

DOI <https://doi.org/10.32782/2307-9770.2024.12.02.03>  
UDC 612.825.8

## Designing the Virtual Stand of Fuzzy Regulators Study for the Training of Students Majoring in Automation and Computer-Integrated Technologies

Konokh, I.<sup>\*</sup>, Zhulia, A., Galenko A., Naida, V.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

*Received:* 25.05.2024

*Accepted:* 22.06.2024

**Abstract.** The aim of this work is to improve the efficiency of training and mastering the skills of implementing modern regulators for industrial electromechanical DC executive systems. To achieve this goal, a virtual testbed has been developed that, using mathematical modeling, allows us to study the effect of regulators on transients in an electromechanical system based on an independently excited DC motor. The program includes three different automatic control systems: with proportional-integral-differential controller, with slave control, and with fuzzy controller. For each of these systems, the user can change the parameters of the control object and the settings of the controllers, while observing the transient process on the graphical screen. The virtual testbed was developed as a complement to a physical computerized testbed designed to study digital control systems for automated electric drives. It allows you to study the properties of the adaptive controller independently and remotely, according to your own schedule, while reducing the material costs of training. The simulation of adaptive controllers in a virtual environment is carried out synchronously in real time, and the program ensures that the resulting transients are saved to a text file for all adaptive control systems. To tune the proportional-integral and proportional-integral-differential controllers, the traditional theory of calculating their coefficients is used. As a result of the work performed, the model of a computerized system that implements a virtual training bench for studying speed and position controllers in electric actuators was improved. Unlike existing analogues, this model contains a fuzzy logic module that allows changing the controller coefficients, improving the quality of control and reducing the time for setting up the controllers. The practical value of the work is the creation of a program module in the G language in the LabView environment, which is capable of reproducing the dynamic properties of the electric actuator and analyzing the quality of transients.

**Key words:** automatic control systems, adaptive controllers, proportional-integral-differential controllers, fuzzy logic, slave control systems, mathematical modeling, student's independent work.

## Розробка віртуального стенду з дослідження нечітких регуляторів для забезпечення підготовки студентів із спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Конох І. С., Жуля А. Р., Галенко А. Ю., Найда В. В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

**Анотація.** Метою цієї роботи є підвищення ефективності навчання та оволодіння навичками реалізації сучасних регуляторів для виконавчих електромеханічних систем постійного струму промислового призначення. Для досягнення цієї мети було розроблено віртуальний стенд, який, використовуючи математичне моделювання, дозволяє досліджувати вплив регуляторів на перехідні процеси в електромеханічній системі на основі двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Програма включає три різні системи автоматичного регулювання: з пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором, з підпорядкованим регулюванням та з нечітким регулятором. Для кожної з цих систем користувач може змінювати параметри об'єкта керування та налаштування регуляторів, спостерігаючи при цьому перехідний процес на графічному екрані. Віртуальний стенд розроблено як доповнення до фізичного комп'ютеризованого стенду, призначеного для дослідження цифрових систем управління автоматизованим електроприводом. Він дозволяє вивчати властивості

---

**Corresponding Author:** Konokh Igor Serhiiovich. E-mail: [konokh.is.univer@gmail.com](mailto:konokh.is.univer@gmail.com)  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University,  
vul. Universytetska, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600.

**Відповідальний автор:** Конох Ігор Сергійович. E-mail: [konokh.is.univer@gmail.com](mailto:konokh.is.univer@gmail.com)  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
вул. Університетська, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.

адаптивного регулятора самостійно та дистанційно, згідно з власним графіком, знижуючи при цьому матеріальні витрати на навчання. Симуляція роботи адаптивних регуляторів у віртуальному середовищі здійснюється синхронно в режимі реального часу, а програма забезпечує збереження отриманих перехідних процесів у текстовий файл для всіх систем адаптивного регулювання. Для налаштування пропорційно-інтегрального та пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів використовується традиційна теорія розрахунку їхніх коефіцієнтів. У результаті виконаної роботи було вдосконалено модель комп'ютеризованої системи, що реалізує віртуальний навчальний стенд для дослідження регуляторів швидкості та положення в виконавчих електроприводах. На відміну від існуючих аналогів, ця модель містить модуль нечіткої логіки, що дозволяє змінювати коефіцієнти регулятора, підвищуючи якість управління та скорочуючи час на налаштування регуляторів. Практична цінність роботи полягає у створенні програмного модуля на мові G у середовищі LabView, що здатен відтворювати динамічні властивості виконавчого електричного привода та аналізувати якість перехідних процесів.

**Ключові слова:** системи автоматичного керування, адаптивні регулятори, пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, нечітка логіка, системи підпорядкованого керування, математичне моделювання, самостійна робота студента.

## I Вступ

Наявність лабораторного забезпечення у вигляді віртуального комплексу є додатковим важливим елементом навчального процесу [1, 2, 3]. Наявна безліч практичних розробок віртуальних стендів під конкретні професійні задачі [4, 5, 6]. Колектив авторів займається розробкою віртуальних лабораторних стендів на постійній основі [7, 8, 9]. Область застосування віртуального стенду з дослідження нечітких регуляторів – самостійна робота з дисциплін «Актuatorні пристрої», «Методи оптимізації керуючих алгоритмів», «Комбіновані інтелектуальні системи» для студентів спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», а також з аналогічних дисциплін інших спеціальностей. Віртуальний комплекс було розроблено як додаток до фізичного комп'ютеризованого стенду на дослідження цифрових систем управління автоматизованим електроприводом. Він дозволяє вивчати властивості адаптивного регулятора при самостійному та віддаленому навчанні за власними графіком, досліджувати методи налаштування при суттєвому зниженні матеріальних витрат.

Метою даної роботи є підвищення ефективності вивчення та реалізації сучасних регуляторів для виконавчих електромеханічних систем постійного струму промислового призначення.

## II Матеріал і методи дослідження

Одним з найпоширеніших алгоритмів регулювання в промисловості є ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) алгоритм, який широко використовується для управління різними технічними процесами, такими як теплотехнічні, гідродинамічні та масообміни [10, 11]. Змінна процесу, така як температура, тиск чи витрата, розглядається як змінна, яку слід регулювати. Оператор визначає бажане значення для цієї змінної, і ПІД-регулятор визначає, яким чином слід налаштувати параметри, такі як потужність обігріву або положення регулюючого клапана. Ці налаштування впливають на змінну процесу, приводячи її до встановленого значення [12, 13].

У стандартному ПІД-регуляторі LabView для порівняння ідеального значення (SP) та реального значення змінної процесу (PV) визначається величина відхилення ( $e$ ) [14, 15, 16]:

$$e = SP - PV.$$

Загальна теоретична формула розрахунку керуючого значення за ПІД-законом, як відомо, виглядає як:

$$u(t) = K_c \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right),$$

де  $K_c$  – загальний коефіцієнт пропорційності регулятора;  $T_i$  – час інтегрування в хвилинах (час ізодрому);  $T_d$  – час диференціювання у хвилинах.

Пропорційна складова керуючого впливу визначається регулятором як:

$$u_p(t) = K_c e,$$

при цьому інтегральна складова дорівнює,

$$u_i(t) = \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e dt,$$

а диференційна складова,

$$u_d(t) = K_c T_d \frac{de}{dt}.$$

Процедура фільтрації знижує вплив шуму:

$$PV_i = 0.5PV + 0.25PV(k-1) - 0.175PV(k-2) - 0.075PV(k-3).$$

Неузгодження, що використовується для підрахунку інтегральної та диференціальної складової, розраховується таким чином:

$$e(k) = (SP - PV_j)(L + (1-L)) \cdot \frac{|SP - PV_j|}{SP_{rng}}.$$

Неузгодженість для розрахунку пропорційної дії має вигляд:

$$eb(k) = (\beta \cdot SP - PV_f)(L + (1-L)) \cdot \frac{|\beta \cdot SP - PV_f|}{SP_{rng}}.$$

де  $SP_{rng}$  – діапазон зміни завдання;  $\beta$  – фактор завдання;  $L$  – параметр, що визначає ступінь нелінійності регулятора, і його значення, також визначає тип регулятора.

