

МЕТОД НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ ІЗ СУТТЄВИМИ НЕЛІНІЙНОСТЯМИ

Dr.Sci. О. Лисенко^{1[0000-0002-7276-9279]}, **Dr.Sci. О.Тачиніна**^{2[0000-0001-7081-0576]},
Ph.D. С. Пономаренко^{1[0000-0001-5512-3778]}

¹Національний технічний університет України
«КПІ ім. Ігоря Сікорського», Україна,

²Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна
EMAIL: lysenko.a.i.1952@gmail.com, tachinina5@gmail.com, sol_@ukr.net

Анотація. В статті розроблено інженерний метод налаштування (або переналаштування в процесі експлуатації) регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора, який враховує наявність суттєвих нелінійностей. Цей метод дозволяє запобігти появі «первинних автоколивань» в системі автоматичного керування електроприводами вузлів рухомості маніпулятора, що стимулюють виникнення резонансних пружних вібрацій та автоколивань (ефект автопружності). Запропонований метод дозволяє не тільки усунути причину виникнення ефекту автопружності, алей зробити це на інженерному рівні володіння математичним апаратом, системами комп'ютерної математики та навичками програмування. Прояв ефекту автопружності пов'язаний із наявністю таких факторів, як: динамічні властивості приводу вузлів рухомості; пружна гнучкість маніпуляторів; суттєві нелінійності конструктивно-технологічного характеру або такі, що виникають в процесі експлуатації в механічних та електричних пристроях. Інженерна простота та зручність методу виражається в тому, що налаштування регуляторів електроприводів вузлів рухомості при виробництві маніпулятора або їх переналаштування в процесі експлуатації не потребує спеціалізованого наукового дослідження, а може бути виконано фахівцем із інженерним рівнем математичної підготовки в інтерактивному режимі за короткий час.

Ключові слова: система автоматичного керування, ПД – регулятор, суттєва нелінійність, чисельні методи оптимізації, комп'ютерна математична модель, антена спрямованої дії, маніпулятор.

1 Вступ

В аерокосмічній галузі застосовуються багатоланцюгові маніпулятори, які повинні забезпечувати плавне та нечутливе до дії зовнішніх збурень переміщення у тривимірному просторі інерційних об'єктів із значною «парусністю» [1]. Маніпулятори аерокосмічної галузі, за звичай, повинні бути легкими, мати, як мінімум, три степені рухомості (тобто, вузлів рухомості) і охоплювати значну робочу зону [2]. При цьому регулятори електроприводів вузлів рухомості маніпулятора повинні забезпечувати можливість виконання

INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT TECHNOLOGIES. ADVANCES AND APPLICATIONS

швидкої переорієнтації та прецизійного стеження за вхідною керуючою дією [3].

Пружність маніпулятора разом із динамічними властивостями приводів, парусністю об'єктів, які переміщує маніпулятор, та об'єктивною наявністю в механічній конструкції маніпулятора суттєвих нелінійностей типу гістерезис, зона нечуттєвості та насичення призводять до виникнення в процесі експлуатації ефекту так званої «автопружності» (ефект автопружності (ЕАП)). Ефект автопружності починається із «первинних автоколивань» (ПА), які пов'язані із неврахуванням дії суттєвих нелінійностей при налаштуванні регуляторів електроприводів вузлів рухомості і далі розвивається навіть до резонансних режимів, що пов'язані із пружністю конструкції маніпулятора [4, 5, 6].

Зрозуміло, що постає актуальна проблема стосовно такого налаштування (або переналаштування в процесі експлуатації) регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора, яке враховує наявність суттєвих нелінійностей і подавляє причину виникнення ЕАП, тобто подавляє «первинні автоколивання».

Ще раз підкреслимо, що за фізичним змістом суттєва нелінійність або притаманна конструктивному-технологічному виконанню маніпулятора, або виникає в процесі нормальної експлуатації в наслідок зносу та биття в підшипниках електроприводу, або спричинена зовнішніми механічними (фізичними) ударами, або спеціально задається алгоритмом керування вузлом рухомості маніпулятора.

2 Постановка проблем

В теперішній час існують добре розроблені методи аналізу та синтезу режимів роботи нелінійних систем автоматичного керування (САК) в загалі і, зокрема, суттєво нелінійних САК, які спрямовані: по-перше, на з'ясування умов виникнення автоколивань або нестійкості; по-друге, на пошук шляхів стабілізації та (або) усунення автоколивань: частотні методи (частотний метод аналізу стійкості Попова; метод гармонічної лінеаризації Гольдфарба-Попова); метод фазової площини (фазових траєкторій); метод припасовування (метод точкових перетворень Андропова); метод статистичної лінеаризації; методи теорії катастроф; метод функцій Ляпунова [7].

Існуючі методи аналізу та синтезу нелінійних САК базуються на фундаментальних теоретичних математичних роботах А.М. Ляпунова, де викладено необхідні і достатні умови стійкості нелінійних систем. Ці методи орієнтовані на математиків науковців, а не на інженерів експлуатаційників.

В аерокосмічній техніці маніпулятори виготовляються і використовуються масово. Проблема ЕАП має масовий характер. Налаштовувати та переналаштовувати в процесі експлуатації регулятори потрібно масово. Це означає, що потрібен метод, який доступний по теоретичному рівню для інженерів експлуатаційників та орієнтований на застосування сучасних і перспективних систем комп'ютерної математики із розвинутих

INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT TECHNOLOGIES. ADVANCES AND APPLICATIONS

спеціалізованим програмним забезпеченням, яке спрямовано на розв'язання статичних та динамічних задач оптимізації. Тобто потрібен інженерний метод для інженерної практики.

В системі комп'ютерної математики *MATLAB* існує так званий пакет *Nonlinear Control Design (NCD Blockset)*, який реалізує метод динамічної оптимізації із врахуванням заданих користувачем часових обмежень [8]. Цей метод можна вважати напівінженерним з тієї причини, що евристичний спосіб завдання часових обмежень (бажаної моделі зміни в часі вихідних координат САК) – це скоріше мистецтво, аніж інженерний спосіб.

