

УДК 62-83:681.52

ОДНОКОНТУРНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ З ДРОБНОВИМІРНИМ ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ

А. В. Федотьев, С. А. Сергієнко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sergsa@kdu.edu.ua

Необхідність забезпечення заданих динамічних властивостей систем керування, з урахуванням внутрішніх і зовнішніх збурюючих впливів, обумовлює процес пошуку та дослідження нових напрямків в області теорії автоматичного керування. Одним із перспективних напрямків вирішення цих питань є застосування дробновимірного числення, що поширює можливості диференціювання та інтегрування на оператори довільного порядку, тобто зі ступенями не тільки цілих чисел, а із будь-якими дійсними або навіть комплексними числами. У роботі досліджується поведінка дробновимірного пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора у складі одноконтурної системи стабілізації швидкості електропривода постійного струму. Формулою для розрахунку дробновимірних похідної та інтегралу обрано рівняння Грюнвальда–Летнікова завдяки його порівняній простоті й принциповій можливості реалізації на сучасній цифровій техніці. Наведено результати досліджень, проведених окремо для дробновимірних похідної (пропорційно-диференціальний регулятор), інтегралу (пропорційно-інтегральний регулятор) та їх спільного впливу у складі пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора. Аналіз результатів показав, що при певних співвідношеннях ступенів диференціальної та інтегральної складових показники якості кращі, ніж для класичного цілочисельного регулятора, що підтверджує доцільність використання запропонованих коригуючих пристроїв у складі системи стабілізації швидкості. Подальший інтерес викликає побудова регресійної моделі експерименту.

Ключові слова: системи керування, дробновимірне числення, пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ С ДРОБНОМЕРНЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

А. В. Федотьев, С. А. Сергиенко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sergsa@kdu.edu.ua

Необходимость обеспечения заданных динамических свойств систем управления с учетом внутренних и внешних возмущающих воздействий обуславливает процесс поиска и исследования новых направлений в области теории автоматического управления. Одним из перспективных направлений решения этих вопросов является применение дробномерного исчисления, которое расширяет возможности дифференцирования и интегрирования на операторы произвольного порядка, т.е. со степенями не только целых чисел, а с любыми действительными или даже комплексными числами. Исследуется поведение дробномерного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в составе одноконтурной системы стабилизации скорости электропривода постоянного тока. Формулой для расчета дробномерных производной и интеграла выбрано уравнение Грюнвальда–Летникова благодаря его сравнительной простоте и принципиальной возможности реализации на современной цифровой технике. Приведены результаты исследований, проведенных отдельно для дробномерных производной (пропорционально-дифференциальный регулятор), интеграла (пропорционально-интегральный регулятор) и их совместного влияния в составе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. Анализ результатов показал, что при определенных соотношениях степеней дифференциальной и интегральной составляющих показатели качества лучше, чем для классического целочисленного регулятора, что подтверждает целесообразность использования предложенных корректирующих устройств в составе системы стабилизации скорости. Дальнейший интерес представляет построение регрессионной модели эксперимента.

Ключевые слова: системы управления, дробномерное исчисление, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Проблеми, пов'язані із забезпеченням заданих динамічних властивостей синтезованих систем керування та збереженням їх при різноманітних збурюючих впливах, як зовнішніх так і внутрішніх, викликають інтерес до пошуку й дослідження нових перспективних напрямків у теорії автоматичного керування. Значний інтерес серед дослідників цих питань викликає застосування дробновимірного числення. Дробновимірне числення є галуззю математики, що оперує процесами диференціювання та інтегрування операторів дові-

льного порядку, тобто зі ступенями не тільки цілих чисел, а з будь-якими дійсними або навіть комплексними числами. Іншими словами, це узагальнення традиційного числення, яке веде до подібних концептів та інструментів, але з більш широкою областю застосувань.

Окрім теоретичного дослідження питання дробновимірних похідних та інтегралів [1, 2], збільшується й число практичних застосувань дробновимірного числення в різних галузях людської діяльності, що використовують математичні методи та засоби

комп'ютерного моделювання, в тому числі й у теорії автоматичного керування щодо методів синтезу систем керування дробновимірному порядку [3–7].

