

УДК 621.31:681.51.01; 004.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.4.67.1>

КОМПЕНСАЦІЯ ЗАПІЗНЕННЯ І СТАЛИХ ЧАСУ МОТОРНИХ РЕАКЦІЙ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА

Олексій Чорний

професор кафедри систем автоматичного управління та електроприводу,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,
Кременчук, Полтавська обл., Україна, 39600, aleksei.chornyi@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8270-3284

Валерій Титюк

професор кафедри електромеханіки,
Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.,
Україна, 50000, dinalt2006@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7364-630X

Віктор Бушер

професор кафедри електротехніки та електроніки,
Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона, 8, Одеса, Україна, 65000,
victor.v.bousher@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3268-7519

Володимир Грабко

професор кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті,
Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21000,
vgrabko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4666-1758

Олександр Братко

магістрант кафедри систем автоматичного управління та електроприводу,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20,
Кременчук, Полтавська обл., Україна, 39600, sahsa.bratko@gmail.com
ORCID: 0000-0005-7657-1998

Статтю присвячено питанню коректування моторних характеристик людини-оператора, який здійснює дистанційне керування електромеханічними об'єктами. Об'єктами дистанційного керування можуть бути екскаватори, бурові станки, автосамосвали, а також безпілотні літальні апарати. **Мета.** Мета дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні структури та синтезу регулятора, що дасть змогу компенсувати запізнення моторних реакцій оператора та його сталих часу. **Методи.** У статті проведено комплексний аналіз регуляторів систем керування, які компенсують запізнення реакції на вхідний сигнал у вигляді сходинок. Обґрунтовано структуру вибраного регулятора у вигляді Smith Predictor+PID. **Оригінальність.** Регулятор Smith Predictor+PID є найкращим варіантом для систем із запізненням, якщо модель об'єкта відома з високою точністю. Однак, якщо модель неточна, можуть виникати значні похибки. Оригінальність досліджень полягає у тому, що вони ґрунтуються на експериментальних дослідженнях, проведених у групі респондентів під час відпрацювання тестових траєкторій. **Результати.** Отримані теоретичні результати перевірені розрахунками з використанням статистичних методів аналізу. Результати експериментів проаналізовані, отримана узагальнена експериментальна модель людини-оператора. Розраховані кількісні параметри, проаналізовані похибки роботи системи за відхилень у параметрах моделі або параметрах регулятора. Обґрунтовано структурну схему керування з регулятором і перемиканням за умовою. Доведено робастність отриманого алгоритму компенсації запізнення оператора і сталих часу. **Практична цінність.** Отримані параметри регуляторів і методика їх налаштування можуть бути використані для побудови систем керування дистанційними електромеханічними об'єктами та підвищують точність і ефективність відпрацювання завдань.

Ключові слова: регулятор, компенсація запізнення, моторні реакції, людина-оператор, дистанційне керування.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій і систем дистанційного керування БПЛА й іншими електротехнічними, електромеханічними об'єктами все більшу актуальність набуває підготовка операторів дистанційного керування. Це фахівці, які взаємодіють у системі людина – машина та виконують функції оператора, запускаючи й управляючи системою. Особливо це відчувається зараз, коли Україна веде війну з російськими загарбниками. Щоденно на захист відправляються десятки БПЛА, причому деякі з них є керованими для підвищення точності ураження живої сили та військової техніки противника. Такі БПЛА або дрони наводяться за наперед визначеною траєкторією польоту, а відслідковування здійснюється за допомогою оптичних камер. Оператори постійно перебувають в умовах психологічної напруги, адже в умовах війни вони мають підвищене стресогенне навантаження, яке є результатом виникнення у них інтенсивних емоційних реакцій, спричинених невизначеністю умов, відповідальністю за точність наведення, що негативно впливає на точність виконуваних моторних реакцій: збільшує затримку реакції на сигнал, затягує процеси, або, навпаки, рухи стають різкими й неточними.

Зараз у всьому світі спостерігається розвиток технологій побудови БПЛА, способів керування ними, розвиток систем радіоелектронної боротьби з БПЛА (РЕБ), створення боєкомплектів: бомб, ракет тощо, які можуть нести БПЛА. І тому відчувається брак операторів, здатних якісно виконувати бойові задачі, відбір для контингенту для підготовки операторів здійснюється переважно на основі фізичних показників, а психологічні залишаються поза увагою.