Постає науково-технічна задача: необхідно розробити інженерний метод доступний для масового використання в інженерній практиці для налаштування (або переналаштування в процесі експлуатації) регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора, який враховує наявність суттєвих нелінійностей.

В статті пропонується інженерний метод налаштування регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора із суттєвими нелінійностями, що базується на використанні методів чисельної оптимізації алгоритмічно заданого критерія.

3 Інженерний метод налаштування регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора із суттєвими нелінійностями (в подальшому будемо скорочено позначати цей метод ІМ)

Оскільки в ІМ мова йде про «налаштування», то фактично ІМ – це метод параметричного синтезу регуляторів систем автоматичного керування із заданою структурою. Структура САК електроприводів вузлів рухомості маніпуляторів в інженерній практиці достатньо відпрацьована і у більшості випадків вона є двоконтурною [9].

Інженерний метод базується:

- на використанні чисельних методів оптимізації критерія, який залежить від вектору параметрів регулятора і, при цьому, в явному аналітичному вигляді цю залежність отримати або неможливо, або дуже складно;

- на використанні комп'ютерних математичних моделей (алгоритмів моделювання) динамічних ланок систем автоматичного керування (САК) та статичних характеристик нелінійних елементів як із суттєвими, так і гладкими (несуттєвими) нелінійностями, завдяки яким і відбувається обчислення кількісного значення критерію (тобто чисельне значення критерію знаходиться завдяки застосуванню алгоритмів моделювання: звідси і походить назва – алгоритмічно заданий критерій).

Інженерний метод дозволяє: алгоритмічно обчислювати кількісні значення критерію для заданих значень вектору параметрів регулятора з метою отримання кількісної інтегральної оцінки ефективності функціонування САК; візуально спостерігати зміну в часі змінних, які характеризують якість функціонування САК і в інтерактивному режимі аналізувати та синтезувати алгоритм роботи регулятора. При використанні ІМ нелінійний елемент (НЕ),

INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT TECHNOLOGIES. ADVANCES AND APPLICATIONS

який є нелінійною ланкою спрямованої дії, моделюється як статична ланка із статичною характеристикою, яка відповідає фізичному змісту дії нелінійного елементу у складі САК. Інженерний метод може застосовуватися для параметричного синтезу регулятора (ІМ ПСР) та для переналаштування регулятора (ІМ ПНР) в процесі експлуатації.

Вихідними даними для застосування ІМ ПСР є математична модель САК – прототипу, тобто структурна схема САК – прототипу із відомими математичними моделями усіх ланок спрямованої дії, а також, ланцюгів, які включають до свого складу нелінійні елементи.

Вихідними даними для застосування ІМ ПНР є реальна САК [9].

Етапи ІМ ПСР:

1. Побудова структури модернізованої САК. Виконується вибір типу регулятора із відомою структурою законів керування та підключення регулятора до структурної схеми комп'ютерної математичної моделі САК – прототипу. Параметри регулятора підлягають визначенню завдяки чисельній оптимізації алгоритмічно заданого критерія.

2. Пошук першого наближення до оптимальних значень параметрів регулятора, які в подальшому будуть обчислені завдяки чисельній оптимізації алгоритмічно заданого критерія.

3. Вибір еталонної математичної моделі для моделювання бажаної зміни в часі тих змінних, які в математичній моделі САК вибрані для налаштування.

4. Вибір критерія оцінювання розбіжності (критерія налаштування) в часі між відповідними вихідними змінними (координатами) еталонної математичної моделі (бажана зміна в часі) та математичної моделі САК (зміна в часі змінних при заданих значеннях параметрів регулятора).

5. Вибір методу чисельної оптимізації параметрів регулятора.

6. Підключення еталонної моделі та алгоритму обчислення кількісного значення критерія оцінювання розбіжності (критерія налаштування) до структурної схеми модернізованої САК.

7. Застосування чисельного методу для параметричного синтезу (налаштування), тобто пошуку оптимальних значень параметрів регулятора.

Етапи ІМ ПНР складаються з 3 – 8 етапів ІМ ПСР, де математичні моделі елементів САК – прототипу та модернізованої САК замінюються натурними моделями (тобто реальними обладнанням та пристроями).

Розглянемо застосування ІМ ПСР для налаштування регулятора САК електроприводу вузла рухомості ланки, на якій розташовано робочий орган із закріпленою антеною спрямованої дії. Ця антена призначена для передачі зондуючих сигналів в режимі ідентифікації «фою» малорозмірних об'єктів (тобто, сканування виділеної зони при пошуку активно маневруючих групових об'єктів та їх групового супроводження (захват руху групового об'єкту). Вхідний сигнал $u(t)$ задає кутову швидкість робочого органу маніпулятора $x(t)$, який є вихідним сигналом [10].

Вихідні дані представлені на Рис. 1 у вигляді структурної схеми комп'ютерної математичної моделі САК – прототипу електроприводу вузла рухомості ланки, на якій розташовано робочий орган із закріпленою антеною спрямованої дії. Всі змінні представлені у безрозмірній формі (відносні значення, що обчислені по відношенню до номінальних значень).

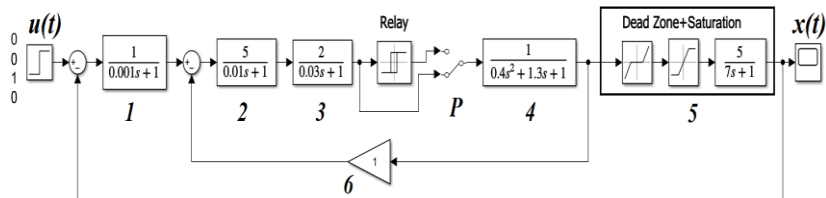


Рисунок 1. Структурна схема комп'ютерної математичної моделі САК – прототипу: САК – прототипу *L* (перемикач *P* у нижньому положенні); САК – прототипу *R* (перемикач *P* у верхньому положенні)

Математична модель САК-прототипу складається із математичних моделей: 1 – сенсора кутової швидкості робочого органу; 2, 3, *Relay*, 4 – електронного перетворювача (ЕП) та електричної частини електроприводу; 5 – механічної частини електроприводу із робочим органом; 6 – сенсора зусиль.