У сучасних системах керування електроприводами постійного й змінного струму широко використовуються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори.

Близько 90–95 % регуляторів, що знаходяться в даний час в експлуатації, використовують ПІД алгоритм [8]. Причиною такої високої популярності є простота побудови й промислового використання, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань і низька вартість. Серед ПІД-регуляторів 64 % займають одноконтурні регулятори і 36 % – багатоконтурні. Контролери зі зворотним зв'язком охоплюють 85 % усіх застосовуваних, контролери з прямим зв'язком – 6 %, контролери, з'єднані каскадно, – 9 % [9].

Після появи дешевих мікропроцесорів і аналого-цифрових перетворювачів у ПІД-регуляторах використовується автоматичне налаштування параметрів, адаптивні алгоритми, методи нечіткої логіки, генетичні алгоритми. Ускладнилися структури регуляторів: з'явилися регулятори з двома ступенями свободи, із застосуванням принципів розімкненого керування в поєднанні зі зворотним зв'язком, із вбудованою моделлю процесу.

Незважаючи на довгу історію розвитку й велику кількість публікацій, залишається багато проблем у питаннях усунення інтегрального насичення, при регулюванні в контурах із гістерезисом, нелінійними об'єктами й транспортною затримкою; практичні реалізації ПІД-контролерів не завжди містять антигасні фільтри, гранична частота фільтра часто обрана неправильно, надмірний шум і зовнішні збурення ускладнюють налаштування параметрів. Проблеми ускладнюються тим, що в сучасних системах керування динаміка часто невідома, регульовані процеси не можна вважати незалежними, вимірювання сильно зашумлені, навантаження непостійне, технологічні процеси безперервні [10].

Однією з можливостей покращення характеристик у системах з ПІД-регуляторами є застосування прийомів дробновимірному числення до його інтегральної та диференціальної складових. У такому випадку ПІД-регулятор буде наданий як ПІД^α. Це робить можливим налаштування порядку диференціатора (α) й інтегратора (β) на додаток до коефіцієнтів пропорційної (K_p), інтегральної (K_i) та диференціальної (K_d) складових, забезпечуючи при цьому більшу гнучкість під час налаштування динамічних властивостей системи керування.

Метою даної роботи є дослідження якісних показників одноконтурної системи стабілізації швидкості електропривода постійного струму з дробновимірним ПІД регулятором.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Як об'єкт керування прийнятий ДПС НЗ, який можна описати системою диференціальних рівнянь [11]:

$$\begin{aligned} p\omega &= \frac{R_e}{kFT_m} I; \\ pI &= -\frac{kF}{R_e T_e} \omega - \frac{1}{T_e} I + \frac{1}{R_e T_e} E; \\ pE &= -\frac{1}{T_p} E + \frac{k_p}{T_p} U, \end{aligned} \quad (1)$$

де R_e – активний опір якорного кола; kF – магнітний потік двигуна; k_p – коефіцієнт тиристорного перетворювача; T_e, T_m – еквівалентні електромагнітна та електромеханічна сталі часу електроприводу; T_p – стала часу тиристорного перетворювача; ω, I, E – діючі значення швидкості обертання двигуна, струму якорного кола, ЕРС двигуна відповідно.

Для об'єкту керування (1), використовуючи модульний критерій, було синтезовано керування:

$$U(\omega) = sat \left[(K_p + K_i \frac{1}{p} + K_D p)(\omega^* - \omega) \right], \quad (2)$$

де ω^* – бажане значення швидкості; K_p – пропорційна складова регулятора:

$$K_p = \frac{T_m}{2T_\mu 1 / kFk_p}, \quad (3)$$

де T_μ – мала некомпенсована стала часу.

