УДК 621.314.26

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПІ-РЕГУЛЯТОРА СТРУМУ ДУГИ ЗАСОБАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

ВЕРЕЩАГО Є.М. канд. техн. наук, доцент, професор кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: venmkua@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4370-7706;

КОСТЮЧЕНКО В.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2128-2388;

ДЖАНГИРОВ М.В. аспірант кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: max.dzhangirov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1272-194X;

ЄРЕМЕНКО А.П. старший викладач кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: andrii.yeremenko@nuos.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8392-7623;

СТОГНІЄНКО Є.В. аспірант кафедри морського приладобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: yevhen.stohniienko@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6769-8784;

Мета роботи. *Сформувати комп'ютерну модель перетворювача, що працює на плазмову дугу, та визначити оптимальні значення коефіцієнтів ПІ-регулятора струму, що забезпечує оптимальне перемикання між режимами його роботи та високу якість процесів керування. При цьому використовувати програмні засоби MATLAB / Simulink.*

Методи дослідження. *Метод комп'ютерного моделювання, метод поділу – оптимальної фільтрації та оптимального детермінованого керування та методи налаштування регуляторів.*

Отримані результати. *Сформовано багаторівневу модель, визначено значення параметрів налаштування ПІ-регулятора струму, при якому в перетворювачі постійного струму спостерігається оптимальне перемикання між режимами його роботи та висока якість процесів керування. Аналітичні методи визначення параметрів PI-регулятора не дозволяють отримати оптимальні налаштування, оскільки базуються на сильно спрощених моделях, але їх застосування є необхідним для отримання попередніх налаштувань, без яких точне налаштування може зайняти багато часу. Встановлено, що оптимальний регулятор надає оптимальну протидію збуренням на вході та виході об'єкта та компенсує зміни параметрів аналогічним чином. Система має задовільний перехідний процес при ненульових початкових умовах у відповідь на заданий еталонний вплив і на зміну заданої точки, має хороші характеристики стійкості та мало чутлива до збурень та змін параметрів об'єкта.*

Наукова новизна*. Запропоновано підхід до визначення безперервної лінійної моделі силового перетворювача електричної енергії та наведено оптимальний вибір параметрів налаштування регулятора його системи керування, що становлять основу побудови будь-якої системи електроживлення плазмотрона, при яких забезпечується задана точність регулювання та швидкодії.*

Практична цінність. *Запропонований принцип вирішення задачі визначення коефіцієнтів ПІ-регуляторів може бути застосований для різних динамічних об'єктів, опис яких допустимо за допомогою лінійних та диференціальних рівнянь. Представлені в роботі результати можуть бути використані для проектування імпульсних джерел живлення для електротехнологій.*

Ключові слова: система керування; робастна система; налаштування регулятора; плазмова дуга; оптимізація; комп'ютерна модель; ПІ-регулятор; визначення параметрів регулятора.

I. ВСТУП

Задача ефективного керування технологічними процесами, як і раніше, залишається актуальною. Одним із складових факторів комплексної проблеми завдання керування є автоматична підтримка технологічних параметрів на заданому рівні. З цією метою широко використовують у промисловості типові ПІД-регулятори.

© Верещаго Є.М., Костюченко В.І., Джангиров М.В., Єременко А.П., Стогнієнко Є.В., 2025
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License **(CC-BY-CA 4.0)**
DOI https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-1

Причинами їх високої популярності є простота побудови та промислового використання, вивченість властивостей та принципу дії, робастність у різних умовах роботи, а також придатність для вирішення більшості практичних завдань, низька вартість.

Водночас для реалізації своїх переваг типові регулятори вимагають налаштування. Налаштування ПІД-регулятора (визначення набору коефіцієнтів посилення, що забезпечують найкращу роботу замкнутої системи) є складним завданням. Зазвичай регулятори налаштовують вручну чи за допомогою формалізованих ітеративних процедур. Ручні методи забирають багато часу, а формалізовані ітеративні процедури не завжди сумісні, наприклад, з нестійкими об'єктами або з об'єктами з малою постійною часу.

Саме тому за даними Австрійської компанії «*B&R Industrie-Elektronik*» [1] лише 16 % регуляторів, що обслуговують промисловість, працюють добре, ще 16 % працюють відносно нормально, майже 32 % – погано або абияк і 36 % взагалі управляються вручну (рис. 1).

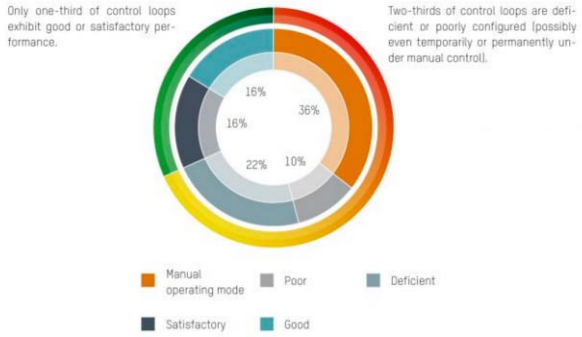


Рисунок 1. Діаграма використання методів налаштування

Незважаючи на досягнуті результати в галузі конструювання ПІД-регуляторів та накопичений досвід їх практичного застосування, у виборі параметрів продовжують використовуватися емпіричні методи. Основною проблемою при налаштуванні коефіцієнтів ПІД-регулятора є складність встановлення відповідності між показниками якості та робастності системи та коефіцієнтами регулятора [2], [3].

У цій роботі розглядаються і досліджуються деякі методи налаштування ПІ-регуляторів на конкретному прикладі і здійснюється оптимальне проектування ПІ-регулятора, що самоналаштовується в замкнутій системі регулювання струму дуги, використовучи програмні засоби *MATLAB* / *Simulink*.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для налаштування промислових контролерів використовуються формульні методи [2], [3], що дозволяють здійснити налаштування по кривій розгону, отриманої експериментально. Ці методи зарекомендували себе простотою використання та часто використовуються для налаштування регуляторів [7], [8]. Але вони вимагають наявності адекватної моделі об'єкта керування [2], [3], що відбиває його зміну у всіх режимах роботи.

Можлива побудова регулятора, використовуючи сучасні апаратне та програмне забезпечення, спираючись на реальні передавальні функції, що описують різні технологічні процеси.

Автоматизоване налаштування параметрів виконується нижче за допомогою відомих інструментів *System Control Designer* з пакету *MATLAB*.