Структурна схема комп'ютерної математичної моделі САК – прототипу *L* дозволяє моделювати САК-прототипу із лінійною математичною моделлю ЕП (перемикач *P* у нижньому положенні), а САК – прототипу *R* моделює ЕП з підсилювачем потужності із релейною характеристикою (-10;10), перемикач *P* у верхньому положенні). Підкреслимо, що в обох комп'ютерних математичних моделях САК – прототипу *L* та *R* моделюється суттєва нелінійність механічної частини електроприводу із ланкою, на якій розташований робочий орган, у вигляді зони нечутливості (-1;1) та насичення (-5; 5).

Перейдемо до виконання етапів ІМ ПСР

Етап 1.

В якості регуляторів для внутрішнього та зовнішнього контурів обираємо пропорційно -, інтегрально -, диференціюючі регулятори (PID – регулятори) (Рис. 2). В математичних моделях регуляторів врахована фізична реалізуємость цих регуляторів (реальна диференціююча ланка та обмеження типу зони насичення (-10;10) для вихідного сигналу ПІД – регуляторів) [1, 7, 9].

Етап 2.

Параметричному синтезу (налаштуванню) підлягають параметри ($Kp1$, $Ki1$, $Kd1$) та ($Kp2$, $Ki2$, $Kd2$) регуляторів відповідно PID-1 та PID-2. Згідно рекомендаціям [4] покладемо, що $taudj = 0.15 \cdot \frac{Kdj}{Kpj}$ ($j = 1, 2$).

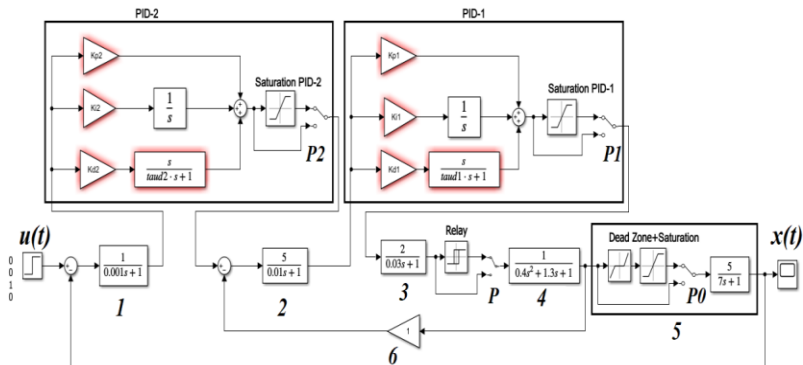


Рисунок 2. Структурна схема комп'ютерної математичної моделі модернізованої САК L (перемикач P у нижньому положенні) та модернізованої САК R (перемикач P у верхньому положенні) електроприводу вузла рухомості ланки, на якій розташовано робочий орган із закріпленою антеною спрямованої дії: регулятори PID-1 та PID-2 підключено відповідно у внутрішній контур та зовнішній контури; положення перемикачів $P0$, $P1$ та $P2$ задається на етапах виконання методу

Пошук першого наближення (первинне налаштування) до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2 обох схем модернізованої САК (L та R) (див. рис. 2) виконаємо із використанням методу коливаний Зіглера-Ніколса [7] без врахування усіх суттєвих нелінійностей (тобто усі перемикачі на рис.2 перебувають у нижньому положенні).

В результаті отримаємо: PID-1 ($Kp1 = 1.2$, $Ki1 = 3$, $Kd1 = 0.12$, $taud1 = 0.015$) та PID-2 ($Kp2 = 2.1$, $Ki2 = 3.5$, $Kd2 = 0.315$, $taud2 = 0.0225$).

Перехідну функцію комп'ютерної математичної моделі модернізованих САК L та R (див. рис. 2), яка побудована для значень параметрів регуляторів обчислених без врахування дії суттєвих нелінійностей, представлено на Рис. 3.

Етап 3.

Для налаштування обираємо вихідну координату модернізованих САК L та САК R , тобто кутову швидкість робочого органу маніпулятора $x(t)$. Приймаємо, що тривалість перехідного процесу треба зменшити до 2 с, а перерегулювання приблизно у двічі.

Враховуючи вигляд перехідної функції (див. рис. 3) та аналізуючи фізичний зміст процесів, які відбуваються в модернізованих САК L та САК R , в якості еталонної моделі зміни в часі вихідної координати модернізованих САК L та САК R обираємо стандартну форму Баттерворта 5-го порядку [7, 9].

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

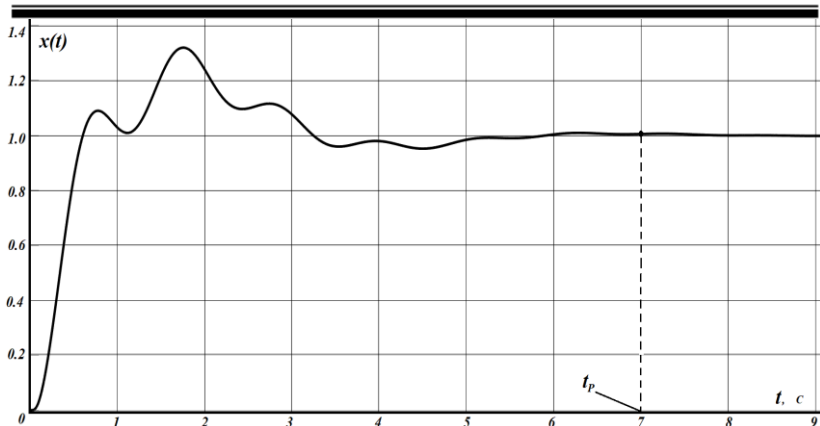


Рисунок 3. Перехідна функція SISO LTI математичної моделі модернізованих САК L та R (усі перемикачі на рис. 2 перебувають у нижньому положенні): час тривалості перехідного процесу $t_p = 7c$; перерегулювання 35 %