K_I – інтегральна складова регулятора:

$$K_I = \frac{1}{2T_\mu 1 / kFk_p}. \quad (4)$$

K_D – диференціальна складова регулятора:

$$K_D = \frac{T_e T_m}{2T_\mu 1 / kFk_p}. \quad (5)$$

Замінивши в керуванні (2) похідну p та інтеграл $\frac{1}{p}$ їх дробновимірними аналогами p^α і $\frac{1}{p^\beta}$, приведемо керуючий вплив до вигляду:

$$U(\omega) = sat \left[(K_p + K_i \frac{1}{p^\beta} + K_D p^\alpha)(\omega^* - \omega) \right]. \quad (6)$$

При реалізації керуючого впливу (6), для розрахунку дробновимірної похідної, використовувалося рівняння Грюнвальда–Летнікова [1]:

$$p^\alpha \omega(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^i \frac{G(\alpha+1)}{G(i+1)G(\alpha-i+1)} (\omega^* - \omega)(t-ih), \quad (7)$$

де N, h – обсяг і інтервал вибірки; $G(\dots)$ – гамма-функція (G-функція) відповідного аргументу.

Опираючись на [1], було отримане рівняння для розрахунку дробновимірному інтегралу:

$$p^\beta \omega(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^\beta \sum_{i=0}^{N-1} \frac{G(\alpha+j)}{G(j+1)G(\alpha)} (\omega^* - \omega)(t-ih). \quad (8)$$

Дослідження системи (1) з алгоритмом керування (6) виконувалися на математичній моделі, де значення дробновимірної похідної (7) та інтегралу (8) розраховуються в зовнішньому m-файлі відповідно до приведених рівнянь [12]. Програма розрахунку працює протягом заданого часу t_k із кроком кожної ітерації h . У свою чергу, з кожним кроком h алгоритму запускається математична модель і передає дані про положення досліджуваних координат для розрахунку.

Оскільки аперіодична ланка моделі надана інтегральною, охопленою від'ємним зворотнім зв'язком, то з'являється можливість передачі початкових умов в інтегратор у поле «Initial condition».

Однією з важливих особливостей даного підходу є наявність трьох параметрів (величина вибірки, крок вибірки та ступінь похідної або інтегралу), змінюючи які можна напряму впливати на змодельовану систему. Причому змінювати параметри можна не тільки статично, а й динамічно (наприклад, залежно від часу). Отже, для будь-якої електромеханічної системи, варіюючи різними комбінаціями згаданих вище параметрів, можна відшукати таке співвідношення, що відповідає найкращим показникам якості даної системи.

Розраховуючи похідні та інтеграли дробновимірного порядку, має місце таке поняття, як «коротка пам'ять». У даному алгоритмі воно враховане шляхом додаткового циклу для розрахунку на початкових ітераціях.

Дослідження проводилося для електроприводів постійного струму в діапазоні потужностей 1,5–100 кВт. Подальші результати надано для двигуна постійного струму типу 4ПФ132М ($P_n=11$ кВт, $U_n=220$ В, $n_n=825$ об/хв, $R_e=1,62$ Ом, $L_e=0,052$ Гн, $J=0,216$ кг·м², $\kappa F=1,6$ Вб). Параметри розрахунку дробновимірних складових: $h=2 \cdot 10^{-4}$, $N=20$. Дослідження проведено для дробновимірних похідної (ПД-регулятор), інтегралу (ПІ-регулятор) та для їх спільного впливу у складі ПІД-регулятора. Оцінювалися наступні прямі показники якості: час першого узгодження t_{ny} , показник перерегулювання σ , час регулювання t_p (похибку регулювання обрано на рівні 1 %) та статична похибка $\Delta\omega$.

Перехідні процеси за швидкістю при зміні показника ступеня диференціальної складової у складі ПД-регулятора показано на рис. 1. Показники якості перехідних процесів (рис. 1) зведено до табл. 1.