Довгий час налаштування параметрів регулятора здійснювалося евристичним ручним методом, що базується на інтуїції [9], [10].

Цікаво і важливо відзначити також, що оптимальне настроювання лінійних промислових регуляторів є багатокроковою процедурою [2] і дуже трудомістке. Саме тому за даними американської фірми *FOXBORO* (роботи Ф. Шінслі) у США 80 % лінійних регуляторів, які обслуговують промисловість, налаштовані не оптимально.

У 90 – 95 % типів [1] регуляторів, які в даний час експлуатуються в різних галузях народного господарства, використано ПІД-алгоритм. При цьому 90 % їх працюють як ПІ-регулятори.

Вони мають такі переваги:

1. Забезпечують нульову статичну помилку регулювання (підтримка постійного струму за зміни напруги на навантаженні).

2. Досить прості в налаштуванні (налаштовуються лише два параметри: k_p та T_i). У такому регуляторі є можливість оптимізації $k_p / T_i \rightarrow$ max, що забезпечує керування з мінімально можливою середньоквадратичною помилкою регулювання [3].

3. Мають малу чутливість до шумів у каналі виміру.

Коефіцієнт стабілізації (статичний) в ідеалі (без урахування похибки інтегратора та інших елементів) та вихідний опір стабілізатора струму дорівнюють нескінченності, оскільки зміни вихідного струму при зміні навантаження буде повністю компенсовано інтегральною складовою регулятора [11], [12].

Хоча за точністю контур стабілізації з додатковим регулюванням по інтегралу не залишає бажати кращого, за динамічними властивостями він дуже далекий від ідеалу [3].

При виборі типу регулятора рекомендується орієнтуватись на величину відношення запізнення до постійної часу об'єкта T_μ / τ [3]. Відношення T_μ / τ іноді називають характеристичним коефіцієнтом або відносним запізненням об'єкта регулювання. Оскільки

T_μ / τ = 0,07742 < 0,2, можна вибрати релейний, безперервний чи цифровий, *PI* чи *PID* регулятор.

У подальшому викладі зупинимося тільки на ПІ-регуляторі, оскільки саме цей тип регулятора є найпоширенішим на практиці [13], [14] (застосування диференціюючої складової передбачає застосування фільтрів).

Починаючи з 2015 року кількість отриманих патентів у сфері розробки автоматичних регуляторів неухильно зростає [4].

За кількістю отриманих патентів у класах *G*0511/06, *G*05*B*11/36 та *G*05*B*11/42 першість належить виключно Японії та Китаю. Крім того, стабільну динаміку щодо кількості отриманих патентів зберігають США, Південна Корея та країни Західної Європи. Вони належать як до способів налаштування ПІД-регуляторів, так і до прикладних завдань їх застосування.

III. МЕТА РОБОТИ

Сформувати комп'ютерну модель перетворювача, що працює на плазмову дугу та визначити оптимальні значення коефіцієнтів ПІ-регулятора струму, що забезпечує оптимальне перемикання між режимами його роботи та високу якість процесів керування, використовуючи програмні засоби *MATLAB / Simulink*.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Динамічна модель імпульсного перетворювача напруги постійного струму. Незмінна частина системи «джерело живлення (струму) – електрична дуга» (нескоригована безперервна частина системи) в більшості практичних випадків може бути приведена до інерційної ланки із запізненням (апроксимована *FOPDT*-моделлю [5, 6]), передатна функція (ПФ) якої має вид [5, 6]

$$W_{\text{н}}(s) = \frac{k_0 e^{-T_\mu s}}{\tau s + 1}\ , \qquad (1)$$

де $k_0 = (R_{\text{дс}} / (r_\Sigma + R_{\text{дф0}}))n_{TV} U_{\text{вх}} k_{\text{ШІМ}} k_i$ – коефіцієнт посилення незмінної частини; $\tau = L/(r_\Sigma + R_{\text{дф0}})$ – постійна часу ланцюга навантаження; T_μ – час запізнення перетворювача, що визначаються на околиці номінального режиму роботи об'єкта. У ПФ $W_{\text{н}}(s)$ включаються коефіцієнти посилення силової частини, датчика та підсилювача сигналу датчика струму та ШІМ.

Адекватність отриманої моделі перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на електричну дугу, як ланки системи автоматичного керування, наведена в [5].

Для ПФ (1) такі параметри [5]: $k_0 = 5{,}083$; $\tau = 248 \cdot 10^{-6}$ с; $T = 19{,}2 \cdot 10^{-6}$ с.

Дослідження методів налаштування параметрів ПІ-регулятора. До найбільш популярних методів налаштування ПІД-регуляторів належать методи Зіглера-Нікольса, Коена-Куна, метод внутрішнього модельного керування, метод Санда-Маді та ін [2, 7]. Нижче у цій статті використовуємо лише найпоширеніші з них, такі як *AMIGO*, А.П. Копеловича, Зіглера-Нікольса, Лямбда, Чьена-Хронеса-Резвіка [2, 7].

Лямбда налаштування (*Lambda Tuning*) - $T_{cl} = T, 2T, 3T$. Нехай задана (бажана) передатна функція замкнутої системи визначається виразом

$$\Phi^*(s) = \frac{1}{1 + sT_{cl}} e^{-sL}\ ,$$

де $L = \tau$ – затримка; $T_{cl} = \lambda_F T$ – постійна часу замкнутого контуру: $\lambda_F = 3$ (робастне налаштування), $\lambda_F < 1$ (агресивне налаштування).

Шукана передатна функція коригувального пристрою в даному випадку має вигляд:

$$R(s) = W^{-1}(s) \cdot \frac{\Phi^*(s)}{1 - \Phi^*(s)} = \frac{1 + sT}{k(1 + sT_{cl} - e^{-sL})}\ . \qquad (2)$$

Величину e^{-sL} можна приблизно визначити так: $e^{-sL} \approx 1 - sL$. Отже, із формули (2)

$$R(s) = \frac{1 + sT}{k(L + T_{cl})s} = \frac{T}{k(L + T_{cl})}\left(1 + \frac{1}{sT}\right).$$

Тоді будемо мати [7] *PI*-регулятор із параметрами

$$k_p = \frac{1}{k} \cdot \frac{T}{L + T_{cl}},\ k_i = \frac{1}{k(L + T_{cl})},\ T_i = T\ .$$

Можливо краще вибрати параметр налаштування T_{cl} пропорційним *L*.