Неперервна передавальна функція системи, що дозволяє генерувати неперервний перехідний процес, який відповідає стандартній формі Баттерворта має вигляд:

$$W_{\text{СФБ}}(S) = \frac{v_0^k}{P_k(S)},$$

де $P_k(S)$ – характеристичний поліном k -ого порядку. Характеристичний поліном 5-ого порядку стандартної форми Баттерворта має вигляд:

$$P_k(S) = S^5 + 3.24 \cdot S^4 \cdot v_0 + 5.24 \cdot S^3 \cdot v_0^2 + 5.24 \cdot S^2 \cdot v_0^3 + 3.24 \cdot S \cdot v_0^4 + v_0^5.$$

Використовуючи передавальну функцію еталонної моделі [7, 9]

$$W(S) = \frac{v_0^5}{S^5 + 3.24 \cdot S^4 \cdot v_0 + 5.24 \cdot S^3 \cdot v_0^2 + 5.24 \cdot S^2 \cdot v_0^3 + 3.24 \cdot S \cdot v_0^4 + v_0^5}$$

будуємо нормовану еталонну передавальну функцію при $v_0 = 1$ (Рис. 4) і знаходимо значення параметра v_0 , при якому час тривалості бажаного

еталонного перехідного процесу t_{PE} не перевищує 2 с:

$$v_0 = \frac{t_{PN}}{t_{PE}} = \frac{14}{2} = 7,$$

де t_{PN} – час тривалості нормованого еталонного перехідного процесу.

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**



Рисунок 4. Перехідні функції на виході нормованої $x_N(t)$ ($v_0 = 1$) та бажаної $x_E(t)$ ($v_0 = 7$) еталонних моделей: t_{PN}, t_{PE} – час тривалості перехідного процесу відповідно у нормованій та бажаній еталонних моделях

Етап 4.

В якості критерія оцінювання розбіжності в часі між відповідними вихідними змінними (координатами) еталонної математичної моделі (бажана зміна в часі) та математичної моделі САК (зміна в часі змінних при заданих значеннях параметрів регуляторів PID-1 та PID-2), тобто критерія налаштування, обираємо інтеграл зваженого квадрату помилки:

$$I = \int_{t_0}^{t_f} \alpha(t) \cdot (x_{em}(t) - x(t))^2 dt,$$

де приймаємо, що ваговий коефіцієнт $\alpha(t) = 1, t_0 = 0, t_f = 0, t_f = 10c$.

Кількісне значення критерія відображається на дисплеї D (рис. 5).

Етап 5.

В якості методу чисельної оптимізації параметрів регуляторів PID-1 та PID-2 пропонується обрати чисельний метод серед методів, які викладено у [7, 9].

Як приклад, на етапі 7 розглянемо використання чисельного методу Гаусса-Зейделя.

Етап 6.

На рис. 5 показано підключення еталонної моделі 7 та алгоритму обчислення кількісного значення критерія I (інтеграл зваженого квадрату помилки, значення якого відображається на дисплеї D) до комп'ютерної математичної моделі модернізованої САК.

Структурна схема, що представлена на Рис. 5, дозволяє моделювати різновиди модернізованої САК в залежності від положення перемикачів. Якщо всі перемикачі перебувають у положенні, яке вказано на схемі (див. рис. 5), окрім перемикачів P та PG , які переведені у нижнє положення, то

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

моделюється модернізована САК *L*. Якщо всі перемикачі перебувають у положенні, яке вказано на схемі, окрім перемикача *PG*, який переведено у нижнє положення, то моделюється модернізована САК *R1*. Якщо усі перемикачі у верхньому положенні (як це показано на схемі Рис. 5), то моделюється модернізована САК *R2*.

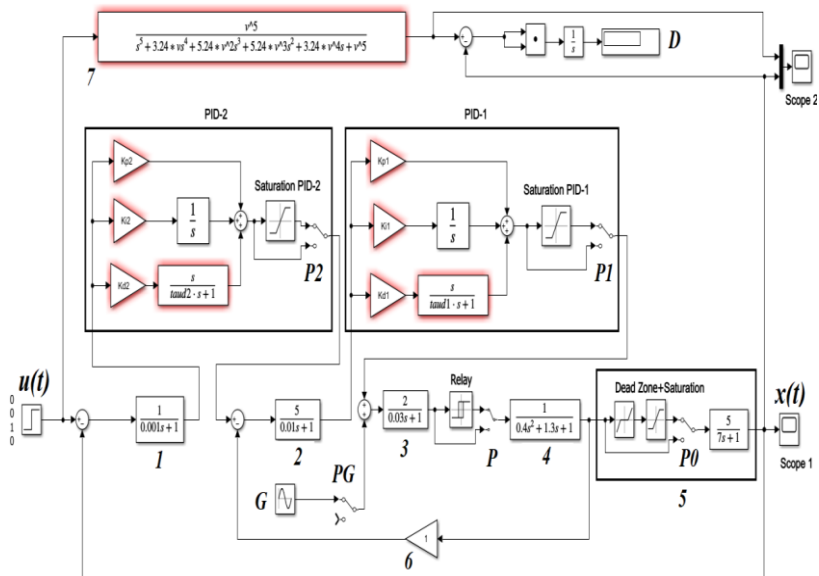


Рисунок 5. Структурна схема комп'ютерної математичної моделі модернізованої САК із підключеними еталонною моделлю 7 та алгоритмом обчислення кількісного значення критерія налаштування, яке відображається на дисплеї *D*: *G* – генератор вібрацій (коливань) для вібраційної лінеаризації

Особливістю модернізованих САК *R1* та *R2* порівняно із модернізованою САК *L* є наявність у їх складі суттєво нелінійного елемента релейного типу.

Суттєва нелінійність релейного типу притаманна деяким різновидам електронних перетворювачів, що використовуються в електроприводах вузлів рухомості маніпуляторів. Доцільність використання таких перетворювачів визначається відповідними конструктивно-технологічними особливостями електроприводу та маніпулятора.