Отже, актуальність цієї проблеми у світлі сьогодення України, відсутність досліджень, присвячених коректуванню моторних реакцій людини-оператора з урахуванням його психологічних особливостей, і зумовили вибір мети роботи.

Мета дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та синтезі регулятора, який дасть змогу компенсувати запізнення реакцій оператора та сталих часу його моторних реакцій.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для побудови моделі реакцій оператора були проведені експериментальні дослідження. В експерименті взяли участь 20 респондентів, які, працюючи на розробленій авторами моделі MATLAB/Simulink (рис. 1), за допомогою джойстика відслідковували генерований сигнал у вигляді сходинки. Причому параметри сходинки: амплітуда

і час – формувалися випадково. Респонденти були відібрані за темпераментом: сангвіністичного і флегматичного типів; силою нервової системи: сильного і середнього типів; способом мислення: предметно-дієвого й абстрактно-символічного типів. Кожен із респондентів зробив 5 спроб, а загальна кількість становила 100 спроб.

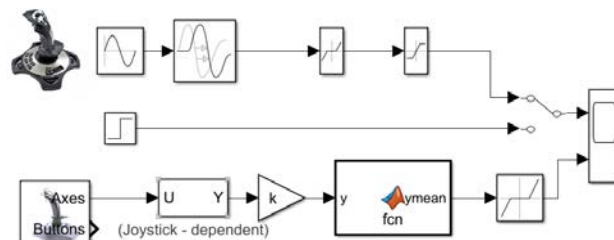


Рис. 1. Модель MATLAB/Simulink
для проведення експериментальних досліджень

У процесі досліджень використовувався джойстик типу Logitech Extreme 3D Pro L942-000031, рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд джойстику Logitech Extreme 3D Pro L942-000031, який використовувався в експериментальному дослідженні

Реєстрація дій оператора записувалася до спеціальної змінної в MATLAB Workspace. На рис. 3 показані приклади реакції оператора на відпрацювання зовнішнього завдання у вигляді сходинки в розробленій моделі.

Розглянемо задачу обробки результатів ідентифікації експерименту: як краще усереднювати експериментальні криві, а потім проводити ідентифікацію отриманої еквівалентної кривої, чи проводити ідентифікацію всіх отриманих кривих, а потім усереднювати результати ідентифікації. Потрібно враховувати, що криві отримані як результат відпрацювання оператором тестової траєкторії і існують варіації кривих, але вони викликані лише деякими особливостями кожної людини, а не фізичною сутністю.

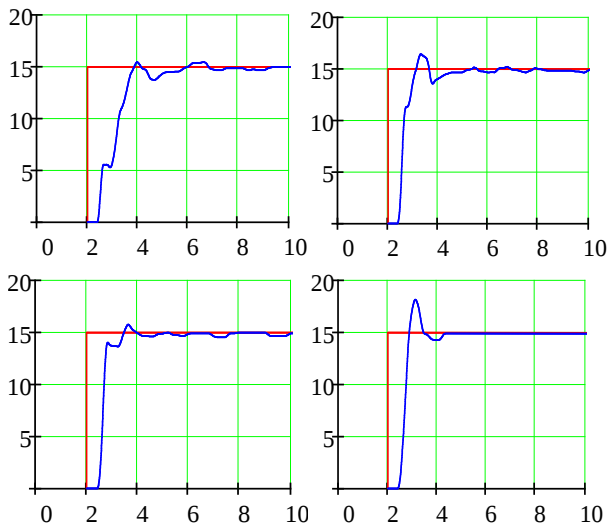


Рис. 3. Приклади дій операторів під час проведення експерименту

Оскільки варіації кривих спричинені особливостями кожного оператора, а не фізичною сутністю системи, ми маємо справу з *людським фактором*, а не із суттєвими відмінностями в поведінці самої системи [1]. Це змінює підхід до усереднення: тепер потрібно мінімізувати вплив індивідуальних особливостей операторів, а не зберігати цю варіативність отриманих експериментальних кривих.

Проаналізуємо, який вплив вносить людський фактор в отримані експериментальні криві:

- варіації у поведінці оператора не відображають зміну фізичної системи, тому вони не мають бути збережені в кінцевій моделі;

- шум у кривих, викликаний індивідуальними особливостями виконання тестової траєкторії, більше нагадує випадковий або систематичний зсув, а не реальну зміну параметрів;

- індивідуальні особливості операторів можуть бути випадковими (гаусовий шум) або мати систематичний характер (упередженість у реакції, затримки тощо);

- фізична модель має бути однаковою для всіх операторів.