– *Skogestad SIMC*. Бажана ПФ та сама. Параметри *PI*-регулятора дорівнюють

$$k_p = \frac{1}{k} \cdot \frac{T}{L + T_{cl}},\ T_i = \min(T, 4(T_{cl} + L))\ ,$$

а для $SIMC_{++}$

$$k_p = \frac{1}{k} \cdot \frac{T + L/3}{L + T_{cl}}\ ,$$

$$T_i = \min(T + L/3, 4(T_{cl} + L)),\ T_{cl} = \lambda L\ .$$

– *Tore's One Third Rule* (*правило однієї третини*).

Для цього варіанта

$$k_p = \frac{1}{3k},\ T_i = T + \frac{L}{3}.$$

– *AMIGO* (M_s, $M_{t\text{-}1,4}$). Параметри налаштування при цьому рівні [2, 7]

$$k_p = \frac{0{,}15}{k} + \left(0{,}35 - \frac{LT}{(L+T)^2}\right) \cdot \frac{T}{kL},$$

$$T_i = 0{,}35L + \frac{13LT^2}{T^2 + 12LT + 7L^2}.$$

– *Метод А.П. Копеловича* (*аперіодичне налаштування*). Параметри регулятора будуть

$$k_p = \frac{0{,}6T}{k\tau},\ T_i = 0{,}6T.$$

– *Ziegler-Nichols step* [8]:

$$k_p = 0{,}9/a = 0{,}9\frac{T}{\tau k},\ T_i = 3L/k = 3{,}3\tau.$$

Алгоритм метода Зіглера-Нікольса полягає в наступному:

1. Визначається перехідна характеристика об'єкта та її похідна за моделлю об'єкта в *Simulink* (рис. 2, 3).

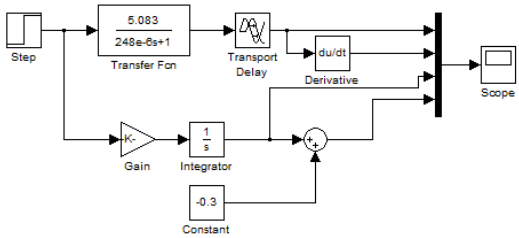


Рисунок 2. Модель для дослідження розімкнутої системи

2. Потім будуємо дотичну до перехідної характеристики у точці перегину (апроксимуючу пряму для даної характеристики) (рис. 3).

3. За відгуком моделі (рис. 3) визначаємо базові розрахункові параметри:

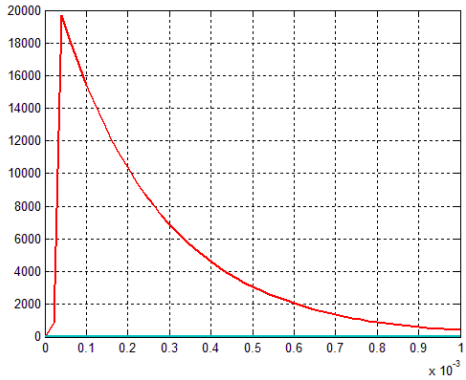
$a = 0{,}3935$, $h'_{\max} = 19600$, $L = 19{,}2 \cdot 10^{-6}$ с – величина зсуву апроксимуючої прямої по осі абсцис.

– *Метод CHR (Chien, Hrones & Reswick)* [2, 7]. По відгуку зміну уставки (без перерегулювання) коефіцієнти *PI*-регулятора: $k_p = 0{,}35 / a$, $T_i = 1{,}2L / k$.

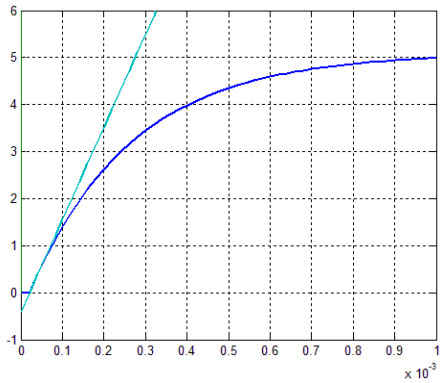
Значення розрахованих значень налаштувань наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Значення розрахованих параметрів типового регулятора

Метод	k_p	T_i
AMIGO	0,7494	$133{,}357 \cdot 10^{-6}$
Копеловича	1,5247	$148{,}8 \cdot 10^{-6}$
Ziegler-Nichols	2,287	$63{,}36 \cdot 10^{-6}$
Lambda	0,6055	$822{,}4 \cdot 10^{-6}$
Skogestad SIMC	0,3776	$248 \cdot 10^{-6}$
Tore's One Third Rule	0,06558	$254{,}4 \cdot 10^{-6}$
CHR	0,8894	$4{,}5328 \cdot 10^{-6}$



а)



б)

Рисунок 3. Імпульсна (а) та перехідна (б) характеристики об'єкта керування, апроксимуюча пряма до перехідної характеристики

Порівнюючи методи налаштування, цікаво та важливо відзначити наступне:

1. Метод налаштування *AMIGO* має більш високі показники швидкодії та малий час регулювання порівняно з іншими методами налаштування.

2. Метод *Ziegler-Nichols* використовує всього два параметри: *a* і *L* і дозволяє отримати надійні, але далекі від оптимальних параметри налаштування регулятора.

3. На відміну від *Ziegler-Nichols* (як критерій якості налаштування використовували декремент загасання, рівний 4), *Chien*, *Hrones i Reswick* (*CHR*) використовували критерій максимальної швидкості наростання за відсутності перерегулювання або за наявності не більше 20 % перерегулювання [2, 7]. Пропорційний коефіцієнт у методі *CHR* менший, ніж у методі *Ziegler-Nichols*.

4. Метод А.П. Копеловича забезпечує дуже низьку швидкодію за відсутності перерегулювання.

5. *SIMC – Skogestad*: ймовірно найкращі у певних випадках прості правила налаштування *PID*-

регуляторів у світі [7].

За результатами проведеного дослідження встановлено, що в даному випадку найкращу початкову пропозицію дають методи *Ziegler-Nichols*, *AMIGO* та А.П. Копеловича.

