

АНОТАЦІЯ

Горошко В. В. Оптимізація динамічних режимів електричних машин з використанням дробово-інтегральних регуляторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2020.

Об'єкти дослідження в дисертаційній роботі – електромеханічні системи, характерною особливістю яких є наявність суттєвої ступеневої залежності в математичному описі. Через це виникають проблеми при виборі структури та параметрів регуляторів. Зокрема, в двигуні постійного струму з послідовним збудженням, вентильно-реактивному двигуні та електромагнітних гальмах може відбуватися насичення магнітної системи в статичних і динамічних режимах. Застосований в роботі апарат дробово-інтегрального числення дозволяє такі нелінійні об'єкти описати з високою точністю лінійними передавальними функціями дробового порядку. Так, для якірного ланцюга двигуна постійного струму з послідовним збудженням така апроксимація дає найменшу середньоквадратичну похибку. Комбінація звичайного PID-регулятора с дробово-інтегральними складовими порядку 0.35 і 1.35 забезпечує найкращу якість перехідного процесу – струм досягає заданого значення максимально швидко без перерегулювання. По-друге, вентильно-реактивний двигун, в моделі якого необхідно враховувати ступеневі залежності, при описі перехідних процесів швидкості при стрибку напруги апроксимований аперіодичною функцією порядку 0.7. З сімейства досліджених регуляторів традиційний PI-регулятор з додатковими дробово-інтегральними складовими порядку 0.7 і 1.7 забезпечив астатизм контуру швидкості порядку 1.7 і найменше перерегулювання. Третій досліджений об'єкт – електромагнітні гальма, що встановлюються на ведучі колеса автомобіля для

налаштування двигуна внутрішнього згорання – також після тестування найбільш точно описано передавальною функцією дробового порядку. За допомогою PIDIT^m-регулятора, що забезпечив астатизм замкненого контуру порядку 1.63, досягнуто стабілізацію швидкості обертання двох коліс без протифазних коливань і точне відпрацювання трикутної тахограми. Таким чином, завдяки апарату дробово-інтегрального числення, забезпечується більш точна ідентифікація параметрів об'єкта, математичний опис зводиться до лінійних передавальних функцій дробового порядку, в замкнених системах можна забезпечити астатизм дробового порядку 1.3...1.7 і домогтися кращої якості перехідних процесів, ніж при використанні класичних методів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше виконана ідентифікація якірного ланцюга двигуна послідовного збудження передавальною функцією з дробовим порядком, що в порівнянні з моделями цілочисельного порядку забезпечує мінімальну похибку при розрахунку перехідних процесів при струмі якоря вище номінального, що дозволило вибрати структуру регулятора з дробовим порядком астатизму 1.35 і отримати замкнену систему з найкращими динамічними і статичними показниками.

2. Отримав подальший розвиток метод ідентифікації контуру швидкості в вентильно-реактивному двигуні на базі дробово-аперіодичної функції при різних прикладених напругах з постійними кутами включення і виключення, що дозволило зменшити похибку ідентифікації, синтезувати регулятор з дробовим порядком, при якому отримано мінімальний час першого узгодження з перерегулювання не більше 2%.

3. Вперше синтезовано регулятор з дробовим порядком інтегрування в системі керування двома електромагнітними гальмами в стенді для налаштування паливної системи двигуна внутрішнього згорання автомобілів, що дозволило забезпечити мінімальне перерегулювання з кращою динамічною та статичною точністю, внаслідок чого підвищується точність налаштування паливної системи

та вимірювання максимальної потужності та моменту двигунів.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновано модель і метод ідентифікації параметрів якірного ланцюга двигуна послідовного збудження з подальшим синтезом регуляторів, які враховують ефект насичення магнітної системи двигуна.

2. Запропоновано модель і метод ідентифікації параметрів контуру швидкості вентильно-реактивного двигуна при різних прикладених напругах з подальшим синтезом регуляторів з урахуванням нелінійних залежностей поточозчеплення та моменту від струму фази та положення ротора.

3. Створено систему керування на основі дробового регулятора в стенді налаштування паливної системи двигуна внутрішнього згорання, при яких перехідні процеси мали мінімум перерегулювання і більший порядок астатизму, що дозволяє відпрацьовувати сигнал завдання з точністю $\pm 0.2\%$.