Таким чином, потрібно визначити метод усереднення, який мінімізує вплив відмінностей експериментальних кривих.

Оскільки відмінності між кривими викликані людськими факторами, а не реальною зміною параметрів, краще спочатку усереднити експериментальні криві, а потім проводити ідентифікацію.

Припустимо таке:

1. Якщо спочатку ідентифікувати кожну криву, а потім усереднювати параметри, то

будуть усереднені саме відмінності операторів, а не шум. Тобто вплив людського фактора залишиться в кінцевих параметрах.

2. Якщо спочатку усереднити криві, то операторські особливості «згладяться» у отриману усереднену криву краще відображатиме фізичну систему.

3. Зменшення шуму завдяки усередненню великої кількості кривих дасть змогу отримати більш точну оцінку параметрів.

4. Якщо людські особливості мають систематичний характер (наприклад, певні оператори мають схильність до повільнішої реакції), то вони згладяться за усереднення кривих.

Розглянемо обґрунтування та розв'язок задачі усереднення експериментальних кривих з урахуванням людського фактора.

Формалізація задачі. Нехай є N експериментальних кривих $y_i(t)$, отриманих від різних операторів під час відпрацювання тестової траєкторії. Кожна крива має вигляд:

$$y_i(t) = f(t, \theta_{true}) + \varepsilon_i(t) + \delta_i(t),$$

де $f(t, \theta_{true})$ – модель оператора, яка ідентифікується, $\varepsilon_i(t)$ – випадковий шум, спричинений мікрорухами, нерівномірністю виконання, $\delta_i(t)$ – систематична похибка, пов'язана з індивідуальними особливостями кожного оператора (реакція, стиль виконання, темперамент, сила нервової системи тощо).

Отримаємо точну оцінку параметрів θ_{true} , мінімізуючи вплив $\varepsilon_i(t)$ і $\bar{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(t)$.

Проведемо аналіз усереднення експериментальних кривих. Для чого знайдемо середнє значення всіх експериментальних кривих

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(t)$$

і підставимо вираз для $y_i(t)$:

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [f(t, \theta_{true}) + \varepsilon_i(t) + \delta_i(t)].$$

Розділимо суму:

$$\bar{y}(t) = f(t, \theta_{true}) + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i(t)}_{\varepsilon(t)} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i(t)}_{\delta(t)}$$

Отримане рівняння дає змогу зробити такі висновки:

- якщо шум $\varepsilon_i(t)$ є випадковим з нормальним розподілом $N(0, \sigma^2)$, то:

$$E[\bar{\varepsilon}(t)] = 0, \quad Var[\bar{\varepsilon}(t)] = \frac{\sigma^2}{N},$$

тобто шум зменшується у N разів, що робить середню криву менш зашумленою;

- якщо операторська похибка $\delta_i(t)$ є систематичною, то за достатньої кількості операторів вона має тенденцію згладжуватись:

$$\delta_i(t) \approx 0.$$

Вона буде невеликою порівняно з випадковими відхиленнями $\varepsilon_i(t)$.

Таким чином, ми отримуємо середню криву, яка максимально наближена до істинної фізичної моделі реакції оператора

$$y_i(t) \approx f(t, \theta_{true}).$$

Найкращу оцінку параметрів, з мінімальним впливом шуму та операторських відмінностей, можна знайти, використовуючи метод найменших квадратів для параметрів θ , які мінімізують відхилення моделі від середньої кривої:

$$\hat{\theta}_{avg} = \arg \min_{\theta} \sum_i (\bar{y}(t) - f(t, \theta))^2.$$

Розглянутий підхід дає стабільні параметри, які добре узагальнюють реальну поведінку оператора. Адже оскільки шум $\varepsilon_i(t)$ зменшується, то ідентифіковані параметри $\hat{\theta}_{avg}$ ближче до істинних θ_{true} , а операторські відмінності $\delta_i(t)$ не впливають на оцінку параметрів, якщо вони є випадковими.

Розглянемо підхід, коли спочатку ідентифікуються параметри кривих для кожного оператора, а потім вони усереднюються.