Особливістю модернізованої САК *R2* порівняно із *R1* є застосування вібраційної лінеаризації для зменшення впливу нелінійного елемента релейного типу на ефективне функціонування САК.

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

Фізичний зміст впливу вібраційної лінеаризації на покращення статичної характеристики електронного перетворювача полягає у наступному. При наявності плавного корисного сигналу на вході ланки із суттєвою нелінійністю релейного типу (корисний сигнал та сигнал з генератора вібрацій G додаються) буде забезпечена плавна залежність середнього значення вихідного сигналу цієї ланки за період роботи генератора вібрацій G від середнього значення вхідного сигналу.

Етап 7.

Застосуємо чисельний метод Гаусса-Зейделя для оптимізації (налаштування) параметрів регуляторів PID-1 та PID-2. Скористаємося комп'ютерною математичною моделлю (див. рис. 5) із врахуванням різного набору суттєвих нелінійностей для кожного варіанту модернізації САК. Варіант модернізації САК позначається буквами L або $R1$, або $R2$. Положення перемикачів (див. рис. 5) для варіанта модернізованої САК: варіанту L відповідає верхнє положення перемикачів $P0$, $P1$, $P2$ та нижнє положення перемикачів P та PG ; варіанту $R1$ відповідає верхнє положення перемикачів P , $P0$, $P1$, $P2$ та нижнє положення перемикача PG (тобто, вібраційна лінеаризація не застосовується); варіанту $R2$ відповідає верхнє положення усіх перемикачів, тобто застосовується вібраційна лінеаризація).

Критерій налаштування (оптимізації) залежить від шести параметрів регуляторів PID-1 та PID-2:

$$I(r) \rightarrow \min_{r \in \text{ОДР}}$$

де $r = [r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6]$ – вектор, що складений із параметрів регуляторів PID-1 та PID-2;

$$r_1 = k_{p1}, r_2 = k_{i1}, r_3 = k_{d1}, r_4 = k_{p2}, r_5 = k_{i2}, r_6 = k_{d2}.$$

ОДР – область допустимих розв'язків для пошуку оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, яка задається фізичним змістом задачі (зокрема особливостями реалізації регуляторів PID-1 та PID-2 в конкретній задачі).

Критерій налаштування для відповідного варіанту модернізації САК будемо позначати буквами L або $R1$, або $R2$, тобто: $IL(r)$, $IR1(r)$, $IR2(r)$.

Параметри регуляторів $taud1$ та $taud2$ вважаємо незмінними параметрами. Ці параметри дорівнюють тим значенням, які були отримані при виконанні етапу 2 методику, тобто при первинному налаштуванні регуляторів PID-1 та PID-2: $taud1 = 0.0150$ та $taud2 = 0.0225$.

Ще раз підкреслимо, що для початку застосування чисельного методу Гаусса-Зейделя використовується перше наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, яке отримано на етапі 2 методом коливальних Зіглера-Ніколса для $SISO$ LTI математичної моделі модернізованих САК L та $R1$, $R2$ (усі перемикачі на рис. 2 перебувають у нижньому положенні).

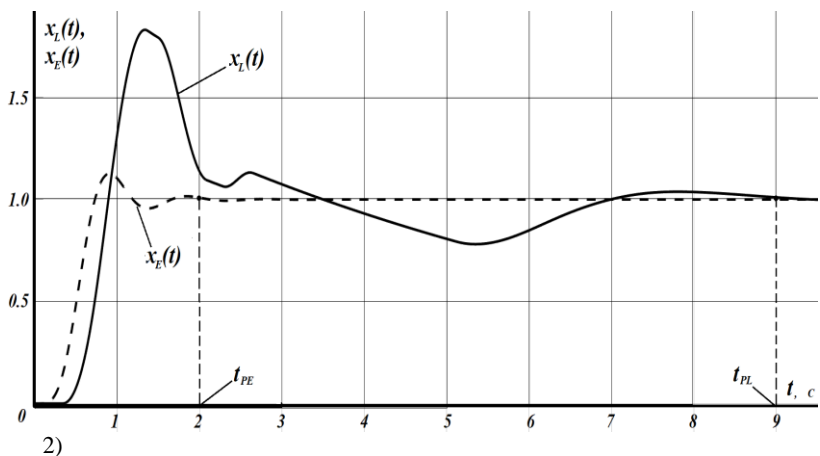
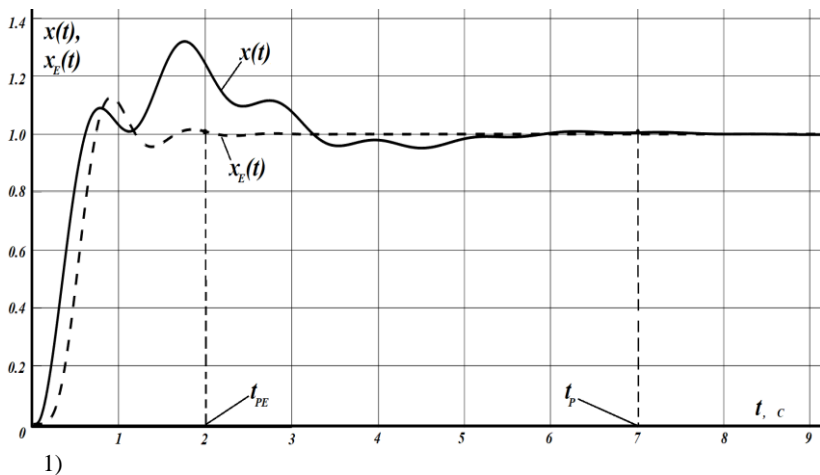
**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

4 Результати та їх обговорення *Результат першого наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2*