Дослідження двигуна постійного струму з послідовним збудженням, вентильно-реактивного двигуна та електромагнітного гальма проведено за загальноприйнятою методикою. На підставі тестування об'єктів шляхом подачі стандартних сигналів виконувалася ідентифікація параметрів моделей з подальшим синтезом оптимальних регуляторів і перевіркою замкнених систем. На стадії ідентифікації, крім загальноприйнятих, розглянуто моделі, що включають в себе дробово-диференціальні рівняння. Такий вибір обумовлений тим, що в основі апарату дробово-інтегрального числення лежать степеневі функції, а в розглянутих електромеханічних об'єктах крива намагнічування також близька до ступеневої функції. Саме це дозволяє стверджувати, що регулятори з інтегральними і диференціальними складовими нецілого порядку можуть забезпечити найкращі динамічні і статичні показники систем.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, зазначено основні наукові і практичні положення, що виносяться на

захист. Наведено інформацію про апробацію роботи та її структуру, а також про публікації автора за темою дисертації.

У першому розділі надаються короткі відомості про історію розвитку дробового числення, його область застосування (зокрема в системах керування) та огляд різноманітних методів для апроксимаційного розрахунку дробового інтеграла або похідної.

У другому розділі досліджується двигун постійного струму з послідовним збудженням при врахуванні кривої намагнічування в динамічних процесах з подальшою апроксимацією контуру струму передавальною функцією з дробовим порядком та синтезом відповідних регуляторів з різним порядком астатизму.

У такому двигуні при струмі вище номінального перехідні процеси суттєво відрізняються від рішень диференціальних рівнянь першого або другого порядків. При математичному описі перехідного процесу розглянуто наступні передавальні функції об'єкта керування:

$$W_{co1} = \frac{K}{a_0 s^\mu + 1}, W_{co2} = \frac{K}{a_1 s + a_0 s^\mu + 1}, W_{co3} = \frac{K}{a_1 s^{1+\mu} + a_0 s^\mu + 1} \quad (1)$$

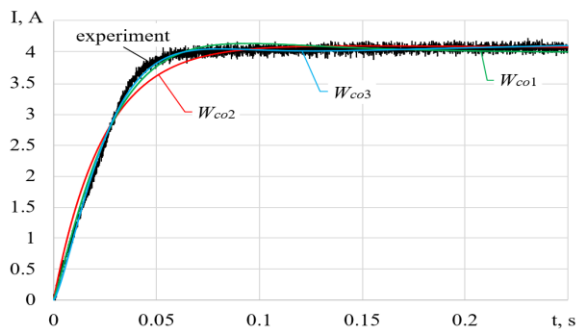


Рис. 1. Графіки переходних процесів передавальних функцій W_{co1} , W_{co2} , W_{co3} та експериментальні дані

мінімальну середньоквадратичну похибку серед розглянутих. Експериментальні та розрахункові графіки зіставлені на рис. 1.

В ході експериментальних досліджень найкращу якість перехідного процесу отримано з PID Γ^μ -регулятором (рис. 2, а). У цьому випадку струм досягає заданого значення максимально швидко та без перерегулювання.