Для цього для кожної кривої знаходимо:

$$\hat{\theta}_i = \arg \min_{\theta} \sum_i (\bar{y}(t) - f(t, \theta))^2,$$

а потім усереднюємо параметри:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\theta}_i.$$

Недоліком такого підходу є те, що кожен оператор має свою варіацію $\delta_i(t)$, що призводить до зміщених оцінок $\hat{\theta}$. Усереднення параметрів з такими варіаціями не обов'язково дає хорошу оцінку моделі оператора. Крім того, оцінки можуть мати більшу дисперсію, що зменшує точність остаточної моделі.

Усереднену еквівалентну криву показано на рис. 4.

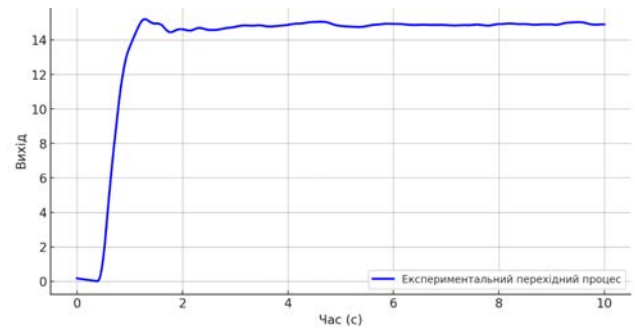


Рис. 4. Усереднена еквівалентна крива дій оператора

Остаточно зазначимо, що усереднення кривих зменшує випадкові похибки та дає більш стабільні результати, а ідентифікація параметрів усередненої кривої є кращою, оскільки вона мінімізує середню похибку, тоді як усереднення параметрів може призводити до систематичних помилок, оскільки середнє значення параметрів не враховує нелінійних ефектів. Це особливо важливо для нелінійних моделей, де пряме усереднення параметрів може дати некоректні результати.

Враховуючи м'язову модель [2], представимо модель оператора у вигляді динамічної ланки другого порядку із запізненням.

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-\tau s},$$

де $k = 0.986$ – коефіцієнт підсилення, $\omega_n = 2.19$ – частота, $\zeta = 0.678$ – коефіцієнт демпфування, $\tau = 0.441$ – стала часу запізнення, с.

Побудуємо регулятор для компенсації сталих часу і запізнення об'єкта.

Оскільки PID-регулятор використовується для управління швидкістю реакції системи і не компенсує запізнення, його використання недоцільне.

Таблиця 1

Порівняння результатів розв'язку задачі усереднення експериментальних кривих з урахуванням людського фактора

Критерій	Усереднення кривих перед ідентифікацією	Усереднення результатів ідентифікації кожної кривої
Стійкість до шуму	Висока (шум згладжується)	Низька (шум впливає на кожну оцінку)
Збереження варіацій параметрів	Варіації операторів зникають	Варіації операторів залишаються в параметрах
Дисперсія оцінок параметрів	Краще відображає реальну систему	Залежить від індивідуальних відмінностей операторів
Узагальненість моделі	Низька (завдяки згладженню шуму)	Висока (через шум у кожній оцінці)

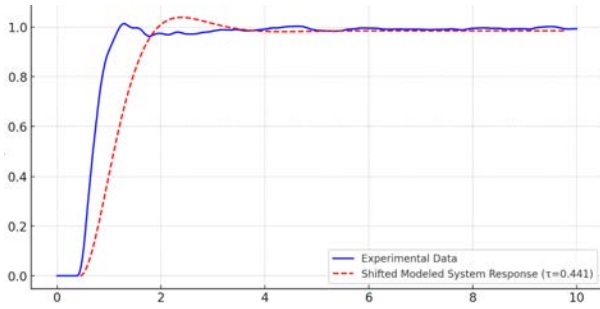


Рис. 5. Експериментальна крива і крива ідентифікованого об'єкта

Для систем із запізненням ефективними будуть такі підходи для побудови регулятора компенсації запізнення:

1. Smith Predictor + PID. Використовує класичний PID-регулятор, але компенсує запізнення через предиктор. Дає можливість системі працювати так, ніби запізнення відсутнє. Потребує точної моделі об'єкта [3–4].

2. Модельне предиктивне керування (МРС). Використовує оптимізацію у реальному часі для прогнозу поведінки об'єкта. Ідеально для об'єктів із запізненням. Високі обчислювальні витрати [5–6].

3. Lead-Lag регулятор + запізнення у зворотному зв'язку. Комбінує фазо-випереджувальний (Lead) і фазо-запізнювальний (Lag) регулятори. Дає гарний запас стійкості та компенсує вплив запізнення. Простий у реалізації [7–8].