Визначення параметрів налаштування ПІ-регулятора, що самоналаштовується. Якість оцінки параметрів регулятора можна підвищити за рахунок використання сучасних засобів моделювання та застосування спеціальних інструментаріїв обчислювальних середовищ. У середовищі, наприклад, *MATLAB / Simulink* для налаштування параметрів регуляторів розроблено інструмент *PID Tuner* програми *System Control Designer.*

Перейдемо тепер до оптимізації параметрів регулятора. Для цієї мети скористаємося інструментами параметричної оптимізації *Check Step Response Characteristics* (*CSRC*) та *PID Tuner* програми *System Control Designer* [16].

Алгоритм динамічної оптимізації (налаштування), реалізований в інструменті *CSRC*, дозволяє встановити задані значення показників якості системи та підібрати параметри моделі системи керування з регулятором, що самоналаштовується, що забезпечують виконання заданих вимог. У *PID Tuner* параметри ПІ-регулятора обчислюються автоматично для заданих (встановлених) показників якості або для відповідності обраної еталонної моделі.

Вимоги до якості керування в *PID Tuner* задаються чисельними значеннями часу регулювання та оцінкою робастності у часовій області, або частотою зрізу та запасом стійкості по фазі в частотній області. Якщо врахувати, що об'єкт керування схильний до значних змін або розробнику точно не відомі параметри об'єкта, слід збільшити коефіцієнт робастності або запас стійкості по фазі.

Якщо результат початкового проекту не відповідає заданим вимогам, то в інтерактивному режимі можна виконати підстроювання. *PID Tuner* для цього (удосконалення контролера) дає дві опції *Domain*:

– *Time* область – використання повзунка *Response Time* для того, щоб зробити реакцію керування на вплив, що задає, швидше або повільніше, і застосування повзунка *Transient Behavior* для того щоб зробити регулятор більш агресивним при придушенні перешкод або зміні параметрів об'єкта керування.

– *Frequency* – використання повзунка *Bandwidth* для того, щоб зробити реакцію системи більш швидкою або повільною та використання повзунка *Phase Margin* для зменшення впливу перешкод (протидії) та відхилень параметрів регулювання та стеження.

Важливо наголосити, що в обох режимах має бути знайдено компроміс між ефективним придушенням перешкод та відстеженням уставки.

Для налаштування параметрів ПІ-регулятора в середовищі *MATLAB / Simulink* побудуємо модель системи керування з регулятором, що самоналаштовується, наведену нижче на рис. 4 та доповнену блоками вхідного ступінчастого сигналу *Step* по каналу завдання, виведення графіка вихідної величини *Scope* та оптимізації параметрів регулятора *Check Step Response Characteristics* [16]. Для оптимізації параметрів регулятора скористаємось інструментом *PID Tuner*. У цьому додатку параметри ПІ-регулятора визначаються автоматично (обчислюються) для встановлених показників якості або відповідності обраної еталонної моделі. Вимоги до якості керування задаємо чисельними значеннями часу перехідного процесу та оцінкою робастності у часовій області, або частотою зрізу та запасом стійкості по фазі в частотній області.

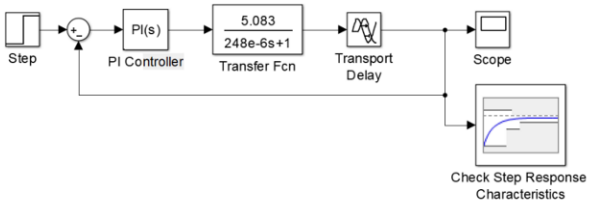


Рисунок 4. Модель системи керування струмом дуги з ПІ-регулятором, який самоналаштовується, при ступінчастому впливі

Даний інструмент (*PID Tuner*) не призначений для роботи з немінімально-фазовими ланками. Для вирішення задачі скористаємося апроксимацією експоненційної функції e^{-s} до ряду Тейлора (апроксимацією Паде) в околиці точки $t = 0$:

$$e^{-s} = 1 - s + \frac{s^2}{2!} - \frac{s^3}{3!} + \frac{s^4}{4!} + \dots .$$

Зазвичай при моделюванні СК достатньо застосування апроксимації Паде низьких порядків – першого та другого [3]:

$$e^{-s} = \frac{e^{-\frac{s}{2}}}{e^{\frac{s}{2}}} \approx \frac{1 - \frac{1}{2}s}{1 + \frac{1}{2}s}; \quad e^{-s} \approx \frac{1 - \frac{1}{2}s + \frac{1}{2}s^2}{1 + \frac{1}{2}s + \frac{1}{2}s^2}.$$

Проілюструємо можливість використання апроксимації Паде.

На рис. 5 наведено графіки перехідних процесів у моделі об'єкта із затримкою та апроксимуючим елементом (рис. 6).

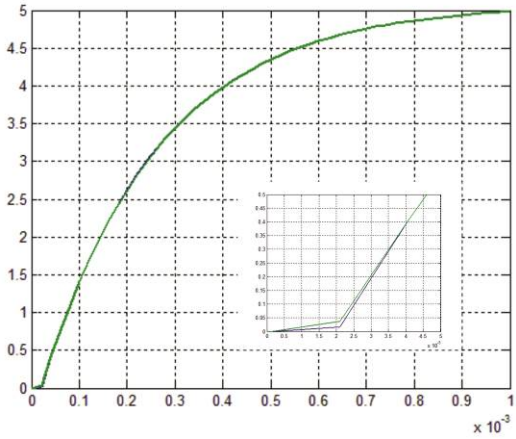


Рисунок 5. Перехідні характеристики об'єкта керування з транспортною затримкою та апроксимуючим елементом 1-го порядку

Як видно із рис. 5, використання апроксимуючої функції другого або вищих порядків не є необхідним.

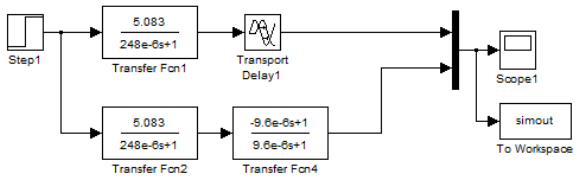


Рисунок 6. Модель для дослідження об'єкта керування

Отже, завдання налаштування регулятора струму можна сформулювати так. Нехай регульованою та вимірюваною змінною є струм дуги.

Задамо необхідні показники якості системи: час регулювання не більше $1{,}6\cdot10^{-4}$ с, перерегулювання не більше 4,3 %, статична помилка відсутня і коефіцієнт робастності дорівнює 0,6.