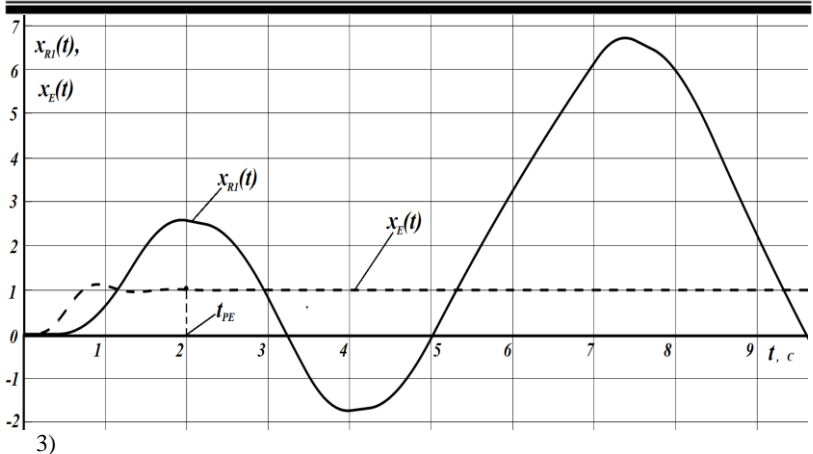
Порівняльне моделювання перехідних функцій еталонної моделі 7 та математичної моделі модернізованої САК $L, R1$ та $R2$ (див. рис. 5) для першого наближення

$$r1 = [Kp1 = 1.2, Ki1 = 3, Kd = 0.12, Kp2 = 2.1, Ki2 = 3.5, Kd2 = 0.315]$$

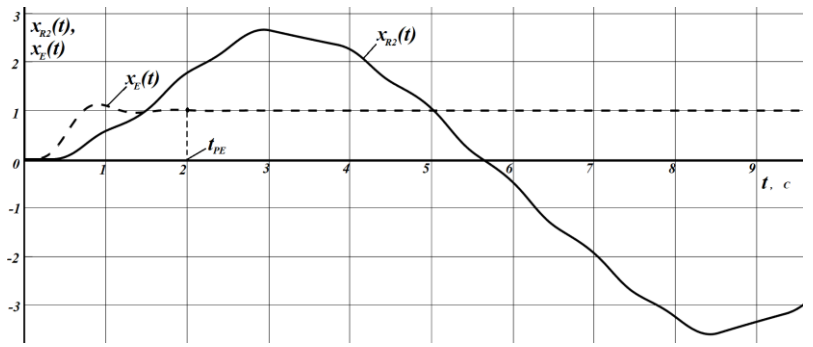
до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, яке отримано на етапі 2, представлено на Рис. 6 (1, 2, 3, 4).



**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**



3)



4)

Рисунок 6. Перехідні функції еталонної моделі 7 ($x_E(t)$) та математичної моделі модернізованої САК L ($x_L(t)$) або $R1(x_{R1}(t))$, або $R2(x_{R2}(t))$ для першого наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, яке отримано на етапі 2

При використанні першого наближення $r1$ до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, які було отримано на етапі 2, на дисплеї D відобразилися наступні значення критерію налаштування:

$$IL(r1) = 0.5871, IR1(r1) = 61.21, IR2(r1) = 60.51$$

відповідно до комп'ютерних математичних моделей модернізованої САК L або $R1$, або $R2$ (рис.5).

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

*Результат налаштування (оптимізації) параметрів регуляторів
PID-1 та PID-2*

Завдяки використанню методу Гаусса-Зейделя було налаштовано шість параметрів регуляторів PID-1 та PID-2 для кожної з модернізованих САК L , $R1$, $R2$. Результат налаштування параметрів позначено відповідно rCL , $rCR1$, $rCR2$.

В методі Гаусса-Зейделя використовується «покоординатний спуск» [7, 9]. В процесі оптимізації по кожній координаті (параметру регуляторів PID-1 та PID-2) було використано прямий інтерактивний метод покоординатного спуску (тобто оптимізація виконувалася практично «в ручну»). Один повний цикл складається із проходження по шести координатах, тобто від $r_1 = k_{p1}$ до $r_6 = k_{d2}$ включно (див. етап 7). Після оптимізації за окремою координатою запам'ятовувалася точка мінімуму по цій координаті. В процесі оптимізації не ставилося за мету досягти глобального мінімуму. Оскільки мова йде про інженерний метод налаштування, то ставилося за мету показати, що навіть без «автоматизації» (застосування спеціального програмного забезпечення для пошуку мінімуму алгоритмічно заданого критерію), а навіть у ручному режимі, можна досягти бажаного результату налаштування суттєво нелінійної САК. Підкреслимо, що в процесі оптимізації виконувалося візуальне порівняння якості перехідного процесу модернізованої САК із якістю перехідного процесу еталонної моделі за допомогою осцилографа Scope 2 (рис. 5).

За результатом виконання одного повного циклу в інтерактивному режимі покоординатного спуску (час одного повного циклу склав менше 30 хвилин) отримано наступні кількісні значення параметрів регуляторів PID-1, PID-2 та критерія налаштування для модернізованих САК:

$$L: CL = [Kp1 = 2.5; Ki1 = 3.2; Kd1 = 0.14; Kp2 = 2.1; Ki2 = 2; Kd2 = 0],$$

$$IL(rCL) = 0.06487;$$

$$R1: rCR1 = [Kp1 = 10; Ki1 = 4; Kd1 = 0.4; Kp2 = 2.1; Ki2 = 1.5; Kd2 = 0],$$

$$IR1(rCR1) = 0.2387;$$

$$R2: rCR2 = [Kp1 = 5; Ki1 = 4.5; Kd1 = 0; Kp2 = 2.1; Ki2 = 1; Kd2 = 0],$$

$$IR2(rCR2) = 0.2895.$$

Перехідні функції для комп'ютерних математичних моделей модернізованих САК L , $R1$ та $R2$ для вектора параметрів регуляторів PID-1 та PID-2, який дорівнює відповідному rCL , $rCR1$, $rCR2$, представлені на рис. 7, 8, 9.