4. ІМС-регулятор (Internal Model Control). Використовує зворотну модель об'єкта для корекції запізнення. Висока стійкість і адаптивність. Дуже добре працює для об'єктів зі значним запізненням [9–10].

Оскільки наша система має помірне запізнення (0.441 с) і другий порядок, найкращими компенсації сталих часу і запізнення будуть:

1. Smith Predictor + PID – простий у налаштуванні, ефективний для компенсації запізнення.

2. ІМС-регулятор – забезпечує компенсацію запізнення та сталі часу, гарантуючи стійкість.

Розрахуємо параметри регуляторів і виконаємо дослідження їх роботи.

Передаточна функція Smith Predictor + PID:

$$G_{SP}(s) = \frac{C(s)G_{nom}(s)}{1 + C(s)G_{nom}(s)} + (G_{actual}(s) - G_{nom}(s)),$$

де $G_{nom}(s)$ – модель без запізнення, $G_{actual}(s)$ – реальний об'єкт із запізненням, $C(s)$ – ПІД-регулятор.

Передаточна функція ПІД-регулятора:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s,$$

де $k_p = 0.984$ – коефіцієнт пропорційного підсилення, $k_i = 0.0035$ – інтегральний коефіцієнт, $k_d = 0.07$ – диференціальний коефіцієнт.

ІМС-регулятор (Internal Model Control) будується на основі внутрішньої моделі об'єкта керування. Загальний вигляд передаточної функції ІМС-регулятора визначається як:

$$G_{IMC}(s) = \frac{G_{inv}(s)}{1 + \lambda s},$$

де λ – обернена передаточна функція об'єкта, тобто зворотна модель процесу керування, λ – параметр налаштування, що визначає ступінь фільтрації та робить систему більш стійкою.

Для побудови регулятора передаточна функція об'єкта $G_{inv}(s)$ розбивається на стабільну $G_{nom}(s)$ і нестабільну $G_u(s)$ частини:

$$G(s) = G_{nom}(s)G_u(s).$$

Обернена модель визначається як:

$$G_{inv}(s) = G_{nom}^{-1}(s),$$

нестабільна частина не інвертується, щоб забезпечити стійкість. Для стійкості додається низькочастотний фільтр $(1 + \lambda s)^{-1}$, щоб уникнути нереально великих коефіцієнтів. Причому чим менше λ , тим швидше реагує регулятор, чим більше λ , тим більш стабільний регулятор, система реагує повільніше. Для побудови регулятора $\lambda = 0.5$.

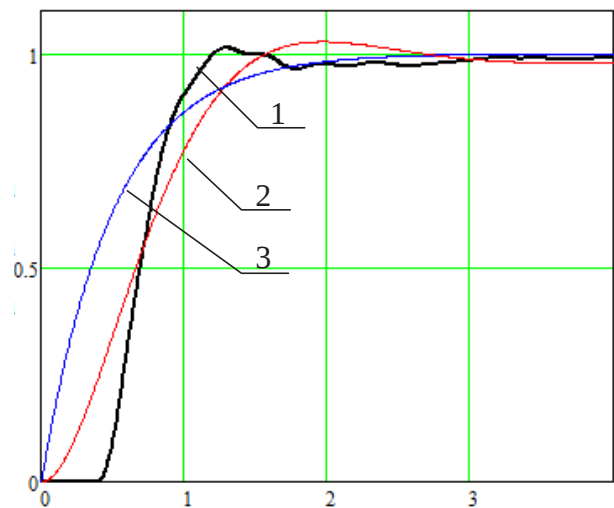


Рис. 6. Еквівалентна експериментальна крива дій оператора і перехідні процеси роботи регуляторів: 1 – еквівалентна експериментальна крива, 2 – регулятор Smith Predictor + PID, 3 – ІМС-регулятор

Аналіз показників якості роботи об'єкта з розрахованими регуляторами (табл. 1) дає змогу зро-

бити такі висновки: регулятор Smith Predictor + PID має мінімальну статичну помилку ($\approx 0,0016$), перерегулювання ($\approx 2,75\%$) трохи більше, ніж у ІМС-регулятора, час усталення ($\approx 1,475$ с) швидший, ніж у інших регуляторів, і забезпечує хороший баланс між швидкістю і точністю. ІМС-регулятор забезпечує астатизм системи і практичну відсутність перерегулювання ($\approx 0\%$), час усталення ($\approx 1,96$ с) найдовший, але дуже стабільний, що робить регулятор найкращим для стабільності та точної компенсації запізнення, але не найшвидший. PID-регулятор не є ефективним, адже не компенсує запізнення.