Вимагаємо також, щоб запаси по модулю та фазі та показник коливальності задовольняли співвідношенням

$$L \geq 2,\ \varphi_з \geq 45°,\ M \leq 2.$$

Запустимо процес оптимізації параметрів регулятора. Після його закінчення отримаємо графік оптимального, що задовольняє прийнятим обмеженням, перехідного процесу системи керування з ПІ-регулятором, що самоналаштовується.

Знайдені процедурою автоматичного підстроювання в *MATLAB*, згідно з зазначеними вимогами, параметри регулятора мають такі значення: $k_P = 1{,}271$, $k_I = 5123$.

На рис. 7 представлені перехідні характеристики системи керування з оптимальними параметрами регулятора (з ПІ-регулятором, що самоналаштовується). Показники якості системи керування з отриманими параметрами регулятора становлять: перерегулювання 4 %, час перехідного процесу 0,16 мс.

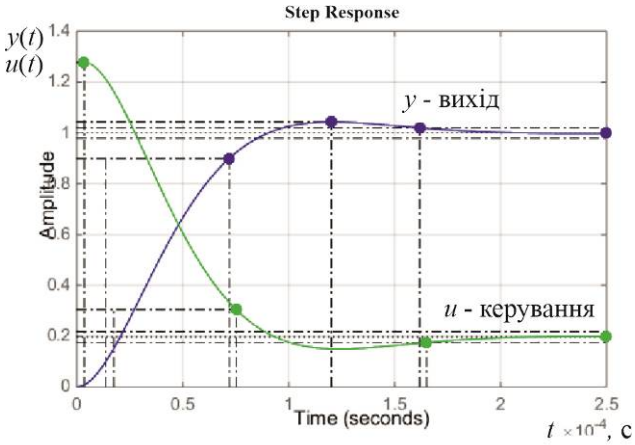


Рисунок 7. Траєкторія стану $i(t)$ та керуючий сигнал $u(t)$ системи керування струмом дуги

На рис. 8 наведено результати аналізу системи стабілізації струму дуги.

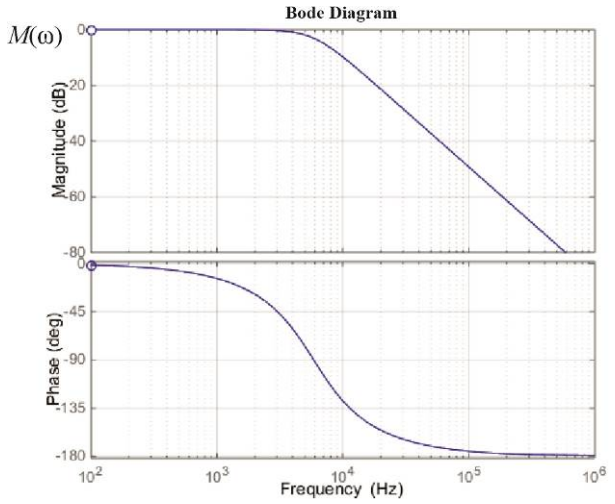
З наведених на цьому рисунку графіків випливає, що стабілізатор струму дуги має наступні частотні властивості: $\varphi_з = 65{,}5°$, $\omega_{зр} = 2{,}37\cdot10^4$ 1/с, $L \to \infty$, $M = 1$, а час регулювання $t_{рег}$ і перерегулювання менше заданих (практично збігаються з заданими). Слід зазначити, що в результаті багаторічного досвіду експлуатації різних систем регулювання встановлено та рекомендовано для використання при проектуванні нових систем такі значення запасів стійкості та показника коливання [3]: $\varphi_з = 30\ldots60°$; $L^* = 2\ldots10$; $M^* = 1{,}3\ldots2$.

Розглянута система є робастною, оскільки має запас стійкості по амплітуді та запас стійкості за фазою, необхідні для цього [3].

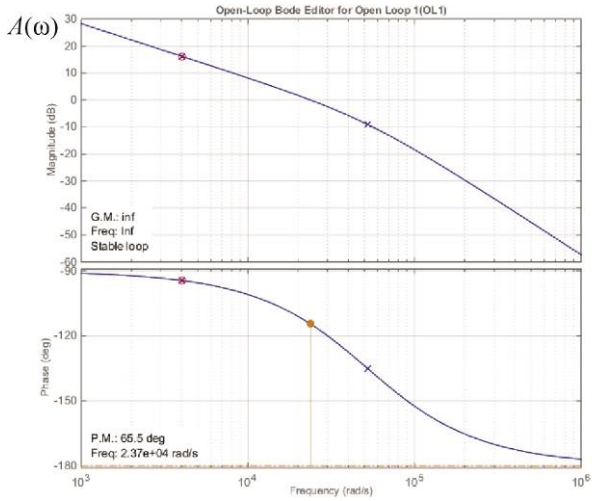
Дослідимо вплив збурень на систему керування струмом дуги. На рис. 9 представлені логарифмічні частотні характеристики функції чутливості $|S(j\omega)|$ даної системи керування за наявності збурень, прикладених до входу об'єкта керування $S_1(j\omega)$ та його виходу $S_2(j\omega)$. Зауважимо, що оскільки $S_2(j\omega)$ визначається виразом

$$S(j\omega) = \frac{1}{J(j\omega)} = \frac{1}{1 + W(j\omega)R(j\omega)},$$

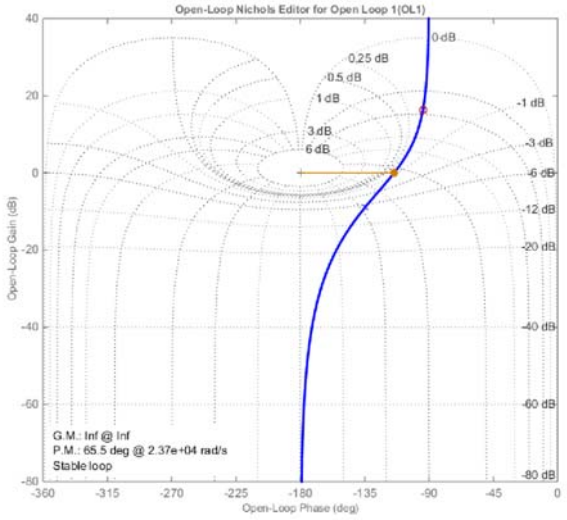
де $J(j\omega)$ – функція зворотної різниці; $W(j\omega)R(j\omega)$ – контурна ПФ, або ПФ по петлі зворотного зв'язку (петльове посилення), то остання визначає і чутливість автоматичної системи по відношенню до керованого об'єкта (зв'язує відносну зміну передатної функції об'єкта $W(s)$ з відносною зміною передатної функції системи керування $\Phi(s)$), що виходить внаслідок цього.