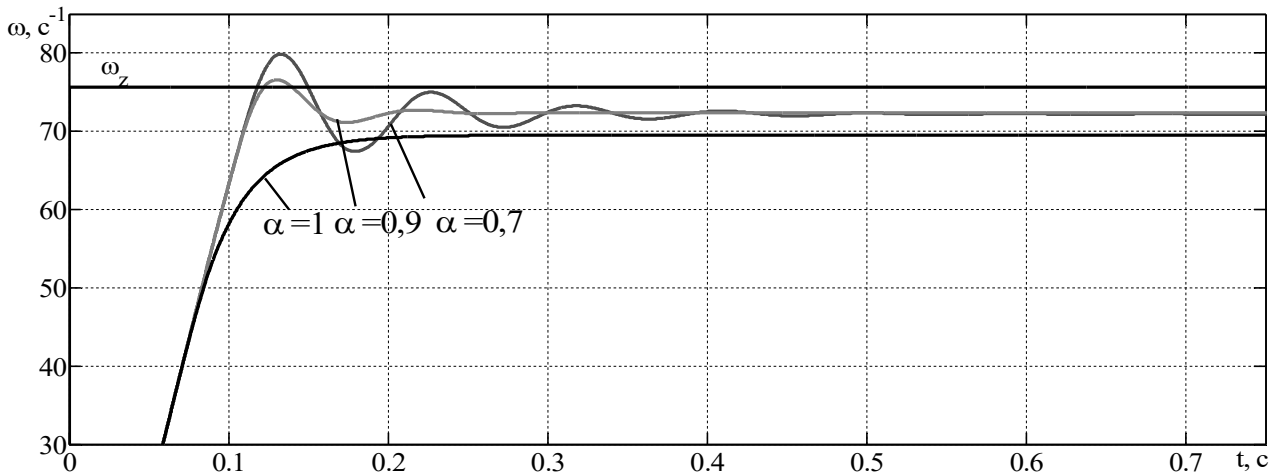


Рисунок 1 – Перехідні процеси за швидкістю при зміні показника ступеня диференціальної складової в системі з ПД-регулятором

Таблиця 1 – Показники якості системи керування з дробновимірним ПД-регулятором

α	$t_{ny}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$t_p, \text{с}$	$\Delta\omega, \%$
1	–	0	0,181	8,1
0,9	0,113	5,83	0,188	4,5
0,7	0,112	10,61	0,29	4,52

Результат проведеного дослідження показав, що зменшення показника α характеризується зниженням впливу похідної в законі керування. Це призводить до підвищення коливальності в системі й, як наслідок, збільшення часу регулювання. Так, при ступеню Д-складової $\alpha = 0,7$ час регулювання збільшився на 60,2 % порівняно із цілочисельною похідною. Статична ж похибка знижується при зменшенні показника ступеня диференціювання. Для $\alpha = 0,7$ вона менша, ніж для $\alpha = 1$, на 55,8 %.

У результаті проведення дослідження з дробновимірним ПІ регулятором було отримано характеристики перехідних процесів (рис. 2) та показники якості такої системи керування (табл. 2).

Проведений дослід показав, що зміна ступеня дробновимірного інтегралу у складі ПІ регулятора майже не впливає на показник перерегулювання та взагалі не впливає на час першого узгодження. Як зменшення, так і збільшення ступеня ведуть до підвищення часу регулювання (для $\beta = 0,9$ більше на 70 % і для $\beta = 1,1$ – на 24 % порівняно з $\beta = 1$), що зумовлено збільшенням коливальності системи.

Аналіз отриманих результатів для І-складової показав, що зміна ступеня інтегрування однозначно погіршує якісні показники в системі, незначною мірою прискорюючи швидкість протікання процесів у ній. Отже, зміна ступеня інтегральної складової окремо в ПІ регуляторі не є практичною користю, й

подальші дослідження мають бути проведені для взаємного впливу цих складових (рис. 3).

Проаналізувавши отримані дані, з'ясовано, що при певних співвідношеннях ступенів диференціальної та інтегральної складових показники якості кращі, ніж для класичного цілочисельного регулятора. Наведені у табл. 3 результати показують, що найбільш оптимальний перехідний процес отриманий при $\alpha = 0,95$ і $\beta = 0,85$. Час регулювання в даному випадку зменшився на 49,5 %, а час першого узгодження – на 11,1 % порівняно з часом регулювання для цілочисельного ПІД-регулятора. Показник перерегулювання збільшився лише на 0,8 %.