Коли  $L$  дорівнює 1, регулятор вважається лінійним. Встановлення  $L$  на рівень 0,1 спрямовано на мінімізацію коефіцієнта передачі регулятора до 10%  $K_c$ , коли змінна процесу наближається до заданого значення. Цей підхід дозволяє застосовувати нелінійне регулювання, де коефіцієнти налаштування змінюються залежно від відхилення.

У реальних системах регулювання зміни завдання часто перевищують і мають більш різкий характер, ніж перешкоди. Налаштування ПІД-регулятора на високу чутливість до робочих перешкод може викликати неприпустимі коливання регульованої величини. З іншого боку, висока чутливість до завдання може спричинити уповільнення реакції на перешкоди. Якщо фактор  $L$  встановити менше одиниці, стрибки чутливості до завдання стануть меншими без впливу на чутливість до робочих перешкод. Цей фактор відноситься до ПІД-алгоритму "Двох ступенів свободи", який є індексом чутливості до завдання, приймаючи значення від 0 до 1. Наприклад, якщо важливіша стійкість, фактор може дорівнювати 0, а якщо необхідно, щоб змінна процесу швидко прагнула до завдання, його можна встановити на 1. Уточнений розрахунок пропорційної складової виконується відповідно до визначеної формули:

$$u_p(k) = (K_c \cdot eb(k)).$$

Інтегрування методом трапецій застосовується для уникнення різких змін в інтегральній складової, коли зміна значень змінних  $PV$  або  $SP$  носить коливальний характер: чим більше неузгодження, тим менше інтегральна складова.

Нелінійний множник для інтегральної складової  $SP_{rng} = 100$ .

Через різкі зміни завдання, диференційна дія застосовується тільки до фільтрованого значення регульованого параметра, а не до неузгодженості:

$$u_D(k) = -K_c \frac{T_d}{\Delta t} (PV_f(k) - PV_f(k-1)).$$

Вихід регулятора є сумою пропорційної, інтегральної та диференціальної складових:

$$u(k) = u_p(k) + u_I(k) + u_D(k).$$

Отримаємо, що фінальна модель ПІД-контролера приймає вигляд:

$$u(t) = K_c \left( \beta \cdot SP - PV + \frac{1}{T} \int_0^t (SP - PV) dt - T_d \frac{d}{dt} PV_f \right).$$

Реалізація ПІД-контролера в середовищі Lab.VIEW вражає своєю особливістю, а саме використанням алгоритму корекції інтегральних збережених значень, який дарує системі властивості антизатягування та ненаголошеності при зміні режиму управління з автоматичного на ручний і навпаки. Антизатягування передбачає обмеження верхньої межі виходу регулятора. При зменшенні неузгодженості вихід регулятора також зменшується, не виходячи за визначені межі. Цей алгоритм ефективно запобігає стрімким змінам результату при переході з автоматичного у ручний режим і навпаки, а також при зміні інших параметрів налаштування регулятора.

За замовчуванням діапазон значень параметрів завдання, змінної процесу та навіть виходу регулятора представлений у відсотковому виразі, хоча можливе використання фактичних одиниць вимірювання.

З іншого боку режим функціонування регулятора, що викликає збільшення виходу відбувається, якщо змінна процесу більше ніж завдання. Значення інтегрального та диференційного часу вимірюються в хвилинах.

Розглянемо наступні найбільш уживані модифікації алгоритму нечіткого висновку, вважаючи, для простоти, що базу знань організують два нечіткі правила виду:

$\Pi_1$ : якщо  $x \in A_1$  і  $y \in B_1$ , тоді  $z \in C_1$ ;

$\Pi_2$ : якщо  $x \in A_2$  і  $y \in B_2$ , тоді  $z \in C_2$ ,

де  $x$  та  $y$  – імена вхідних змінних,  $z$  – ім'я змінної виводу,  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  – деякі задані функції приладдя, при цьому чіткий вихідний результат  $z_0$  необхідно визначити на основі вхідних даних та конкретних значень  $x_0$  і  $y_0$ .

Алгоритм Сугено (Sugeno). Сугено і Такагі використовували набір правил у наступній формі [17, 18, 19, 20]:

$\Pi_1$ : якщо  $x \in A_1$  та  $y \in B_1$ , тоді  $z_1 = a_1x + b_1y$ ,

$\Pi_2$ : якщо  $x \in A_2$  та  $y \in B_2$ , тоді  $z_2 = a_2x + b_2y$ .

Подання алгоритму [21, 22, 23]:

1. Нечіткість: перебувають ступеня істинності для передумов кожного правила:  $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0)$ .

2. Нечіткий висновок: є рівні «відсікання» для передумов кожного з правил (з використанням операції min):

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0),$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0).$$

та індивідуальні виходи правил,

$$z_1^* = \alpha_1 x_0 + b_1 y_0,$$

$$z_2^* = \alpha_2 x_0 + b_2 y_0.$$

4. На третьому етапі визначається чітке значення змінної виводу:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

На основі викладеної методики був побудований віртуальний лабораторний стенд.

### III Результати

Зовнішній вид лабораторного стану, розробленого для вивчення характеристик адаптивного регулятора та демонстрації його функціоналу, представлений на рисунку 1.

Конструкція лабораторного стану складена з таких основних частин:

1. Несуча конструкція стану з розташованим обладнанням.
2. Датчик частоти обертання.
3. Електричний виконавчий двигун.
4. Лицьова панель стану.
5. Системний блок ЕОМ.
6. Щитова автоматичних вимикачів.
7. Три розетки.
8. Осцилограф двопробеневий С1-96.
9. Монітор.
10. Клавіатура та маніпулятор ЕОМ.