а)



б)



в)

Рисунок 8. Основні характеристики системи: амплітудно- та фазочастотна (розімкнутої та замкнутої систем), Нікольса

З рисунка видно, що оптимальний регулятор забезпечує протидію всім збуренням та зміні параметрів аж до частоти 4 кГц.

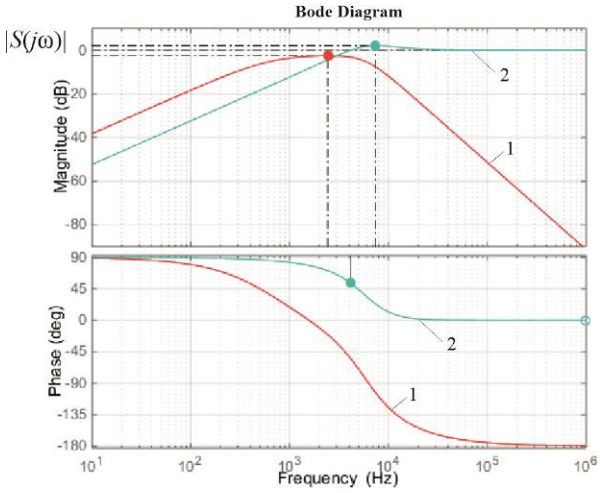


Рисунок 9. Частотні характеристики функцій чутливості: 1 – dy/y; 2 – du/y

Функції чутливості цієї системи при $\omega = 0$ $S(0) = 0$, регулятор повністю придушує постійні збурення (перешкоди, зміна навантаження).

На рис. 10 наведено графіки перехідних процесів у стабілізаторі струму дуги, збудженому стрибкоподібною зміною навантаження (напруга на дузі) та перешкоди вимірювання.

Зауважимо, що оскільки в даному випадку коефіцієнт посилення ребра, що передає обурення на вхід об'єкта, становить відповідно [5, 6] 0,1626, помилка збурення або в даному випадку відхилення вихідної координати, викликане збуренням, становить 0,106, то придушення збурення може бути покращено більш ніж у 6 разів порівняно з рис. 10.

Таким чином, розв'язано задачу $R_{y/f} \to \min$. Тут $R_{y/f}$ – реактивність замкнутої системи чи міра неінваріантності заданого виходу y щодо заданого входу f.

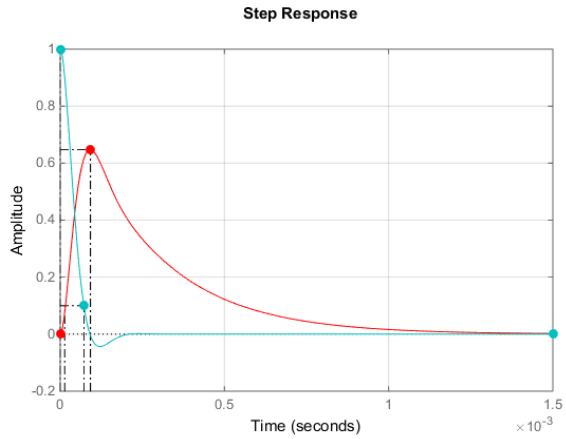


Рисунок 10. Ступінчасті зовнішнє обурення та перешкода вимірювання з оптимальним регулятором

Для більшого запасу стійкості по фазі зменшимо величину k_P. Приймемо $k_P = 0{,}6045$.

На рис. 11 показана перехідна функція синтезованої системи регулятора з $k_P = 0{,}6045$. Перехідна функція при тому ж регуляторі, але у випадку $k_P = 0{,}6045$, має перерегулювання не більше 14 %, що підтверджує правильність вибору запасу за фазою, швидкодія зменшується. Логарифмічні частотні характеристики та годограф Нікольса для цього випадку представлені на рис. 12. Зауважимо, що запас по фазі тепер дорівнює 60°.

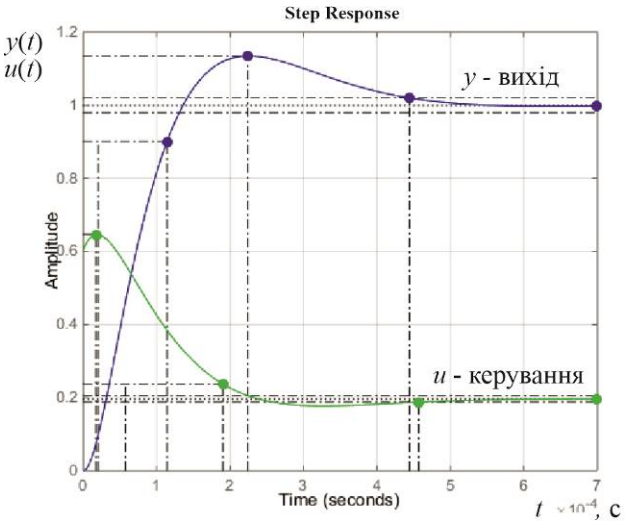
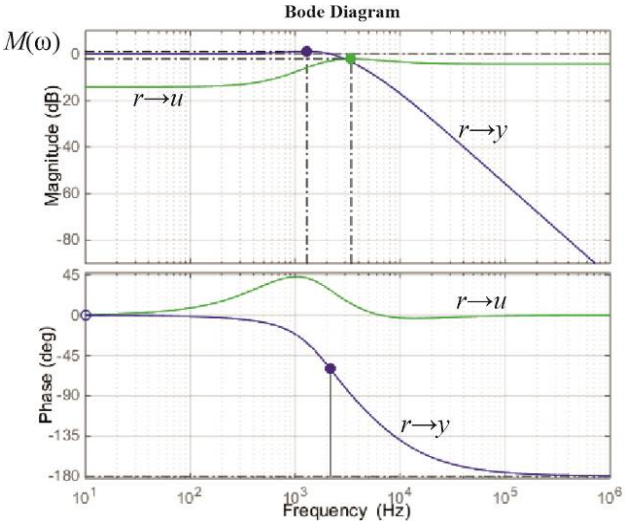
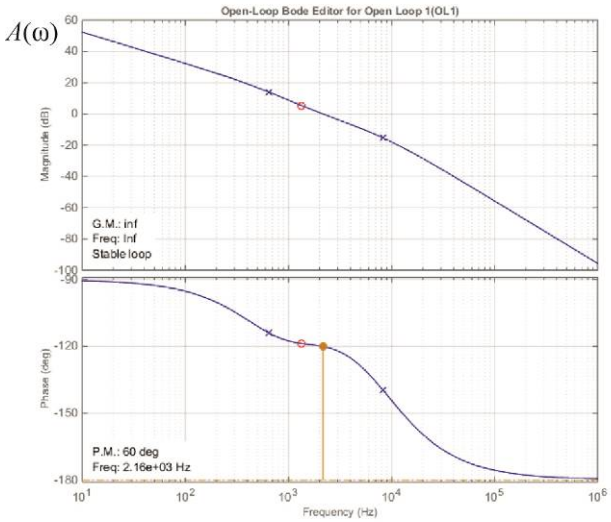