Таблиця 2

Показники якості регулювання

Regulator	Overshoot (%)	Steady-State Error	Settling Time (s)
Experimental Data	1,4	0,007	1,16
Smith Predictor + PID	2,752	0,002	1,475
IMC Controller	-0,0	0,0	1,96

Відомо, що Smith Predictor потребує точної моделі об'єкта [2–3]. Тож розглянемо компенсації сталих часу та запізнення оператора в разі неточного визначенні параметрів його передаточної функції за ідентифікації: $\tau + \Delta\tau$ і $\zeta + \Delta\zeta$.

Похибку роботи регулятора за зміни в моделі коефіцієнта згасання $\zeta + \Delta\zeta$ легко отримати з аналізу передаточної функції оператора без запізнення:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2(\zeta + \Delta\zeta)\omega_n s + \omega_n^2} e^{-\tau s},$$

для якої відомі аналітичні залежності: час наростання $t_r \approx \frac{1,8}{\omega_n}$, час регулювання $t_s \approx \frac{4}{(\zeta + \Delta\zeta)\omega_n}$ і перерегулювання $\sigma \approx e^{\frac{1}{\sqrt{1-(\zeta + \Delta\zeta)^2}}}$. Де видно, що в разі більш точного відпрацювання оператором завдання зменшується перерегулювання і зростає час регулювання. Виникнення цієї похибки можна пояснити більш обережними діями і плавними рухами оператора.

Знайдемо похибку роботи регулятора для випадку, коли модель має запізнення $\tau + \Delta\tau$.

Рівняння для похибки запишемо у вигляді

$$\Delta s = G(s)e^{-\tau s} - G(s)e^{-(\tau + \Delta\tau)s}.$$

Розкладемо $e^{-(\tau + \Delta\tau)s}$ у ряд Тейлора:

$$e^{-(\tau + \Delta\tau)s} = e^{-\tau s} \left(1 - \Delta\tau s + \frac{\Delta\tau^2 s^2}{2!} + \dots \right).$$

Тоді

І якщо передаточна функція регулятора з точною моделлю

$$G_{sp}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)},$$

то передаточна функція регулятора з неточною моделлю:

$$G_A(s) = \frac{G_{sp}(s)}{1 + \Delta\tau s G_{sp}(s)}.$$

Це означає, що за $\Delta\tau > 0$ регулятор запізнюється і процес стає більш повільним, якщо $\Delta\tau < 0$, регулятор діє передчасно, що призводить до збільшення перерегулювання й виникнення коливань.

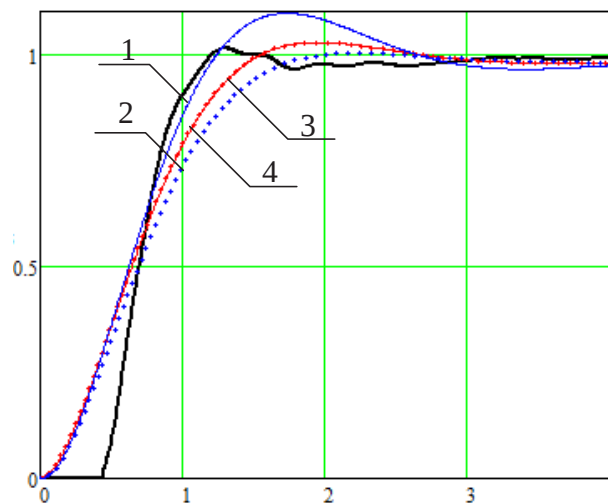


Рис. 7. Робота регулятора в разі неточної моделі оператора: 1 – $0,8\zeta$, 2 – $1,1\zeta$, 3 – $0,8\tau$, 4 – $|y_{reg} - y_{oper}| < \varepsilon$

У роботі регулятора (Smith Predictor + PID) з оператором із запізненням виникає задача перемикавання керування між джерелами сигналу: на початку керує регулятор, бо оператор ще не впливає на процес керування (оскільки є запізнення), а після певного моменту керування передається оператору.