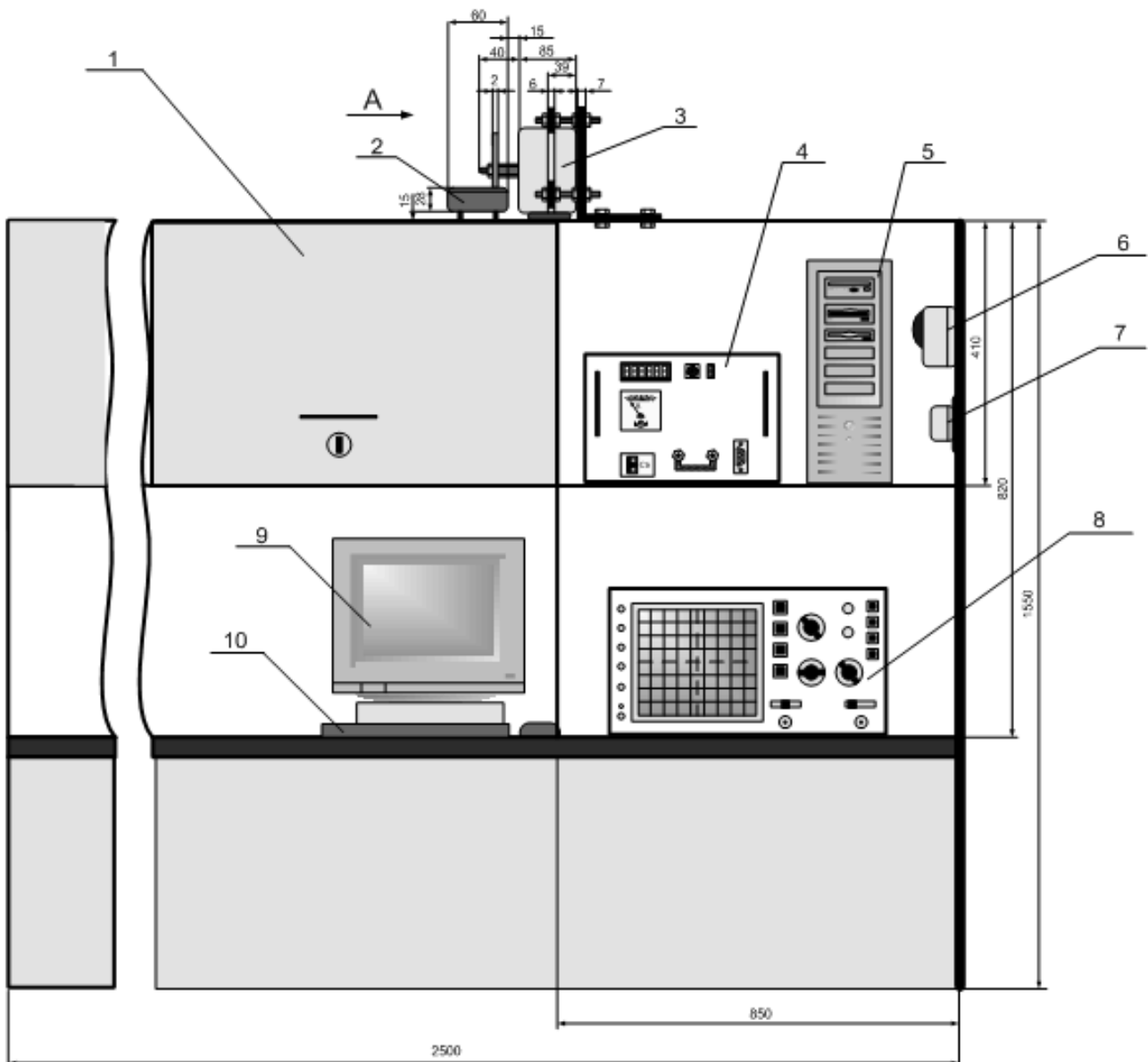


Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторного стану

Програмне забезпечення, що відтворює лабораторний комплекс для дослідження класичних та нечітких адаптивних регуляторів динамічних об'єктів електромеханічних систем було створено як додаток до існуючого комп'ютеризованого стенду для дослідження цифрових систем керування електромеханічним об'єктом. Зовнішній вигляд віртуального комплексу наведено на рисунку 2.

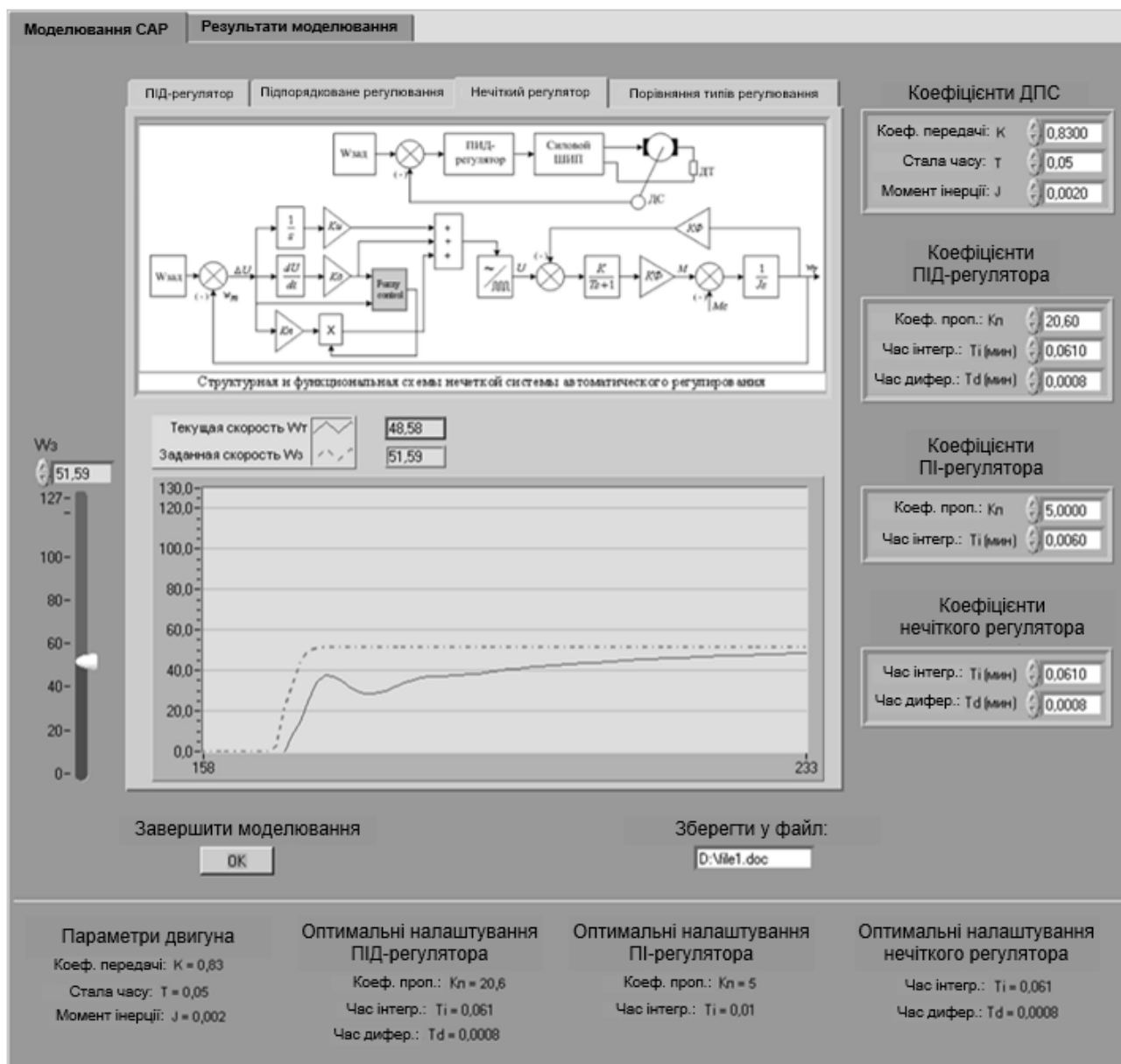


Рис. 2. Основне вікно віртуального комплексу

Основне меню програми складається з двох пунктів: «Моделювання системи адаптивного регулювання» та «Результати моделювання» (рис. 3). У програмі реалізовані три системи – САР з ПІД-регулятором, система підпорядкованого регулювання та нечітка САР. Для кожної з цих систем надається можливість змінювати параметри об'єкта управління (у нашому випадку двигуна постійного струму незалежного збудження) та налаштування регуляторів, спостерігаючи при цьому перехідний процес на графічному екрані.

Час моделювання вимірюється у мілісекундах, кутова швидкість обертання – у радіанах за секунду.

Параметри обертової швидкості у системах адаптивного регулювання можуть бути змінені від нуля до максимального значення за допомогою вертикального повзунка, розташованого в лівій частині робочого простору. Важливо зауважити, що ця зміна швидкості відбувається одночасно для всіх систем адаптивного регулювання і відображається на порівняльному графіку. Миттєві значення швидкості

завдання та поточної кутової швидкості відображаються на індикаторах над графіком. У кожній системі адаптивного регулювання наведено структурні та функціональні схеми.