Передавальна функція W_{co3} з дробовим порядком $\mu+1$ має

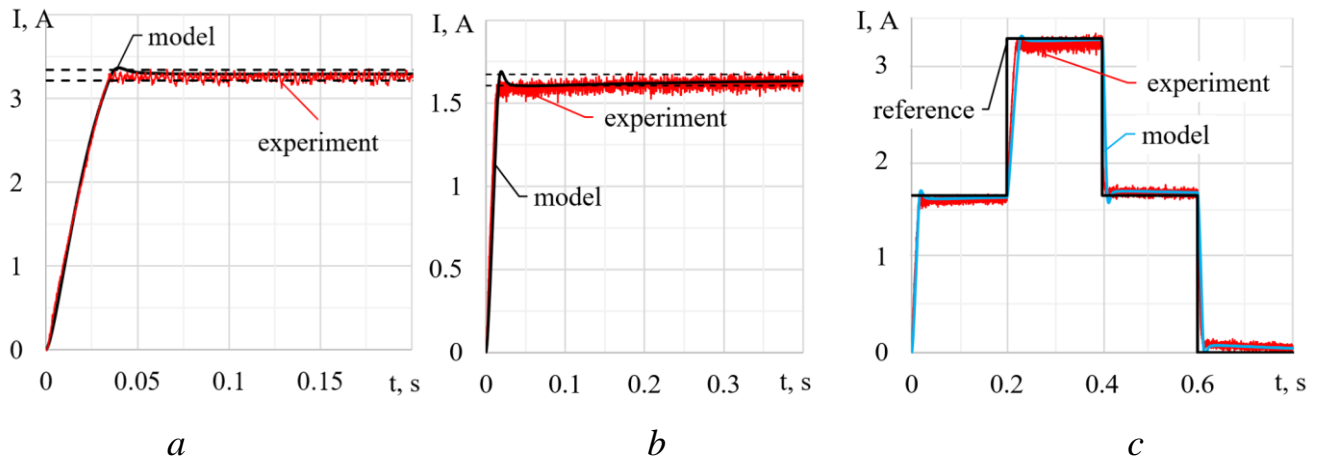


Рис. 2. Перехідний процес при $PID1^{\mu}$ -регуляторі при сигналі завдання струму 3.2 А (a) і 1.6 А (b) та при ступінчастій зміні сигналу (c)

Виявилося, що такий регулятор ефективний і при сигналах завдання вдвічі нижче максимального, а також при ступінчастій зміні завдання (рис. 2, b, c). Видно, що якісні показники системи залишаються незмінними і відповідними оптимальним. Отримані результати є новими, що дозволило сформулювати 1-й пункт наукової новизни.

У третьому розділі досліджується модель вентиляно-реактивного двигуна з врахуванням нелінійної залежності поточкозчеплення та моменту з подальшою апроксимацією контуру швидкості та синтезом регуляторів з різним порядком астатизму.

Для ідентифікації замкненого контуру швидкості вентиляно-реактивного двигуна обрано дробово-аперіодичну передавальну функцію наступного виду:

$$W_{col} = \frac{K}{a_0 s^{\mu} + 1}. \quad (2)$$

Результати апроксимації ілюструє рис. 3. Як видно, при різних

прикладених напругах характер перехідного процесу змінюється, але використання передавальної функції дробового порядку (2) забезпечує найменше відхилення. Також це дозволяє при синтезі регуляторів відмовитися від складної моделі двигуна, яка будується на системі

нелінійних диференціальних рівнянь.

Відповідно, істотно спрощується налаштування замкнутого контуру – модульний оптимум забезпечує ПІ^γ-регулятор, а дробовий порядок астатизму 1.7 досягається за допомогою РПІ^μ-регулятора.

На рис. 4 показано результати моделювання перехідних процесів в контурі керування швидкістю вентиляльно-реактивного двигуна. На рис. 4, *a* – графіки перехідних процесів при стрибку завдання, на рис. 4, *b* – при ступінчастій зміні сигналу завдання. У обох випадках

система з дробовим порядком астатизму характеризується кращими динамічними показниками.

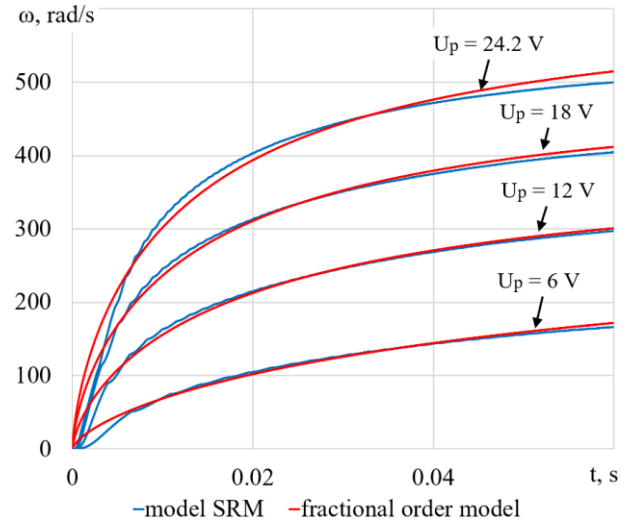


Рис. 3. Графіки перехідних процесів швидкості в розімкненій системі при різних значеннях напруги