Ускладненням при технічній реалізації рівняння Грюнвальда–Летнікова може стати підсумування низки елементів, яка утворюється при прагненні обсягу вибірки до нескінченності [13]. Необхідність запам'ятовувати масиви інформації нескінченно великих обсягів є технічно нереалізованою, тому величина вибірки повинна відповідати можливостям сучасної цифрової техніки, забезпечуючи при цьому бажані показники якості. Дослідження впливу значення обсягу вибірки на перехідні процеси в системі було проведено для ПІД-регулятора зі ступенями диференціальної та інтегральної складових $\alpha = 0,95$ і $\beta = 0,85$ (рис. 4).

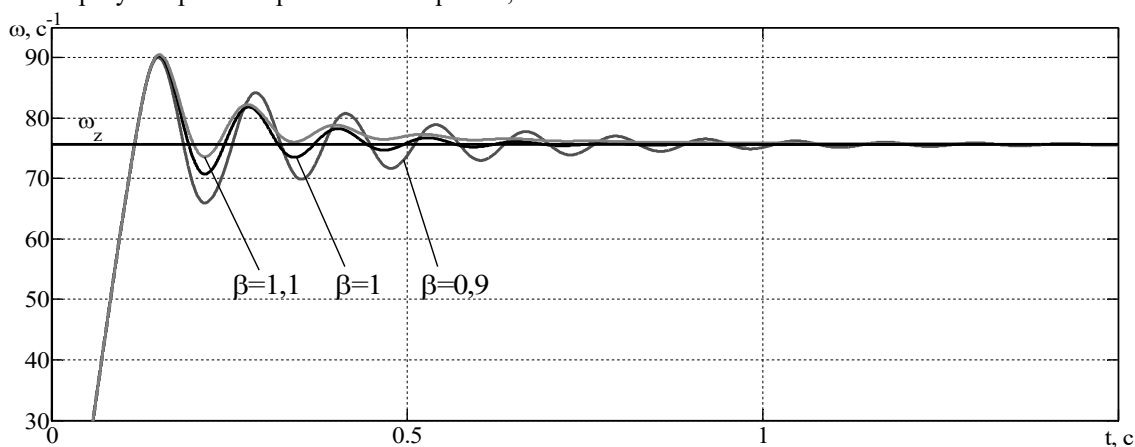


Рисунок 2 – Перехідні процеси за швидкістю при зміні показника ступеня інтегральної складової у складі ПІ-регулятора

Таблиця 2 – Показники якості системи керування з дробновимірним ПІ-регулятором

β	t_{ny}, c	$\sigma, \%$	t_p, c	$\Delta\omega, \%$
1	0,1172	19,41	0,5489	–
1,1	0,1172	19,66	0,6814	–
0,9	0,1172	18,99	0,9324	–