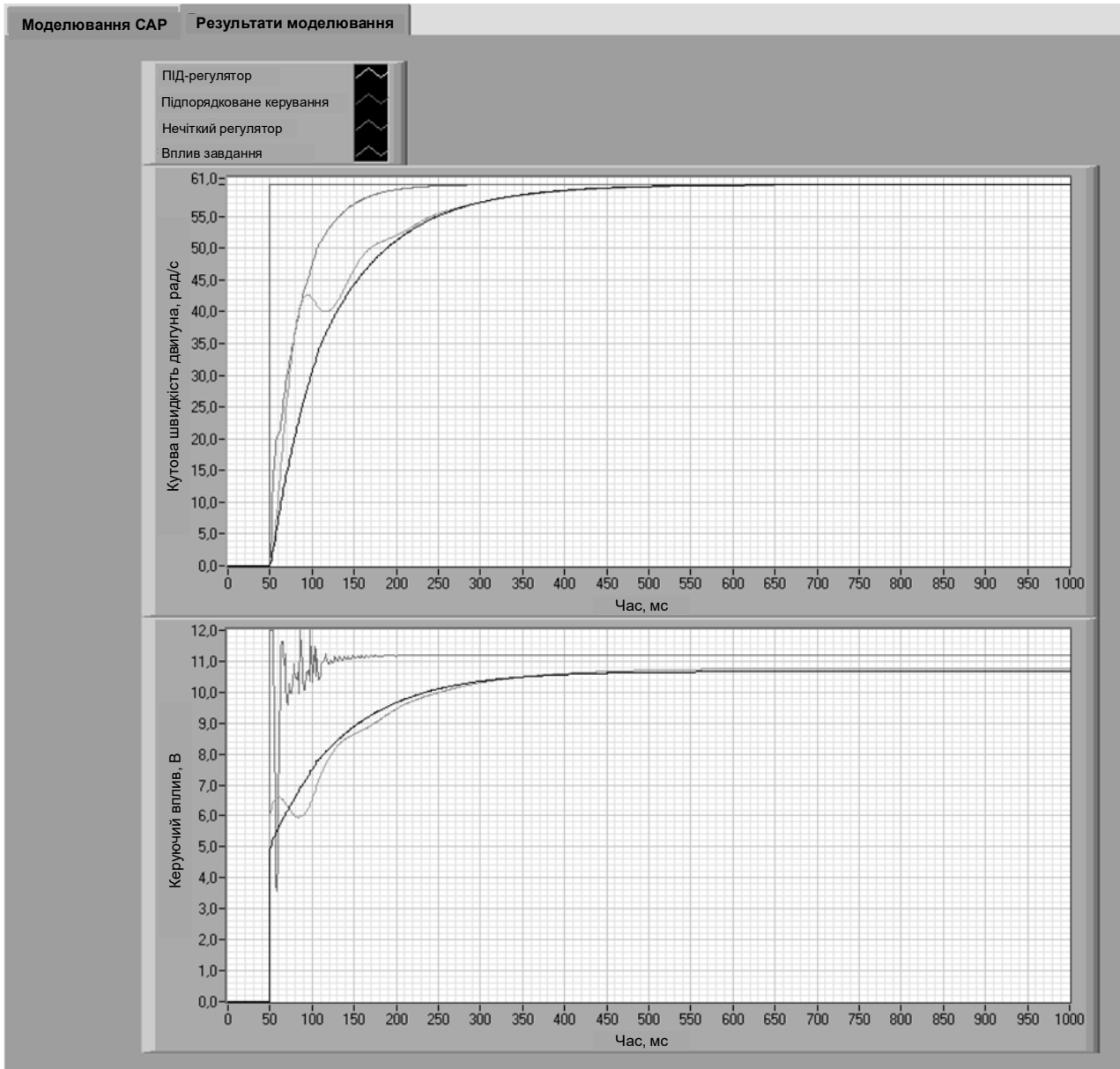


Рис. 3. Результати роботи віртуального комплексу

Параметри об'єкта керування та регуляторів встановлені як оптимальні. Ці значення також вказані у текстовій частині вікна, що дозволяє змінювати параметри в необмежених межах і повертати систему у вихідний стан у будь-який момент.

Програма передбачає збереження отриманих перехідних процесів у текстовий файл для всіх систем адаптивного регулювання. За замовчуванням результати моделювання зберігаються у файлі з ім'ям result.doc на обраному диску. Новий запуск циклу моделювання призводить до того, що оновлені дані автоматично замінюють збережені.

Меню "Результати моделювання" містить два порівняльні графіки – кутову швидкість двигуна та керуючий вплив (вихід ПІД-контролеру). Загальний час моделювання становить 5 с, а масштаб графіків може бути змінений шляхом редагування крайніх значень координатних осей.

**Реалізація регуляторів та динамічних ланок у LabView.** Для впровадження сучасних інтелектуальних системи регулювання знадобляться віртуальні інструменти ПІД-регулювання з бібліотеки LabView. На початку достатньо вставити віртуальний інструмент «PID.vi» в поле редактора діаграм і задати для нього відповідні вхідні та вихідні змінні. Якщо пов'язати входи та виходи регулятора

з інструментальними платами, зовнішніми модулями вводу/виводу або стандартними портами, то можна налаштувати працездатну систему регулювання, що відповідає умовам реального часу.

Віртуальні інструменти бібліотеки ПІД-регулювання жорстко залежать від параметра часу. Це значення можна визначити через значення параметра час циклу або через вбудований таймер.

Основний віртуальний інструмент бібліотеки «ПІД-регулятор» має такі входи як завдання, змінна процесу, ручне регулювання та параметри ПІД. Вхід «параметри ПІД» є кластером з трьох значень: коефіцієнт пропорційності (діапазон дроселювання), час інтегрування, час диференціювання. Кластер налаштування служить для введення додаткових параметрів. Найчастіше цей вхід може використовуватися. Один параметр з налаштувань має логічне значення і визначає тип значення пропорційного параметра: коефіцієнт підсилення (пропорційності ( $K_c$ )) або діапазон зміни пропускну здатності ( $PB$ ). Взаємини цих коефіцієнтів визначається як  $K_c = \frac{100}{PB}$ . За замовчуванням параметр набуває значення коефіцієнта пропорційності.

Параметр  $dt$  визначає час циклу регулятора. Значення за умовчанням -1 означає, що для розрахунку інтегральної та диференційної складової використовується системний таймер.

Застосування входу повторення визначається його призначенням для проведення фільтрації змінної процесу. Щоб забезпечити ефективну активізацію процесу фільтрації, необхідно провести з'єднання цього входу з лічильником повторення циклу. У випадку, якщо вхід алгоритму "повторення" залишається непоєднаним, функція фільтрації змінної процесу не виконується. На рисунку 4 представлено блок-схему віртуального інструменту «ПІД-регулятор».