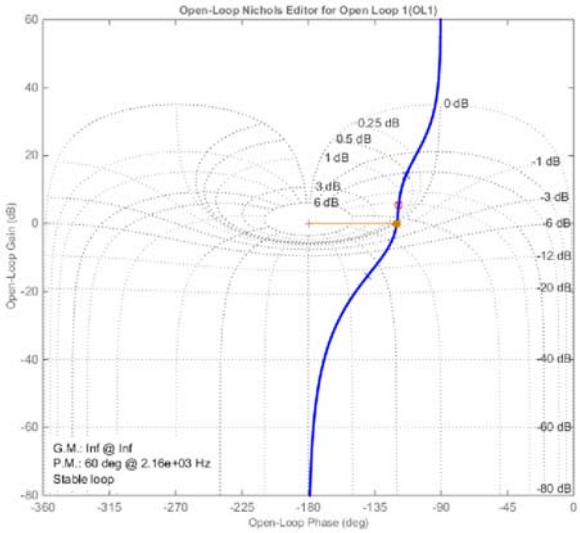
Рисунок 11. Перехідні процеси у замкнутій системі з регулятором при $k_P = 0{,}6045$



а)



б)



в)

Рисунок 12. Основні характеристики системи: амплітудно- та фазочастотна (розімкнутої та замкнутої систем), Нікольса

З наведених на цих рисунках графіків випливає, що оптимальний стабілізатор струму має слідучі частотні властивості:

$$\varphi_з \geq 60°,\ L \to \infty,\ \omega_{зр} = 13{,}56 \cdot 10^3\ с^{-1}.$$

Тепер, якщо $k_P = 0{,}6045$, то діаграми Боде $|S(j\omega)|$ мають вигляд (рис. 13). Очевидно, що смуга частот, у якій придушуються збурення, стає [0 – 1 кГц].

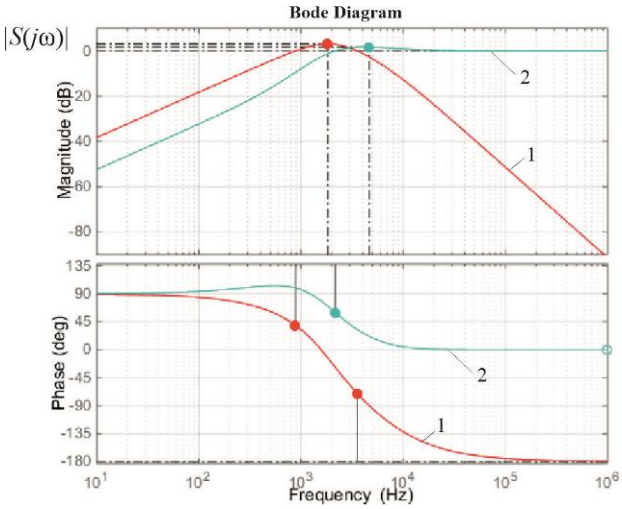


Рисунок 13. Діаграми Боде для функцій чутливості: 1 – *du*/*y*; 2 – *dy*/*y*

V. ВИСНОВКИ

Аналітичні методи визначення параметрів *PI*-регулятора не дозволяють отримати оптимальні налаштування, оскільки базуються на сильно спрощених моделях, але їх застосування є необхідним для отримання попередніх налаштувань, без яких точне налаштування може зайняти багато часу.

Встановлено, що оптимальний регулятор надає оптимальну протидію збуренням на вході та виході об'єкта та компенсує зміни параметрів аналогічним чином. Система має задовільний перехідний процес при ненульових початкових умовах у відповідь на заданий еталонний вплив і на зміну заданої точки, має хороші характеристики стійкості та мало чутлива до збурень та змін параметрів об'єкта.

Представлені в роботі результати можуть бути використані для проектування імпульсних джерел живлення для електротехнологій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] B&R Industrie-Elektronik GmbH. https://pdf.directindustry.com/pdf/b-r-industrie-elektronik/innovation.

[2] Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.

[3] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems. Pearson Education Limited, 2022. 1024 p.

[4] Beginner's search https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=einsteiger (доступ 26.06.2024)

[5] Аналіз перетворювача постійного струму, що працює на плазмову дугу / Є.М. Верещаго, В.І. Костюченко, С.М. Новогрецький // Електротехніка і електромеханіка, 2023, №5, 31–36. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05

[6] Synthesis of a Control System of a Pulse Converter for Plasmatron Power Supply / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, Y. Stohniienko // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). P.394-397. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312905

[7] Åström K.J., Murray R.M. Feedback Systems: an Introduction for Scientists and engineers. New Jersey: Princeton University press, 2008.

[8] Zigler J.G. and Nichols N.B. Optimum settings for Automatic Controllers. – Trans. ASME. 1942. Vol.64. P.759-768.

[9] O'Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules / O'Dwyer // Ireland: Imperial College Press. – 3rd edition. – 2009. – 623 p.

[10] Åström K.J. Benchmark Systems for PID Control / K.J. Åström, T. Hägglund // International Federation of Automatic Control – 2000. – P. 165–166.

[11] Розроблення оптимальних автоматичних регуляторів. Монографія / Ю.О. Ромасевич, В.С. Ловейкін, А.П. Ляшко, О.Г. Шевчук, В.В. Макарець. – К.: ЦП „КОМПРІНТ", 2021. – 250 с.

