрідження в топці котлоагрегату з параметрами налаштування ПІД-регулятора, отриманими за допомогою автоналаштування, є на $100\% \cdot \left(1 - \frac{4976}{6005} \right) \approx 17,13\%$ меншим, ніж такий із параметрами, отриманими за допомогою експрес методу Modified minimum ITAE – Smith (рис. 7).

Знайдені за запропонованим методом параметри регулятора забезпечили більш плавне керування виконавчим механізмом.

Незважаючи на наявність автоматичного налаштування, контролер може не дати необхідної якості регулювання з причин, незалежних від якості закладених у нього алгоритмів. Наприклад, об'єкт управління може бути погано спроектований (залежні контури регулювання, велика

затримка, високий порядок об'єкта); об'єкт може бути нелінійним; датчики можуть бути розташовані не в тому місці, де потрібно, і мати поганий контакт із об'єктом, рівень перешкод у каналі вимірювання може бути неприпустимо великим; роздільна здатність датчика може бути недостатньо високою; джерело вхідного впливу на об'єкт може мати занадто велику інерційність або гістерезис; можуть бути також помилки в монтажі системи, погане заземлення, обриви провідників та ін. Тому перш, ніж починати автоматичне налаштування, необхідно переконатися у відсутності перелічених проблем.

Висновки. Розроблено метод автоналаштування ПІД-регулятора на інтегральний зважений у часі модульний критерій якості перехідного процесу для інерційного об'єкта із самовирівнюванням. Метод полягає в оцінці ключових точок перехідних процесів у релейному ідентифікаційному експерименті та подальшому застосуванні запропонованих аналітичних залежностей для пошуку оптимального набору параметрів налаштування ПІД-регулятора. Межі застосування методу відповідають більшості типових об'єктів теплової енергетики. Алгоритм пошуку оптимальних налаштувань має потенціал для реалізації в сучасних промислових контролерах у вигляді автоматичної послідовності дій, включаючи ідентифікацію об'єкта, розрахунок параметрів налаштування регулятора та встановлення отриманих значень у ПІД-регулятор.

Порівняльні дослідження з існуючим методом показали 15% покращення результатів та сприятливий вплив на динаміку роботи виконавчого механізму. Запропонований метод автоналаштування параметрів ПІД-регулятора рекомендовано застосовувати для об'єкта, реакція на збурення якого повинна мати аперіодичні властивості.

Список літератури:

1. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M. A multi-layer architecture for distributed data acquisition. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2002. № 2. P. 1261–1264.
2. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief. 84 p.
3. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. СТА. 2008. № 1. С. 86–99.
4. Åström K.J., Hägglund's T. Advanced PID control. The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005. 461 p.
5. Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования. Промышленные АСУ и контролеры. 2004. № 7. С. 1–7.
6. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 10. С. 30–33.
7. Cai W. J., Fang Y., Wang Y. G. Robust closed-loop process identification from step test. Control, Automation, Robotics and Vision Conference (2004, 6–9 December). P. 907–912.

8. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. 2006. P. 41–54.
9. Seborg D.E., Edgar Th.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. 2016. 512 p.
10. Terrence Blevins, Mark Nixon Control Loop Foundation: batch and continuous processes, 2011. 406 p.
11. O'dwyer A. Handbook Of Pi And Pid Controller Tuning Rules (3rd Edition). World Scientific, 2009. 624 p.
12. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1981. 368 с.

АВТОНАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА НА МИНИМУМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЗВЕШЕННОГО ВО ВРЕМЕНИ МОДУЛЬНОГО КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ

В статье предлагается методика автоматической настройки параметров ПИД-регулятора, обеспечивающих минимум ИТАЕ. Обоснована целесообразность автонастройки ПИД-регуляторов. Проанализированы существующие методы автонастройки. Предоставляются полученные зависимости параметров ПИД-регулятора от свойств объекта управления и результаты моделирования замкнутой системы автоматического регулирования. Проводятся сравнительные исследования с существующим методом настройки.

Ключевые слова: автонастройка, ИТАЕ, идентификация, релейный эксперимент, метод настройки, ПИД-регулятор.

AUTO-TUNING METHOD OF THE PID CONTROLLER BASED ON THE MINIMUM OF INTEGRAL TIME WEIGHTED ABSOLUTE ERROR

The scientific article proposes a method for automatic adjustment of parameters of the PID-controller, providing a minimum of ITAE. The justification of the expediency of auto-adjustment of PID-regulators is given. An analysis of existing self-adjusting methods is underway. The obtained dependences of the parameters of the PID-regulator on the properties of the control object and the results of the simulation of the closed-loop automatic control system are given. Comparative studies are conducted with the existing setup method.

Key words: auto-tuning, ITAE, identification, relay experiment, setup method, PID-controller.