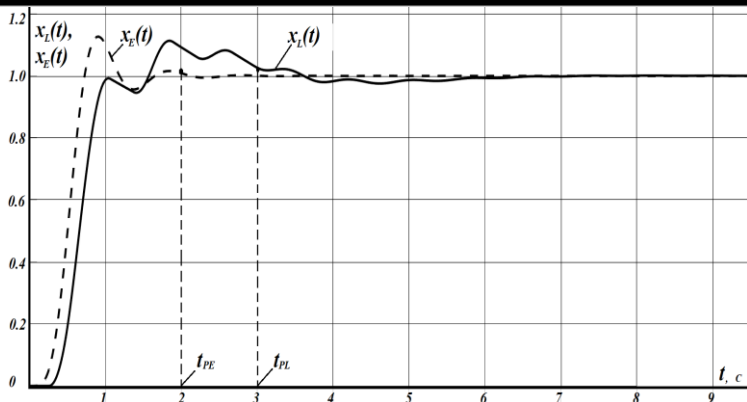


Рисунок 7. Перехідні функції еталонної моделі 7 ($x_E(t)$) та математичної моделі модернізованої САК L ($x_L(t)$) (див.рис. 5) для одного повного циклу наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2: $t_{PL} = 3c$ – час тривалості перехідного процесу в модернізованій САК L

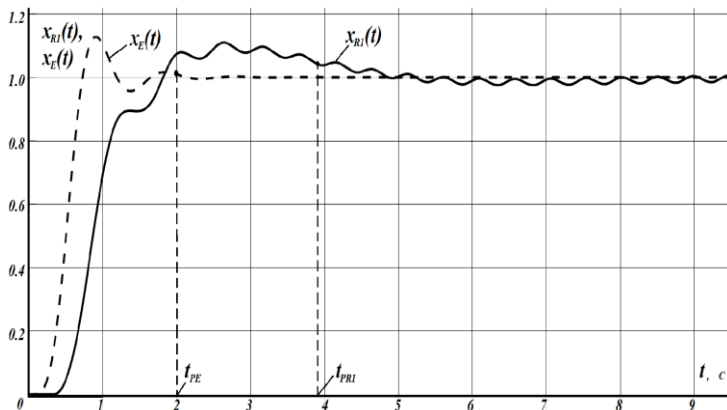


Рисунок 8. Перехідні функції еталонної моделі 7 ($x_E(t)$) та математичної моделі модернізованої САК R1 ($x_{R1}(t)$) (див. рис. 5) для одного повного циклу наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2: $t_{PRI} = 3.8c$ – час тривалості перехідного процесу в модернізованій САК R1

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

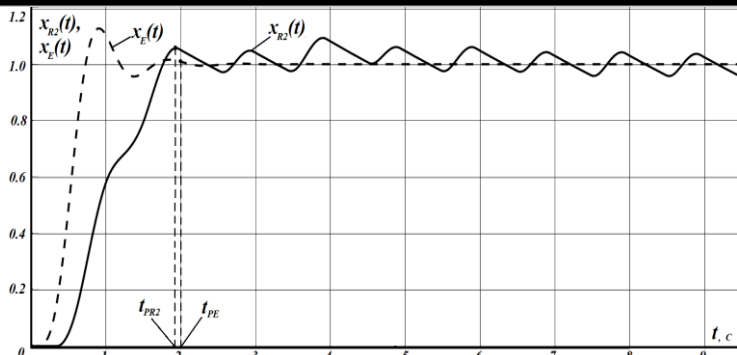


Рисунок 9. Перехідні функції еталонної моделі 7 ($x_E(t)$) та математичної моделі модернізованої САК R2 ($x_{R2}(t)$) (див. рис. 5) для одного повного циклу наближення до оптимальних значень параметрів регуляторів PID-1 та PID-2: $t_{PR2} = 1.9C$ – час установлення сталого режиму вібраційної лінеаризації в модернізованій САК R2; амплітуда коливаний генератора вібрацій G (рис. 5) складала 20 відносних одиниць, а кутова частота 6.28 рад/с

Висновки

1. В статті розроблено інженерний метод налаштування (або переналаштування в процесі експлуатації) регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора, який враховує наявність суттєвих нелінійностей. Цей метод дозволяє усунути причину виникнення ефекту автопружності (виникнення резонансних пружних вібрацій та автоколиваний, що викликані динамічними властивостями приводу вузлів рухомості пружних гнучких маніпуляторів та суттєвими нелінійностями конструктивно-технологічного характеру або такими, що виникають в процесі експлуатації), тобто подавляє «первинні автоколивання».

2. Інженерна простота та зручність методу виражається в тому, що налаштування регуляторів електроприводів вузлів рухомості при виробництві маніпулятора або їх переналаштування в процесі експлуатації не потребує спеціалізованого наукового дослідження, а може бути виконано фахівцем із інженерним рівнем математичної підготовки в інтерактивному режимі за короткий час.

3. Позитивна відмінність запропонованого методу порівняно з методом, який реалізує пакет *Nonlinear Control Design (NCD Blockset)* системи комп'ютерної математики MATLAB полягає в тому, що суттєво спрощується спосіб завдання бажаної зміни в часі змінних, що характеризують стан системи автоматичного керування (часових обмежень). В розробленому методі ці обмеження задаються вибором добре відомих в інженерній практиці стандартних форм *SISO LTI* – моделей (еталонних моделей). При цьому

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

використовуються квадратичні інтегральні критерії наближення перехідного процесу на виході САК до перехідного процесу еталонної моделі, які теж найширше використовуються в інженерній практиці.

4. В комп'ютерних математичних моделях, які розглянуті в статті, було виконано моделювання типових суттєвих нелінійностей, які обумовлені конструктивно-технологічними особливостями механічної частини маніпуляторів аерокосмічних об'єктів та їх електроприводів: зона нечуттєвості, насичення, релейність.

5. Лише за один цикл оптимізації завдяки розробленому інженерному методу вдалося досягти порівняно із першим наближенням до бажаного (еталонного) перехідного процесу: покращення кількісного значення критерія налаштування приблизно на два порядки; зменшити час тривалості перехідного процесу фактично від нескінченності (якщо при першому наближенні система автоматичного керування була нестійка) приблизно до 3 - 4 с (без використання вібраційної лінеарізації); досягти такого значення перерегулювання, яке складає від 25 % до 75 % еталонного перерегулювання.