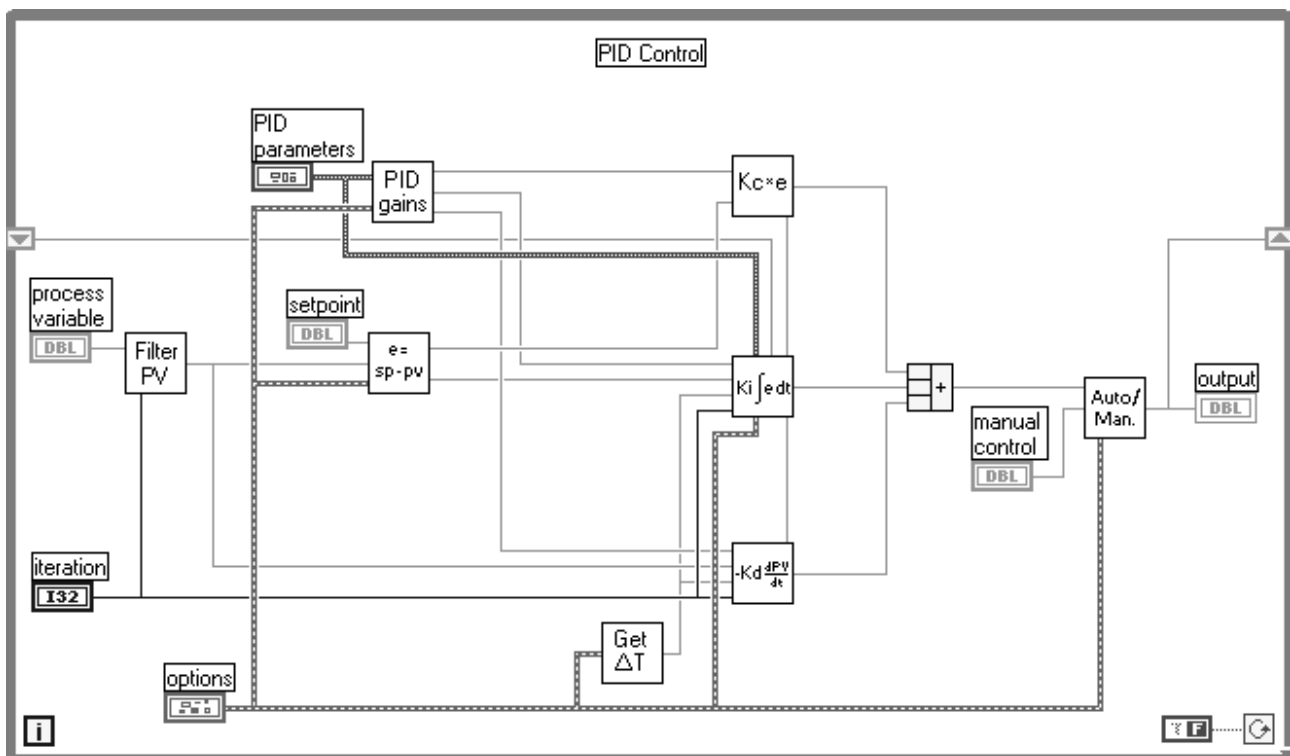


Рис. 4. Блок-схема віртуального інструменту «ПІД-регулятор»

У відповідному інструментальному розділі (ПІД-регулювання) існує віртуальний інструмент «Випередження-запізнення», що є динамічною ланкою прискореної реакції з передатною функцією:

$$W(s) = k \cdot \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$$

Якщо прийняти значення  $T_1=0$ , отримаємо аперіодичну ланку. Інтегруючу ланку можна отримати шляхом зміни алгоритму або за допомогою числового інтегратора бібліотеки LabView.

Таким чином, з'єднавши розглянуті інструменти з кластерами параметрів, підключивши зворотні зв'язки та інформаційні входи, виходи можна побудувати програмну модель двигуна постійного струму незалежного збудження і класичну систему регулювання з ПІД-регулятором (рис. 5).

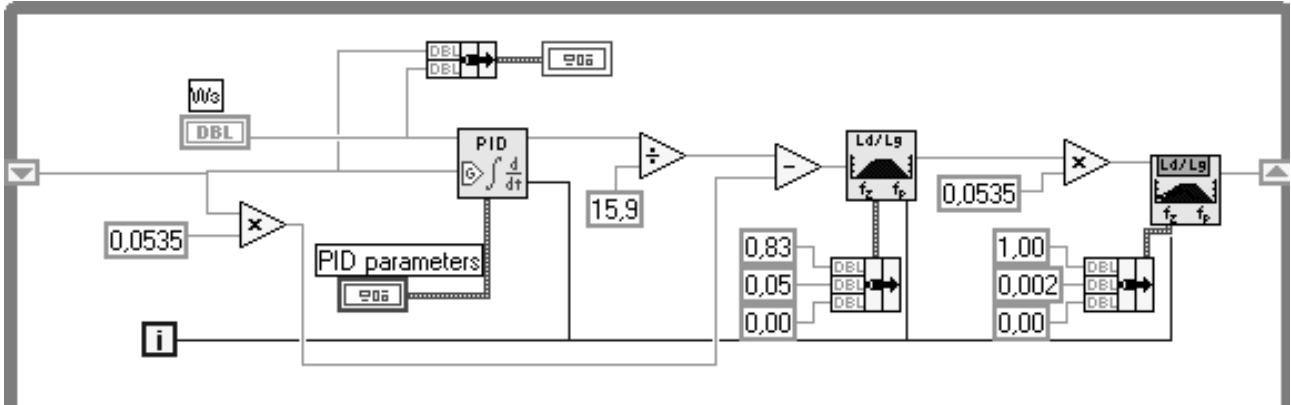


Рис. 5. Вигляд вихідного коду програми для системи адаптивного регулювання з ПІД-регулятором

В складі fuzzy-системи адаптивного регулювання використано віртуальний інструмент «PID+Fuzzy». Це інструмент бібліотеки користувача, створений на основі інструмента «ПІД-регулятор». До його складу входить блок My fuzzy - алгоритм нечіткого вводу/виведення, створений за допомогою програми LabView - Fuzzy Logic Controller Design на основі математичного опису нечіткого контролера. Блок-схема віртуального інструмента PID+Fuzzy представлена на рисунку 6.