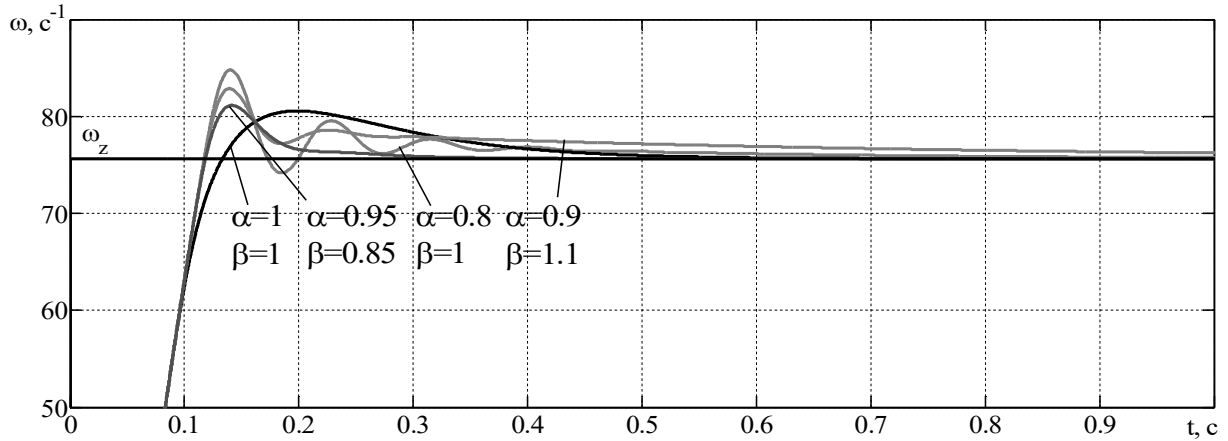


Рисунок 3 – Перехідні процеси за швидкістю при зміні показника ступеня інтегральної та диференціальної складових

Таблиця 3 – Показники якості системи керування з дробновимірним ПІД-регулятором

α	β	t_{ny}, c	$\sigma, \%$	t_p, c
1	1	0,1332	6,5	0,4284
0,8	1	0,1172	12,1	0,505
0,9	1,1	0,1174	9,56	0,8768
0,95	0,85	0,1184	7,3	0,2165

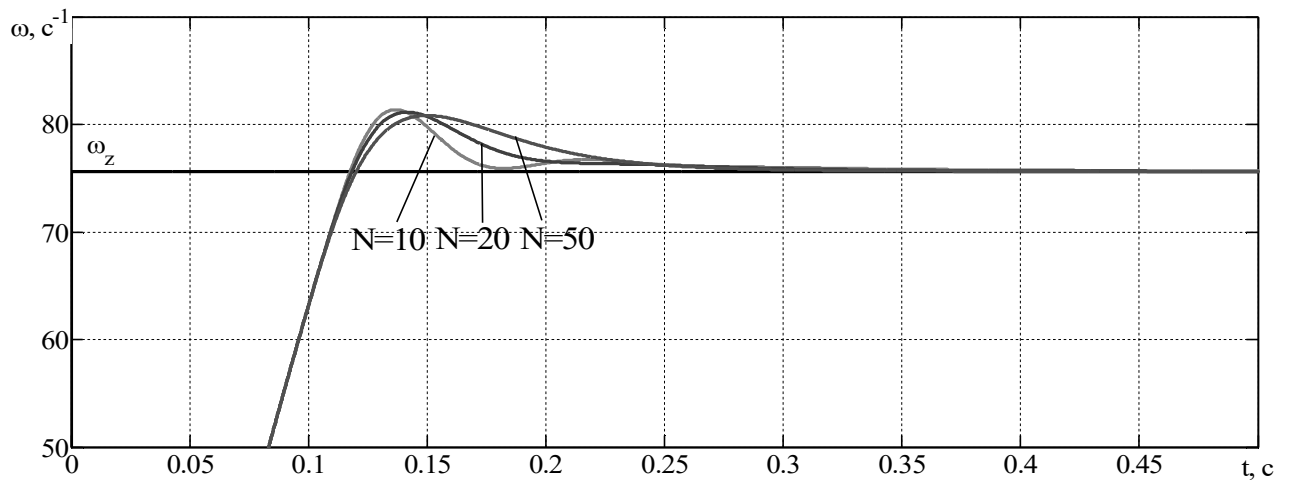


Рисунок 4 – Перехідні процеси за швидкістю для дробновимірного ПІД-регулятора при зміні обсягу вибірки

Таблиця 4 – Показники якості системи керування з дробновимірним ПІД-регулятором для різних значень обсягу вибірки

N	t_{ny}, c	$\sigma, \%$	t_p, c	$\Delta\omega, \%$
20	0,1184	7,3	0,2165	–
10	0,1176	7,6	0,2415	–
50	0,1202	6,9	0,2402	–

Аналіз показників якості, наведених у табл. 4, показав, що зменшення обсягу вибірки веде до зменшення часу першого узгодження на 0,7 %, збільшення показника перерегулювання та часу регулювання на 4,1 та 11,5 % відповідно. Збільшення обсягу вибірки призвело до збільшення часу першого узгодження та часу регулювання на 1,5 та 10,9 % відповідно й зменшення показника перерегулювання на 5,5 %.