6. Застосування добре відомого інженерного методу вібраційної лінеарізації у складі запропонованого інженерного методу дозволило додатково зменшити час тривалості перехідного процесу (час виходу на сталий режим вібраційної лінеарізації) з 3 - 4 с до 1.9 с при бажаному часі тривалості перехідного процесу 2 с.

7. В подальших дослідженнях буде розглянуто:

- застосування нелінійних регуляторів (нелінійних коригуючих пристроїв) електроприводів вузлів рухомості маніпуляторів із суттєвими нелінійностями;
- розширено вектор параметрів, що налаштовуються, з шести

$$(r = [r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6]),$$

де $r_1 = k_{p1}, r_2 = k_{i1}, r_3 = k_{d1}, r_4 = k_{p2}, r_5 = k_{i2}, r_6 = k_{d1}$ (див. етап 7) до десяти компонент завдяки включенню до його складу параметрів математичної моделі реальної диференціюючої ланки $taud1, taud2$ та параметрів генератора вібрацій (рис.5), якими є амплітуда та кутова частота вібрацій.

8. Запропонований у статті інженерний метод налаштування регуляторів електроприводів вузлів рухомості маніпулятора із суттєвими нелінійностями дозволяє:

- отримати кількісні значення параметрів регулятора для САК із заданою структурою та відомим типом суттєвих нелінійностей на основі застосування відомих, апробованих на практиці та доступних програмних засобів сучасних систем комп'ютерної математики;

- бути повністю запрограмованим із використанням будь-якого чисельного методу оптимізації, що дозволить повністю автоматизувати параметричну оптимізацію САК із суттєвими нелінійностями.

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

Література

1. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., et al. (2020). Mathematical modeling of motion of iron bird target node of security data management system sensors. *CEUR Workshop Proceedings*, 2711, 482–491.
2. Cabás Ormaechea, L. M. (2011). Humanoid robots. In *Advanced mechanics in robotic systems* (pp. 1–18). London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-588-0_1
3. Aswini, S., et al. (2023, December 1–3). Biomechanics-inspired control strategies for humanoid robots. *IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gautam Buddha Nagar, India. <https://doi.org/10.1109/upcon59197.2023.10434421>
4. Goodwin, G. C., Graebe, S. F., & Salgado, M. E. (2001). *Control system design* (1st ed.). Prentice Hall.
5. Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (1998). *Modern control systems* (4th ed.). Prentice Hall.
6. Phillips, C. L., & Harbor, R. D. (2000). *Feedback control systems* (4th ed.). Prentice Hall.
7. Lysenko, O., Tachinina, O., Guida, O., et al. (2024). Generalized integro-differentiating controller form mechatronic devices of mobility nodes of humanoid robots. *CEUR Workshop Proceedings*, 3790, 87–98.
8. Solomentsev, O. V., Zaliskyi, M. Yu., Zuiiev, O. V., & Asanov, M. M. (2013). Data processing in exploitation system of unmanned aerial vehicles radioelectronic equipment. *IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 77–80. <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2013.6705288>
9. Lysenko, O., Tachinina, O., Novikov, V., et al. (2023). Methodology of synthesizing digital regulators in precision electric drives for orientation and stabilization target tracking system of mobile robot's directional sensors. *CEUR Workshop Proceedings*, 3513, 51–63. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/>
10. Solomentsev, O. V., Zaliskyi, M. Yu., Asanov, M. M., & Melkumyan, V. H. (2015). UAV operation system designing. *IEEE 3rd International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, 95–98. <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346570>

**METHOD FOR ADJUSTING REGULATORS WITH SIGNIFICANT
NONLINEARITIES**

Dr.Sci. O. Lysenko^[10000-0002-7276-9279], **Dr.Sci. O. Tachynina**^[10000-0001-7081-0576],
Ph.D. S. Ponomarenko^[10000-0001-5512-3778]

¹*National Technical University of Ukraine*

**INFORMATION CONTROL SYSTEMS AND INTELLIGENT
TECHNOLOGIES.
ADVANCES AND APPLICATIONS**

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine,
State University "Kyiv Aviation Institute", Ukraine
EMAIL:lysenko.a.i.1952@gmail.com, tachinina5@gmail.com, sol_@ukr.net

Abstract. *The article develops an engineering method for adjusting (or readjusting during operation) the controllers of electric drives of manipulator mobility units, which takes into account the presence of significant nonlinearities. This method prevents the occurrence of "primary self-oscillations" in the automatic control system of electric drives of manipulator mobility units, which stimulate the occurrence of resonant elastic vibrations and self-oscillations (self-oscillation effect). The proposed method allows not only to eliminate the cause of the autoelasticity effect, but also to do so at the engineering level of mastery of mathematical apparatus, computer mathematics systems, and programming skills. The manifestation of the autoelasticity effect is associated with the presence of factors such as: the dynamic properties of the drive of the mobility nodes; the elastic flexibility of manipulators; significant nonlinearities of a structural and technological nature or those that arise during operation in mechanical and electrical devices. The engineering simplicity and convenience of the method is expressed in the fact that the adjustment of the electric drive controllers of the mobility nodes during the manufacture of the manipulator or their readjustment during operation does not require specialized scientific research, but can be performed by a specialist with an engineering level of mathematical training in interactive mode in a short time.*

Keywords: *automatic control system, PID controller, significant nonlinearity, numerical optimization methods, computer mathematical model, directional antenna, manipulator*

UDC 004.8

DOI <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-3>

**METHODOLOGY FOR IDENTIFYING POST-TRAUMATIC
STRESS DISORDER INDICATORS IN TEXT DATA**

Ph.D. O. Mazurets¹[0000-0002-8900-0650], **O. Ovcharuk**²[0009-0008-3815-0035]

Khmelnyskyi National University, Ukraine
EMAIL:¹exe.chong@gmail.com, ²off4aruk@gmail.com

Abstract. *This study introduces the methodology for detecting indicators of post-traumatic stress disorder (PTSD) within textual data produced by users. Unlike traditional approaches, the proposed solution emphasizes two critical aspects: the refinement of contextual dependencies that are characteristic of PTSD, and the ability to more clearly distinguish PTSD-related signals from those of other mental*