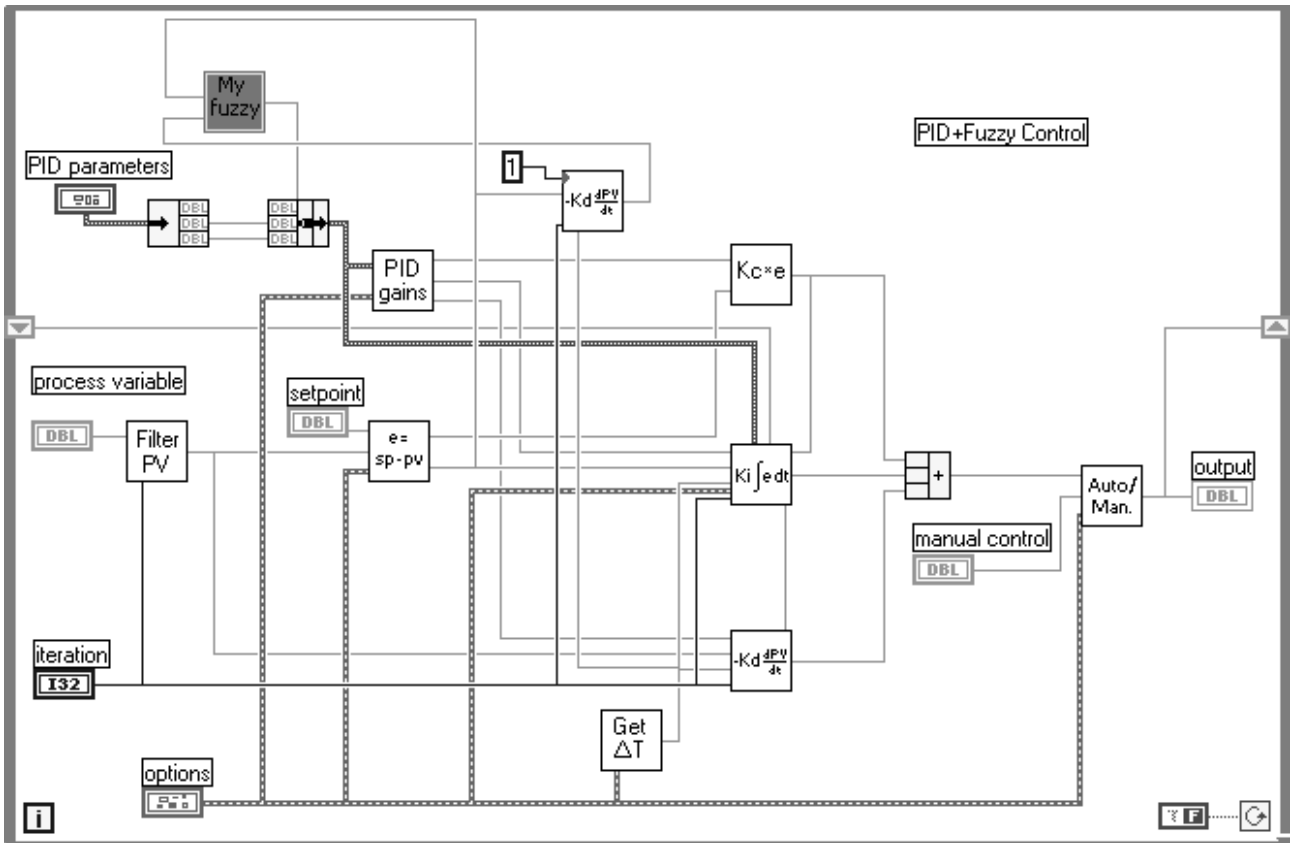


Рис. 6. Блок-схема віртуального інструмента «PID+Fuzzy»

Також у віртуальному комплексі побудовано систему підлеглого регулювання. До її складу входять ті ж інструменти, що і для системи з ПІД-регулятором. При зниженні коефіцієнту диференційної складової приходимо до пропорційно-інтегрального закону регулювання. Програмна модель системи підлеглого адаптивного регулювання представлена рисунку 7.

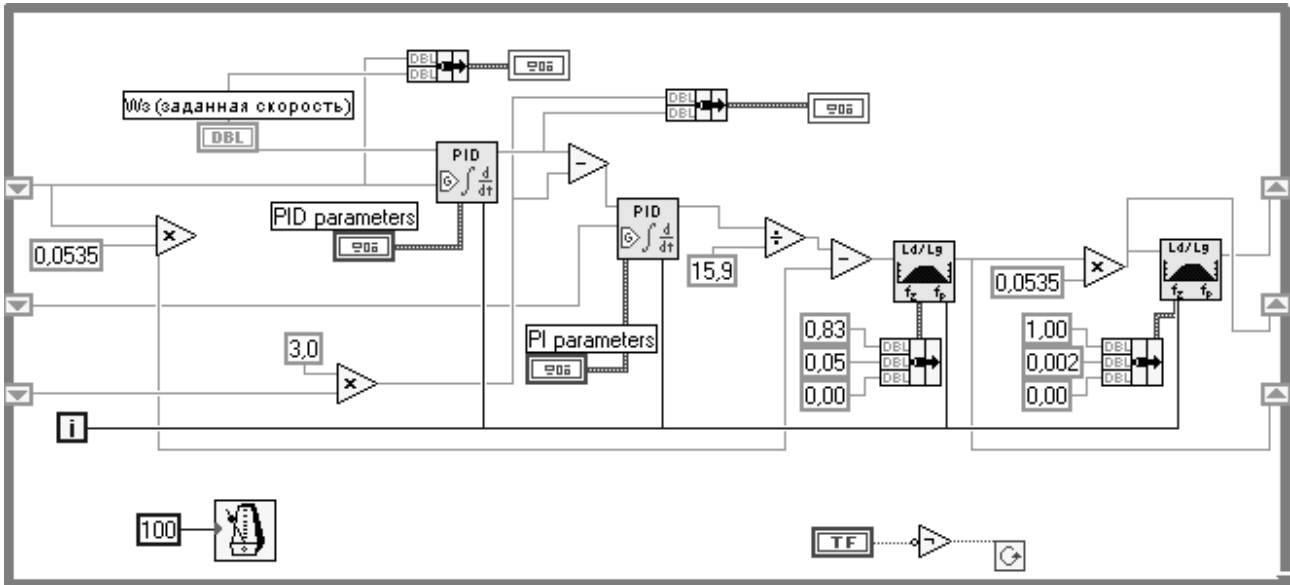


Рис. 7. Програмна модель системи підпорядкованого регулювання

Симуляція функціонування адаптивних регуляторів у створеному віртуальному середовищі здійснюється синхронно в режимі реального часу. Характеристики перехідних процесів доступні для огляду на спільному графіку для порівняння (рис. 8).

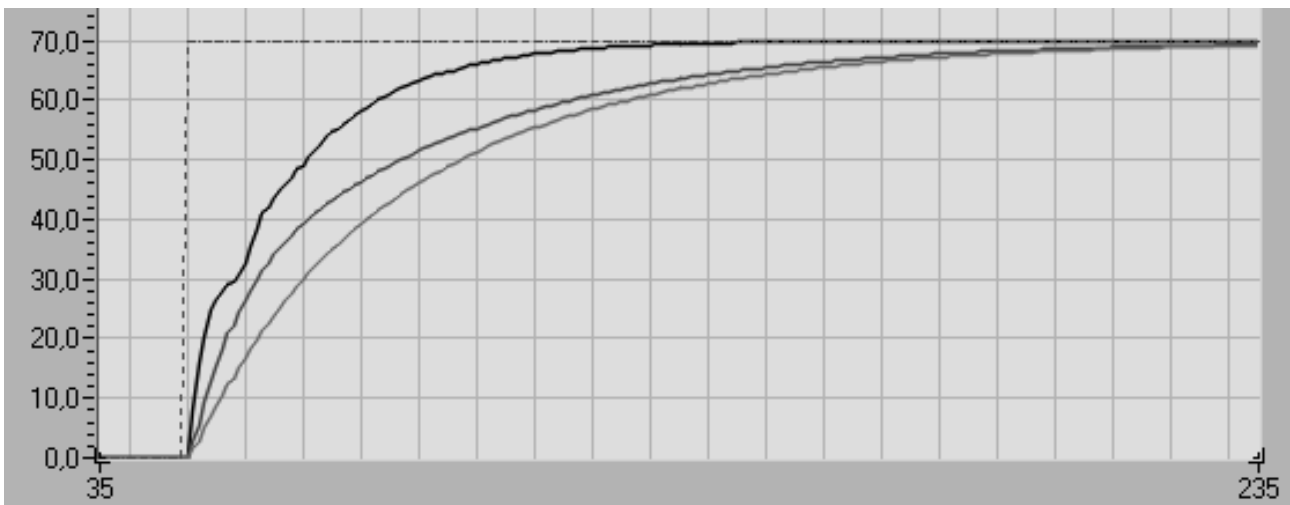


Рис. 8. Порівняльний графік перехідних процесів: а – вплив завдання; б – нечітке автоматичне регулювання; в – система підлеглого регулювання; г – САР із ПІД-регулятором

#### IV Обговорення

В якості об'єкта регулювання використовується електропривід постійного струму з незалежним збудженням. Функцію зворотного зв'язку за частотою обертання виконує імпульсний датчик швидкості. Для контролю струму якоря в ланцюг введений низькоомний резистор, який шунтує його; крім того, контролер може оцінювати силу струму за падінням напруги на цьому резисторі. Мікроконтролер передає результуючий керуючий сигнал у формі ШІМ-сигналу на транзисторний силовий перетворювач. Інформація про поточну частоту обертання відображається на рідкокристалічному індикаторі. Значення швидкості та напрямку обертання двигуна встановлюються за допомогою зовнішньої панелі управління.