ВИСНОВКИ. Отримані результати показали доцільність використання дробновимірної ПД-регулятора у складі одноконтурної системи стабілізації швидкості електропривода постійного струму для надання системі покращених характеристик. Для отримання якісного уявлення про взаємний вплив дробновимірних складових на протікаючі в системі процеси необхідне проведення подальших досліджень, що включає в себе побудову регресійної моделі експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.
2. Zhang X.G., Liu L.S., Wu Y.H., Lu Y.N. The iterative solutions of nonlinear fractional differential equations // *Applied Mathematics and Computation*. – 2013. – Iss. 219. – PP. 4680–4691.
3. Сергієнко С.А., Волянський Р.С. Синтез функціоналів якості для дробновимірних систем керування // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2. – С. 22–26.
4. Бушер В.В. Моделирование систем с дробно-дифференцирующими и дробно-интегрирующими звеньями в SIMULINK // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 4 – С. 138–142.
5. Yuting L., Junmin L. Stability analysis of fractional order systems based on T–S fuzzy model with the

fractional order α : $0 < \alpha < 1$ " // *Nonlinear Dynamics*. – Iss. 78/2014 (4). – PP. 2909–2919.

6. Kingni S.T., Ngueteu G.S.M., Woafu P. Bursting generation mechanism in a three-dimensional autonomous system, chaos control, and synchronization in its fractional-order form" // *Nonlinear Dynamics*. – Iss. 76/2014 (2). – PP. 1169–1183.

7. Butkovskii G., Postnov S., Postnova E. Fractional integro-differential calculus and its control-theoretical applications. I. Mathematical fundamentals and the problem of interpretation" // *Automation and Remote Control*. – Iss. 74/2013 (4). – PP. 543–574.

8. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A. Parvis M. A multi-layer architecture for distributed data acquisition" // *Instrumentation and Measurement Technology, Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. – 2002. – Iss. 2. – PP. 1261–1264.

9. Li Y., Ang K., Chong G. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // *Control Systems*. – Iss. 26/2006 (1). – PP. 41–54

10. Олсон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб: Невский диалект, 2001. – 557 с.

11. Чорний О.П., Родькін Д.Й., Луговой А.В. та інш. Моделювання електромеханічних систем: підручник. – Кременчук: КрНУ, 2001. – 375 с.

12. Федотьев А.В., Сергієнко І.С., Сергієнко С.А. Особенности моделирования дробновимірних регуляторів в системах автоматичного керування електроприводами // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи, методи моделювання та оптимізації*. Збірник наукових праць XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 09–11 квітня 2016 р., м. Кременчук. – С. 49–50.

13. Кузев И.О., Сергиенко С.А., Волянский Р.С. Дробномерные регуляторы с «короткой памятью» в релейных системах оптимального управления // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3. – С. 49–53.

SINGLE LOOP VELOCITY-CONTROL SYSTEM WITH A FRACTIONAL PID CONTROLLER

A. Fedotiev, S. Serhiienko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sergsa@kdu.edu.ua

Purpose. To study a performance of the single loop velocity-control system of an electric drive with a fractional proportional-integral-derivative controller. **Methodology.** We have applied the mathematical simulation of electromechanical systems and synthesis procedures of optimal control systems of the direct current electric drive. The fractional calculus theory has been used. Fractional calculus is dealing with differentiation and integration under an arbitrary order of the operation, i.e. the order can be any real or even complex number, not only the integer one. The Grünwald–Letnikov formula was used as an equation for fractional differentiation and integration due to its simplicity and technical feasibility with modern digital equipment. **Results.** The results of researches, which have been carried out on fractional derivative (proportional-derivative controller), fractional integral (proportional-integral controller) and mutual effect of those two components in the composition of proportional-integral-derivative controller are presented. An analysis of the obtained results indicated that decrease of fractional derivative power led to the system oscillation increase and thus to the settling time decrease; variation of fractional integral power definitely deteriorates system per-