[12] Romasevych Yu. PI-controller tuning optimization via PSO-based technique /Yu. Romasevych, V. Loveikin, S. Usenko // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY – R. 95 NR 7/2019. – P. 33–37.

[13] Ya-Gang Wang. Hui-He Shao. Automatic tuning of optimal PI controllers. / Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on Volume: 4. P. 3802 – 3803. DOI: 10.1109/CDC.1999.827947

[14] Egorov V.A., Egorova J.G. The typical settings for automatic control systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 200. P. 177–186. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_19

[15] Керування динамікою імпульсного перетворювача з м'яким перемиканням, що працює на дугове навантаження / Є.М. Верещаго, В.І. Костюченко, Є.В. Стогнієнко, А.Ю. Грєшнов // Технічна електродинаміка.– 2024. – № 6. – С. 21 – 30. https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021

[16] Дьяконов В.П. *MATLAB*. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

Надійшла (Received) 17.04.2025;
Прийнята (Accepted) 12.05.2025;
Опублікована (Published) 14.06.2025;

OPTIMIZATION OF ARC CURRENT PI REGULATOR PARAMETERS BY SOFRWARE MODELING

VERESHCHAGO Y.M. PhD, Professor of the Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: venmkua@gmail.com.,ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4370-7706;

KOSTIUCHENKO V.I. PhD, Associate Professor of the Department of Marine Electric Power Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2128-2388;

DZHANHYROV M.V. PhD student of Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: max.dzhangirov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1272-194X;

YEREMENKO A.P. Senior lecturer of the Department of Marine Instruments of Admiral Makarov National Shipbuilding University, Mykolayiv, Ukraine, e-mail: andrii.yeremenko@nuos.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8392-7623;

STOHNIIENKO Y.V. PhD student of Department of Marine Instrument, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yevhen.stohniienko@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6769-8784;

Purpose. *To create a computer model of a plasma arc converter and determine the optimal values of the coefficients of the PI current regulator, which ensures optimal switching between its operating modes and high quality of control processes. In this case, use MATLAB / Simulink software tools*

Methodology. Computer simulation method, separation method – optimal filtering and optimal deterministic control and methods for adjusting regulators.

Findings. *A multilevel model was formed, the values of the PI current regulator tuning parameters were determined, at which the DC-DC converter observes optimal switching between its operating modes and high quality of control processes. Analytical methods for determining the PI regulator parameters do not allow obtaining optimal settings, since they are based on highly simplified models, but their use is necessary to obtain preliminary settings, without which accurate tuning can take a long time. It was established that the optimal regulator provides optimal resistance to disturbances at the input and output of the object and compensates for changes in parameters in a similar way. The system has a satisfactory transient process under non-zero initial conditions in response to a given reference influence and to a change in the set point, has good stability characteristics and is not very sensitive to disturbances and changes in the parameters of the object.*

Originality*. An approach to determining a continuous linear model of a power converter of electrical energy is proposed and the optimal choice of parameters for setting the regulator of its control system is given, which form the basis for constructing any plasma torch power supply system, which ensures the specified accuracy of regulation and speed of operation.*

Practical value. *The proposed principle of solving the problem of determining the coefficients of PI regulators can be applied to various dynamic objects, the description of which is permissible using linear and differential equations. The results presented in the work can be used for the design of pulsed power supplies for electrical technologies.*

Keywords: control system; robust system; regulator settings; plasma arc; optimization; computer model; PI regulator; determination of regulator parameters

REFERENCES

[1] B&R Industrie-Elektronik GmbH. https://pdf.directindustry.com/pdf/b-r-industrie-elektronik/innovation.

[2] Åström K.J., Hägglund T. (2006) Advanced PID Control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 460.

[3] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. (2022). Modern Control Systems. Pearson Education Limited, 1024.

[4] Beginner's search https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=einsteiger (access 26.06.2024)

[5] Je.M. Vereshhago, V.I. Kostjuchenko, S.M. Novogrec'kyj. (2023). Analiz peretvorjuvacha postijnogo strumu, shho pracjuje na plazmovu dugu. // *Electrical engineering and electromechanics*, 5, 31–36. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.05

[6] E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, Y. Stohniienko. (2023). Synthesis of a Control System of a Pulse Converter for Plasmatron Power Supply. *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology* (*KhPIWeek*). 394-397. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312905

[7] Åström K.J., Murray R.M. (2008). Feedback Systems: an Introduction for Scientists and engineers.

New Jersey: Princeton University press.

[8] Zigler J.G. and Nichols N.B. (1942) Optimum settings for Automatic Controllers. Trans. ASME. 64. 759-768.

[9] O'Dwyer. (2009). Handbook of PI and PID controller tuning rules. Ireland: Imperial College Press. – 3rd edition. 623.

[10] Åström K.J., T. Hägglund. (2000). Benchmark Systems for PID Control. International Federation of Automatic Control. 165–166.

[11] Ju.O. Romasevych, V.S. Lovejkin, A.P. Ljashko, O.G. Shevchuk, V.V. Makarec'. (2021). Rozroblennja optymal'nyh avtomatychnyh reguljatoriv. Monografija. K.: CP „KOMPRINT", 250.

[12] Romasevych Yu., Loveikin V., Usenko S. (2019). PI-controller tuning optimization via PSO-based technique. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. R. 95 NR 7. 33–37.

[13] Ya-Gang Wang. Hui-He Shao. (1999). Automatic tuning of optimal PI controllers. *Decision and Control. Proceedings of the 38th IEEE Conference*. 4. 3802 – 3803. DOI: 10.1109/CDC.1999.827947

[14] Egorov V.A., Egorova J.G. (2021). The typical settings for automatic control systems. Lecture Notes in Net-works and Systems. 200. 177–186. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_19

[15] Je.M. Vereshhago, V.I. Kostjuchenko, Je.V. Stognijenko, A.Ju. Grjeshnov. (2024). Keruvannja dynamikoju impul'snogo peretvorjuvacha z m'jakym peremykannjam, shho pracjuje na dugove navantazhennja. *Technical electrodynamics.* 6. 21 – 30. https://doi.org/10.15407/techned2024.06.021

[16] D'jakonov V.P. (2012). MATLAB. Polnyj samouchitel'. Moscow: DMK Press, 768. (in Russian.)