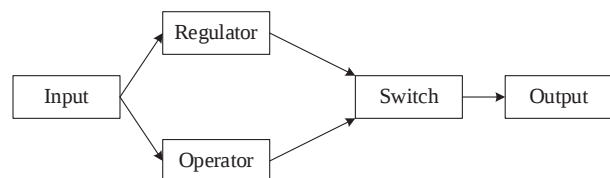


Рис. 8. Структурна схема керування з регулятором і перемиканням за умовою

Такою умовою перемикавання в точці перетину сигналів може бути

$$|Y_{reg} - Y_{oper}| < \varepsilon.$$

Таким чином, регулятор працюватиме лише до точки перемикавання, після чого роботу продовжує оператор (рис. 9).

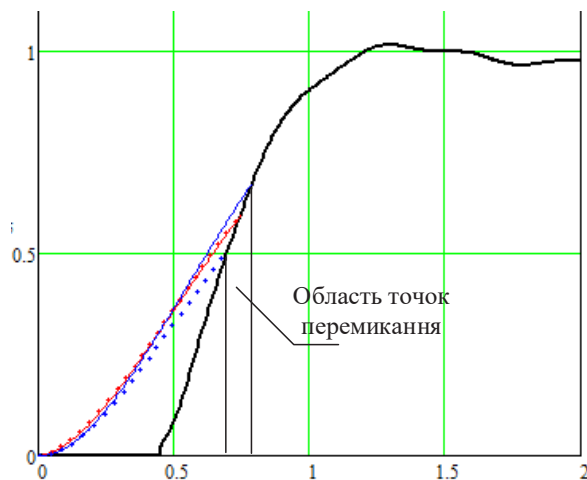


Рис. 9. Робота регуляторів до точок перемикавання

З рисунку видно, що за відхилення параметрів в моделі оператора $\pm 20\%$ ширина області точок перемикавання не перевищує 0,1 с. Це набагато менше, ніж час запізнення оператора, і, по суті, знімає обмеження для застосування точної моделі оператора.

ВИСНОВКИ. За результатами розв'язку задачі ідентифікації результатів експерименту встановлено, що найкращим підходом є спочатку усереднити криві, а потім виконати ідентифікацію. Це забезпечує більш точну оцінку параметрів фізичної системи, мінімізуючи вплив операторських відмінностей. Доведено, що такий підхід є більш коректним, оскільки він дає можливість зменшити випадковий шум, усунути вплив людського фактора, отримати параметри, які дійсно відповідають фізичній системі, а не особливостям окремих операторів.

Регулятор Smith Predictor + PID є найкращим варіантом для систем із запізненням, якщо модель об'єкта відома з високою точністю. Однак, якщо модель неточна, можуть виникати значні похибки. ІМС-регулятор (Internal Model Control) гарантує стійкість, навіть якщо модель об'єкта трохи неточна, має гладкий перехідний

процес без різких коливань. ІМС-регулятор може бути повільнішим, ніж Smith Predictor, особливо за великих запізнень. Зазвичай ІМС-регулятор краще підходить для систем із невизначеністю в параметрах моделі, забезпечуючи гарантовану стійкість. Він є компромісом між швидкістю та стабільністю.

Обґрунтовано структурну схему керування з регулятором і перемиканням за умовою, що дало змогу забезпечити робастність отриманого алгоритму компенсації запізнення оператора і сталих часу. Показано, що в разі відхилення параметрів у моделі оператора до 20%, ширина області точок перемикавання не перевищує 0,1 с. Це набагато менше, ніж час запізнення оператора, і, по суті, знімає обмеження для застосування точної моделі оператора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левчук І. Л. Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління : монографія / І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. 203 с. ISBN 978-617-7478-46-0.
2. Eysenck H.J., Eysenck M.W. Personality Typology in Relation to Muscle Strength. 2012. New York: Springer. URL: <https://www.researchgate.net>.
3. Smith O.J. Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, 53 (1957), pp. 217–219.
4. Warwick K., Rees D. Industrial Digital Control Systems, IET, 1988.
5. Rawlings, James B., Mayne, David Q., and Diehl, Moritz M., Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design (2nd Ed.), Nob Hill Publishing, LLC, ISBN 978-0975937730 (Oct. 2017).
6. Geyer, Tobias; Model predictive control of high power converters and industrial drives, Wiley, London, ISBN 978-1-119-01090-6, Nov. 2016.
7. Nise, Norman S. Control Systems Engineering (4 ed.); Wiley & Sons; 2004, ISBN 0-471-44577-0.
8. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics (2 ed.); Cambridge University Press; 2001. ISBN 0-521-37095-7.
9. Iaroslav Blagouchine and Eric Moreau. Control of a Speech Robot via an Optimum Neural-Network-Based Internal Model with Constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 1, pp. 142–159, February 2010.
10. Sensory Prediction Errors Drive Cerebellum-Dependent Adaptation of Reaching. Tseng, Diedrichsen, Krakauer, et al. *Journal of Neurophysiology*, 98:54-62, May 16, 2007.