Для розробки віртуального комплексу обрано середовище LabVIEW. Цей програмний пакет призначений для застосування в комп'ютеризованих системах збору, контролю та обробки сигналів, включаючи режим реального часу, і відрізняється унікальним математичним апаратом та широкими

можливостями візуалізації даних. LabVIEW є ефективним засобом розробки прикладного програмного забезпечення та знаходить застосування в різних областях.

Основне меню програми складається з двох пунктів: «Моделювання системи адаптивного регулювання» та «Результати моделювання». У програмі реалізовані три системи – САР з ПІД-регулятором, система підлеглого регулювання та нечітка САР. Для кожної з цих систем можна змінити параметри об'єкта керування та налаштування регуляторів, спостерігаючи при цьому перехідний процес на графічному екрані.

Параметри ДПС:

- коефіцієнт передачі;
- постійна часу;
- момент інерції.

Параметри регуляторів:

- коефіцієнт пропорційності;
- час інтегрування;
- постійна часу диференціювання.

У програмі передбачено збереження отриманих перехідних процесів текстового файлу. За промовчанням результати моделювання зберігаються у файлі з ім'ям file.doc на диску D. При повторному запуску моделювання нові дані замінюють збережені.

Пункт меню «Результати моделювання» містить два порівняльні графіки – швидкість обертання двигуна та керуючу дію – вихід регулятора. Час моделювання – 5000 мс. Масштаб графіків можна змінювати шляхом редагування крайніх значень координатних осей.

Як видно з рисунка 8, найбільш якісний перехідний процес отримано у випадку нечіткої системи регулювання. Подібний результат було отримано і під час моделювання САР у математичному пакеті MatLab. Однак криві кутової швидкості та керуючого впливу для обох варіантів моделювання мають певні відмінності. Це зумовлено особливостями побудови програмних моделей, наприклад використання віртуального ПІД-алгоритму стандартних бібліотек LabView, моделювання ДПС за допомогою універсальної динамічної ланки.

## **V Висновки**

В результаті проведеної роботи удосконалено модель комп'ютеризованої системи, що реалізує віртуальний учбовий стенд дослідження регуляторів швидкості та положення для виконавчих електроприводів, яка на відміну від існуючих, містить модуль нечіткої логіки зміни коефіцієнтів регулятора, що дозволяє підвищити якість керування та зменшити витрати часу на налаштування регуляторів.

Практична цінність роботи полягає в розробці програмного модулю на мові G в середовищі LabView з функціями відтворення динамічних властивостей виконавчого електричного привода та аналізу якості перехідних процесів.

## **Бібліографічні посилання**

1. Семенишена Р. В. Віртуальні лабораторні роботи – спосіб формування експериментаторської компетенції здобувачів вищої освіти. Наука і техніка сьогодні, Серія "Техніка". 2023. № 6(20). С. 89-101. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-89-101](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-89-101)
2. Kumar, V. (2019). The inescapable effects of virtual laboratory and comparison of traditional laboratory with virtual laboratory. Communication and Computing Systems. <https://doi.org/10.1201/9780429444272-81>
3. Kwon, J., Kaplan, A. (2024). Enhancing Laboratory Learning: Integrating Virtual Laboratory with In-Person Laboratory Class. South East Section Meeting Proceedings. <https://doi.org/10.18260/1-2--45522>
4. Дементієвська Н. П., Соколюк О.М. Віртуальні лабораторні роботи з фізики з використанням інтерактивних комп'ютерних моделювань: збірник навчальних матеріалів. Київ: ІЦО НАПН України, 2022. 157 с. <https://doi.org/10.33407/lib.naes.733495>
5. Razakov, M. (2023). The virtual laboratory complexes in education system of food technologies. 2nd International Conference on Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD-II-2022). <https://doi.org/10.1117/12.2669462>
6. Chirkunov, K., Karpov, I. (2019). Virtual Laboratory - the Interaction Tool for Geologists and Laboratory Staff. Progress'19, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201953042>

7. Конох І. С. Формування навичок налаштування промислових контролерів сімейства Siemens Simatic S7 студентів освітніх програм з автоматизації / Інженерні та освітні технології. 2022. Т. 10. № 4. С. 20–34. doi: <https://doi.org/10.30929/2307-9770.2022.10.04.02>
8. Пritchyn С. Е., Драгобецький В. В., Шевченко І. В., Палагін В. А., Ломонос А. І., Найда В. В. Система автоматичного управління вимірюванням промислово контрольованих параметрів кремнію для поруватих підкладок. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2021. Випуск 3(55). С. 50-56. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.3.55.50-56
9. Конох І. С., Пантюх С. В. Комп'ютеризована лабораторна система управління припливною вентиляцією на базі програмовано-логічного контролера Siemens s7-1500. II Міжнародний форум «IT-Trends: соціальні медіа, великі дані, штучний інтелект», 20–21 листопада 2015 р., м. Кременчук. С. 28–29.
10. Боровська Т. М. Теорія автоматичного управління: електронний курс лекцій. URL: [https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fksa/11Borovska\\_tau\\_kl/](https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fksa/11Borovska_tau_kl/) (дата звернення 01.05.2024).
11. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ: Либідь, 2007. 656 с.
12. Jones, E. PID Temperature Controller Autotuning for Skipper-CCDs. Fermi Research Alliance. <https://doi.org/10.2172/1993446>
13. Поліщук І. А., Налаштування ПІД-регулятора на основі методу прямого синтезу для об'єктів другого порядку із запізненням». Наукові праці ВНТУ. 2023. Вип. 2. С. 1-11. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2023-2-1-11>
14. Ekici, M., Kahveci, H., Akpinar, A. S. (2013). A LabVIEW based submarine depth control simulator with PID and fuzzy controller. IEEE INISTA. <https://doi.org/10.1109/inista.2013.6577627>
15. Misra, R., Jain, A. (2015). Implementing PID level Controller Using LabVIEW. SAMRIDDI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. <https://doi.org/10.18090/samriddi.v7i1.4467>
16. Junpeng, Zh., Xinfu, L. Research on PID controller for hydraulic servo system based on LabVIEW. International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). <https://doi.org/10.1109/fpm.2015.7337300>
17. Hadad, A. H., Mendis, B. S. U., Gedeon, T. D. (2010). Improvements in Sugeno-Yasukawa modelling algorithm. International Conference on Fuzzy Systems. <https://doi.org/10.1109/fuzzy.2010.5584315>
18. Fantuzzi, C., Rovatti, R., Babuška, R. Rule Reduction Algorithm for SISO Takagi-Sugeno Models. IFAC Proceedings Volumes. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)41353-x](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)41353-x)
19. Hameed, S. (2015). Self-Tuning Fuzzy PI Controller (STFPIC). Fuzzy Logic - Tool for Getting Accurate Solutions, IntechOpen, 02.09.2015. <https://doi.org/10.5772/59810>
20. David, A. J. J. G., Veerappan, M. (2018). Dynamic Modeling for Open- and Closed-loop Control of PMSG based WECS with Fuzzy Logic Controllers. InTech. doi: 10.5772/intechopen.72693
21. Kamila, L. Ch. N. (2020). Fuzzy Sugeno Algorithm for Clustering Document Management. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/05912020>
22. Zhang, Chu-Yun, Li, Liang-Qun, Huang, Sh. (2023). Multiple target data-association algorithm based on Takagi–Sugeno intuitionistic fuzzy model. Neurocomputing. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.03.021>
23. Ding, X., Xu ,Zh., Cheung, Ng. J., Liu, X. (2015). Parameter estimation of Takagi–Sugeno fuzzy system using heterogeneous cuckoo search algorithm. Neurocomputing. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.10.063>