formance, which makes further studies on proportional-integral controller impractical; the certain power ratios of differential and integral components have led to the improved system performance compared with the conventional integer-order controller. The sample size effect on synthesized system performance was studied. Of further interest for the study on fractional components mutual effect on control system is to obtain a regression model of the experiment. **Originality.** The study was made of the effect of controller different configuration on the transient response of single loop control system. A possibility to improve system performance using fractional components of controller was proved. **Practical value.** The results obtained can be expediently applied for design solutions to create control systems of high precision electric drive. References 13, tables 4, figures 4.

Key words: control systems, fractional calculus, proportional-integral-derivative controller.

REFERENCES

1. Samko, S.G., Kilbas, A.A. and Marichev, O.I. (1987), *Integraly i proizvodnye drobnogo poriadka I nekotoryeikh prilozheniia* [Fractional integrals and derivatives and some of their applications], Nauka i tekhnika, Minsk. (in Russian)
2. Zhang, X.G., Liu, L.S., Wu, Y.H. and Lu, Y.N. (2013), "The iterative solutions of nonlinear fractional differential equations", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 219, pp. 4680–4691.
3. Serhienko, S. and Voliansky R. (2012), "Synthesis of optimal control problems with nonlinear functions activation", *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Vol. 2, pp. 22–26. (in Ukrainian)
4. Bousher, V. (2011), "The model of system with fractional integral and fractional differential in SIMULINK", *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Vol. 4, pp. 138–142. (in Russian)
5. Yuting, Li and Junmin, Li. (2014), "Stability analysis of fractional order systems based on T–S fuzzy model with the fractional order $\alpha: 0 < \alpha < 1$ ", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 78, no. 4, pp. 2909–2919.
6. Kingni, S.T., Ngueuteu, G.S.M. and Wofo, P. (2014), "Bursting generation mechanism in a three-dimensional autonomous system, chaos control, and synchronization in its fractional-order form", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 76, no. 2, pp. 1169–1183.
7. Butkovskii, A., Postnov, S. and Postnova, E. (2013), "Fractional integro-differential calculus and its control-theoretical applications. I. Mathematical fundamentals and the problem of interpretation", *Automation and Remote Control*, Vol. 74, no. 4, pp. 543–574.
8. Bertocco, M., Cappellazzo, S., Flammini, A. and Parvis, M. (2002), "A multi-layer architecture for distributed data acquisition", *Instrumentation and Measurement Technology, Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 2, pp. 1261–1264.
9. Li, Y., Ang, K. and Chong, G. (2006), "Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art", *Control Systems*, Vol. 26, no. 1, pp. 41–54.
10. Olson, G. and Piani, D. (2001), *Tsyfrovyye sistemy avtomatizatsyii upravleniia* [Digital systems of automation and control], Nevskiy dialect, Saint Petersburg. (in Russian)
11. Chorny, O.P., Rodkin D.I., Lugovoy, A.V. et al. (2001), *Modelirovanie elektromekhanicheskikh system* [The modeling of electromechanical systems], KrNU, Kremenchuk. (in Ukrainian)
12. Fedotiev, A.V., Serhienko, I.S. and Serhienko, S.A. (2016), "The modeling particularities of fractional order controllers which are part of automatic control systems of electric drive", *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modeliuvannia ta optymizatsii. Zbirnyk naukovykh prats XIV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh I spetsialistiv* [Electromechanical and Energy Systems, Modeling and Optimization Methods. Conference proceedings of the 14th International conference of students and young researches], Kremenchuk, KrNU, April 09–11, 2016, pp. 49–50. (in Ukrainian)
13. Kuzev, I., Serhienko, S. and Voliansky, R. (2011), "Fractional regulator with "short memory" in relay systems of optimal control", *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Vol. 3, pp. 49–53. (in Russian)

Стаття надійшла 02.12.2016.