COMPENSATING DELAY AND TIME CONSTANTS IN HUMAN OPERATOR MOTOR DYNAMICS

Oleksii Chornyi

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Systems of Automatic Control and Electric Drive,

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 University str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, 39600, alekseii.chornyi@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8270-3284

Valerii Tytiuk

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Electromechanics,

Kyryvi Rih National University, 11 Vitaliya Matuselych str., Kyryvi Rih, Dnipropetrovs'k region, Ukraine, 50000, dinalt2006@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7364-630X

Victor Busher

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Electrical Engineering and Electronics,

National University "Odessa Maritime Academy", 8 Didrikhson str., Odessa, Ukraine, 65000, victor.v.bousher@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3268-7519

Volodymyr Grabko

Professor at the Department of Electromechanical Automation Systems in Industry and Transport,

Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske Highway, Vinnytsia, Ukraine, 21000, vgrabko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4666-1758

Oleksandr Bratko

Master's Student at the Department of Systems of Automatic Control and Electric Drive,

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20 University str., Kremenchuk, Poltava region, Ukraine, sahsa.bratko@gmail.com

ORCID: 0000-0005-7657-1998

This article focuses on the issue of adjusting the motor characteristics of a human operator who performs remote control of electromechanical objects. **Purpose.** The purpose of the research is to theoretically substantiate the structure and synthesize a controller that will compensate for the operator's reaction delays and the time constants of their motor reactions. **Methodology.** The article provides a comprehensive analysis of control system controllers that compensate for reaction delays to a step input signal. The structure of the selected controller is substantiated. **Originality.** The originality of the research lies in the fact that it is based on experimental studies conducted in a group of respondents during the development of test trajectories. **Results.** The obtained theoretical results are verified by calculations using statistical analysis methods. Quantitative parameters are calculated, and system errors are analyzed for deviations in model parameters or controller parameters. The robustness of the obtained algorithm for compensating operator delays and time constants is proven. **Practical value.** The obtained controller parameters and their tuning methodology can be used in the construction of remote electromechanical object control systems and increase the accuracy and efficiency of task execution.

Key words: Controller, delay compensation, motor reactions, human operator, remote control.

REFERENCES

1. Levchuk, I.L., Manko, H. I., Tryshkin, V.Ya., Korsun, V.I. (2019). *Teoriia i praktyka identyfikatsii ob'ektiv upravlinnia: monohrafiia*. Dnipro: DVNZ UDKhTU, 203 p. ISBN 978-617-7478-46-0.
2. Eysenck, H.J., & Eysenck, M.W. (2012). *Personality Typology in Relation to Muscle Strength*. New York: Springer. Retrieved from: <https://www.researchgate.net>.
3. Smith, O.J. (1957). Closer control of loops with dead time. *Chemical Engineering Progress*, 53, 217–219.
4. Warwick K., Rees, D. *Industrial Digital Control Systems*, IET, 1988.
5. Rawlings, James B., Mayne, David Q., and Diehl, Moritz M. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design* (2nd Ed.), Nob Hill Publishing, LLC, ISBN 978-0975937730 (Oct. 2017).

6. Geyer, Tobias (2016). Model predictive control of high power converters and industrial drives, Wiley, London, ISBN 978-1-119-01090-6, Nov.
7. Nise, Norman S. (2004). Control Systems Engineering (4 ed.); Wiley & Sons; ISBN 0-471-44577-0.
8. Horowitz, P., & Hill, W. (2001). The Art of Electronics (2 ed.); Cambridge University Press; ISBN 0-521-37095-7.
9. Iaroslav Blagouchine and Eric Moreau. Control of a Speech Robot via an Optimum Neural-Network-Based Internal Model with Constraints. IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 1, pp. 142–159, February 2010.
10. Sensory Prediction Errors Drive Cerebellum-Dependent Adaptation of Reaching. Tseng, Diedrichsen, Krakauer, et al., *Journal of Neurophysiology*, 98:54-62, May 16, 2007.

Стаття надійшла 01.12.2024