## References

1. Semenishena, R. (2023). Virtual laboratory experiments as a means of developing experimental competence among higher education learners. Science and Technology Today, Technics series, 6(20), 89-101. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-89-101](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-89-101) [in Ukrainian]
2. Kumar, V. (2019). The inescapable effects of virtual laboratory and comparison of traditional laboratory with virtual laboratory. Communication and Computing Systems. <https://doi.org/10.1201/9780429444272-81>
3. Kwon, J., Kaplan, A. (2024). Enhancing Laboratory Learning: Integrating Virtual Laboratory with In-Person Laboratory Class. South East Section Meeting Proceedings. <https://doi.org/10.18260/1-2--45522>
4. Dementievskaya, N. P., Sokolyuk, O. M. (2022). Virtual laboratory works in physics using interactive computer simulations: a collection of educational materials. Kyiv: CEC of the National Academy of Sciences of Ukraine, 157. <https://doi.org/10.33407/lib.naes.733495>
5. Razakov, M. (2023). The virtual laboratory complexes in education system of food technologies. 2nd International Conference on Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD-II-2022). <https://doi.org/10.1117/12.2669462>
6. Chirkunov, K., Karpov, I. (2019). Virtual Laboratory - the Interaction Tool for Geologists and Laboratory Staff. Progress'19, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201953042>
7. Konokh I. (2022). The Skills Formation of Configuring Industrial Controllers of the Siemens Simatic S7 family for students of educational programs in automation. Engineering and Educational Technologies, 10 (4), 20–34. doi: <https://doi.org/10.30929/2307-9770.2022.10.04.02> [in Ukrainian]
8. Pritchyn, S., Dragobetsky, V., Shevchenko, I., Palagin, V., Lomonos, A., Naida, V. (2021). System of automatic control of measurement of industrial controlled parameters of silicon for porous substrates. Electromechanical and energy saving systems, 2(55), 50-56. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.3.55.50-56 [in Ukrainian]
9. Konokh, I. S., Pantiukh, S. V. (2015). Computerized laboratory control system for supply ventilation based on the Siemens s7-1500 programmable logic controller. II International Forum "IT-Trends: social media, big data, artificial intelligence", November 20-21, 2015, Kremenchuk. С. 28-29. [in Ukrainian]

10. Borovskaya, T. M. Theory of automatic control: an electronic course of lectures. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/11Borovska\\_tau\\_kl/](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/11Borovska_tau_kl/) (accessed 01.05.2024). [in Ukrainian]
11. Popovych, M. G., Kovalchuk, O. V. (2007). Theory of automatic control: a textbook. Lybid, Kyiv, Ukraine, 656. [in Ukrainian]
12. Jones, E. PID Temperature Controller Autotuning for Skipper-CCDs. Fermi Research Alliance. <https://doi.org/10.2172/1993446>
13. Polischuk, I. A. (2023). Tuning of the PID controller based on the method of direct synthesis for second-order objects with a delay. Scientific works of VNTU, 2, 1-11. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2023-2-1-11> [in Ukrainian]
14. Ekici, M., Kahveci, H., Akpınar, A. S. (2013). A LabVIEW based submarine depth control simulator with PID and fuzzy controller. IEEE INISTA. <https://doi.org/10.1109/inista.2013.6577627>
15. Misra, R., Jain, A. (2015). Implementing PID level Controller Using LabVIEW. SAMRIDDI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. <https://doi.org/10.18090/samriddi.v7i1.4467>
16. Junpeng, Zh., Xinfu, L. Research on PID controller for hydraulic servo system based on LabVIEW. International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). <https://doi.org/10.1109/fpm.2015.7337300>
17. Hadad, A. H., Mendis, B. S. U., Gedeon, T. D. (2010). Improvements in Sugeno-Yasukawa modelling algorithm. International Conference on Fuzzy Systems. <https://doi.org/10.1109/fuzzy.2010.5584315>
18. Fantuzzi, C., Rovatti, R., Babuška, R. Rule Reduction Algorithm for SISO Takagi-Sugeno Models. IFAC Proceedings Volumes. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)41353-x](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)41353-x)
19. Hameed, S. (2015). Self-Tuning Fuzzy PI Controller (STFPIC). Fuzzy Logic - Tool for Getting Accurate Solutions, IntechOpen, 02.09.2015. <https://doi.org/10.5772/59810>
20. David, A. J. J. G., Veerappan, M. (2018). Dynamic Modeling for Open- and Closed-loop Control of PMSG based WECS with Fuzzy Logic Controllers. InTech. doi: 10.5772/intechopen.72693
21. Kamila, L. Ch. N. (2020). Fuzzy Sugeno Algorithm for Clustering Document Management. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/05912020>
22. Zhang, Chu-Yun, Li, Liang-Qun, Huang, Sh. (2023). Multiple target data-association algorithm based on Takagi–Sugeno intuitionistic fuzzy model. Neurocomputing. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.03.021>
23. Ding, X., Xu ,Zh., Cheung, Ng. J., Liu, X. (2015). Parameter estimation of Takagi–Sugeno fuzzy system using heterogeneous cuckoo search algorithm. Neurocomputing. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.10.063>



**Конох Ігор Сергійович.**

Доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та інформаційних систем, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
E-mail: [konokh.is.univer@gmail.com](mailto:konokh.is.univer@gmail.com)

---

**Konokh Igor Serhiiiovych.**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Automation and Information Systems Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, вул. Universytetska, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600.  
E-mail: [konokh.is.univer@gmail.com](mailto:konokh.is.univer@gmail.com)

---

ORCID: 0000-0001-5930-1957

Researcher ID: 1932824

Scopus ID: 57194700932



**Жуля Артур Романович.**

Магістрант спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, Кафедра автоматизації та інформаційних систем, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
E-mail: [zhulia.a@gmail.com](mailto:zhulia.a@gmail.com)

---

**Zhulia Artur Romanovych.**

Master's degree in 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics, Department of Automation and Information Systems, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, вул. Universytetska, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600.  
E-mail: [zhulia.a@gmail.com](mailto:zhulia.a@gmail.com)

---

ORCID: 0009-0007-4768-2845



**Галенко Антон Юрійович.**

Магістрант спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, Кафедра автоматизації та інформаційних систем, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
E-mail: galenkoa@gmail.com

---

**Halenko Anton Yuriiovich.**

Master's degree in 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics, Department of Automation and Information Systems, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, vul. Universytetska, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600.  
E-mail: galenkoa@gmail.com

---

ORCID: 0009-0000-3668-2355



**Найда Віталій Володимирович.**

Кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації та інформаційних систем, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, м. Кременчук Полтавської обл., Україна, 39600.  
E-mail: najdav30@gmail.com

---

**Naida Vitalii Volodymyrovych.**

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Automation and Information Systems Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, vul. Universytetska, 20, Kremenchuk, Poltava Region, Ukraine, 39600.  
E-mail: najdav30@gmail.com

---

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6821-2072>

Researcher ID: <https://publons.com/researcher/4808521/vitaliy-najda/>

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58089252800>

**Citation (APA):**

Konokh, I., Zhulia, A., Galenko A., Naida, V. (2024). Designing the Virtual Stand of Fuzzy Regulators Study for the Training of Students Majoring in Automation and Computer-Integrated Technologies. Engineering and Educational Technologies, 12 (2), 38–51. doi: <https://doi.org/10.32782/2307-9770.2024.12.02.03>

**Цитування (ДСТУ 8302:2015):**

Конох І. С., Жуля А. Р., Галенко А. Ю., Найда В. В. Розробка віртуального стенду з дослідження нечітких регуляторів для забезпечення підготовки студентів із спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Інженерні та освітні технології. 2024. Т. 12. № 2. С. 38–51. doi: <https://doi.org/10.32782/2307-9770.2024.12.02.03>

**Обсяг статті:** сторінок – 14 ; умовних друк. аркушів – 2,028.