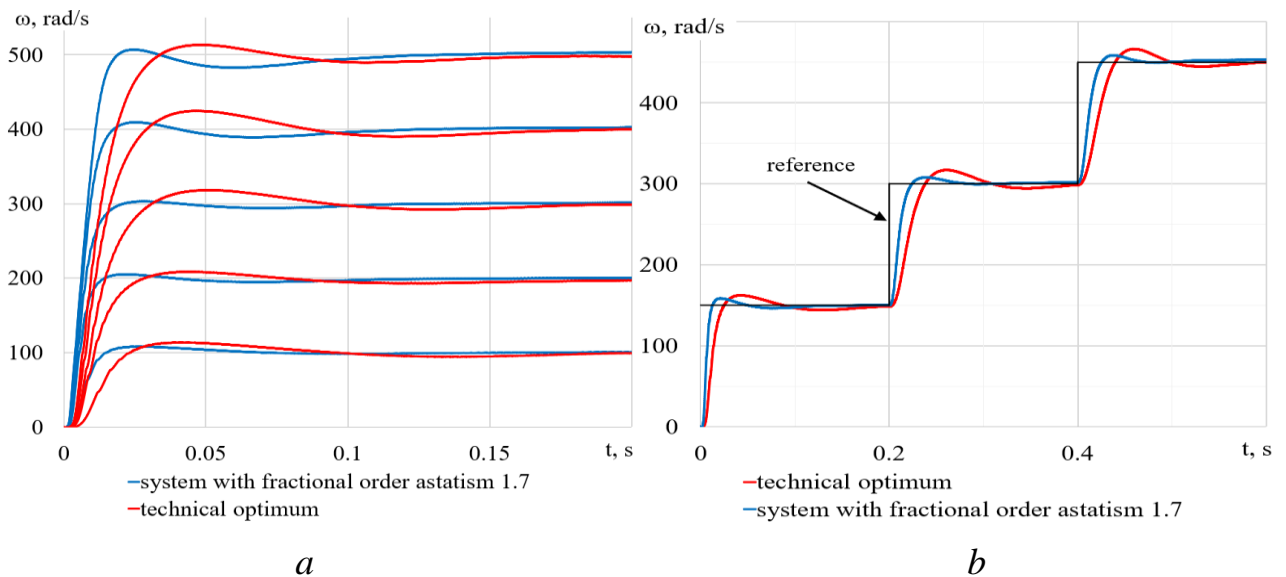
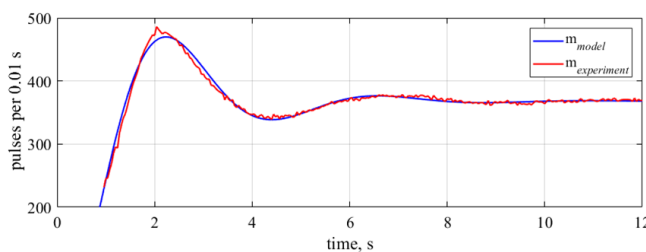


Рис. 4. Графіки перехідних процесів швидкості вентиляльно-реактивного двигуна: *a* – при стрибках завдання, *b* – при ступінчастій зміні сигналу завдання

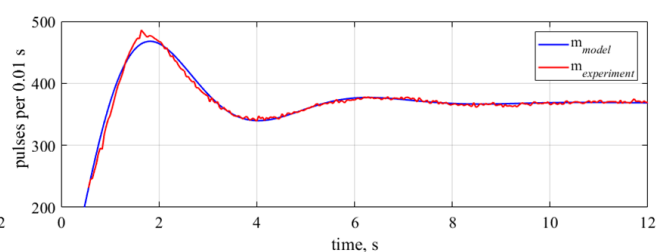
У четвертому розділі досліджено систему керування двома електромагнітними гальмами. За принципом дії електромагнітне гальмо має нелінійні залежності, що ускладнює синтез системи керування. Також на відміну від двох інших об'єктів електромагнітні гальма вбудовані в стенд для налаштування паливної системи двигуна внутрішнього згоряння автомобілів. Тому спочатку підібрано PID-регулятор, при якому отримано перехідний процес з найменшими коливальністю, перерегулюванням та протифазними коливаннями швидкостей коліс. Це дозволило ідентифікувати структурну схему і параметри динамічної моделі об'єкта керування.

З розглянутих варіантів математичного опису найкращий і практично однаковий збіг розрахункових і експериментальних характеристик забезпечили дві передавальні функції – інерційна ланка 3-го порядку:

$$W_{col}(s) = \frac{K}{(a_1s + 1)(a_2s + 1)(a_3s + 1)} \quad (3)$$



a



b

Рис. 5. Графіки перехідних процесів моделі m_{model} при передавальних функціях W_{col} (a), W_{co2} (b) та експерименту $m_{experiment}$

На основі передавальних функцій W_{col} (3) та W_{co2} (4) отримано PID-, D^μI^ν- та PID^μI^ν-регулятор. Проведені експериментальні дослідження дозволили зіставити

та модель дробового порядку:

$$W_{co2}(s) = \frac{K}{a_1s^{1+\mu_{co}} + a_2s^{\mu_{co}} + 1} \quad (4)$$

Перехідні процеси за передавальними функціями (3), (4) та отримані експериментально зіставлені на рис. 5.

швидкодію та перерегулювання за швидкістю в системі з синтезованими регуляторами (рис. 6).

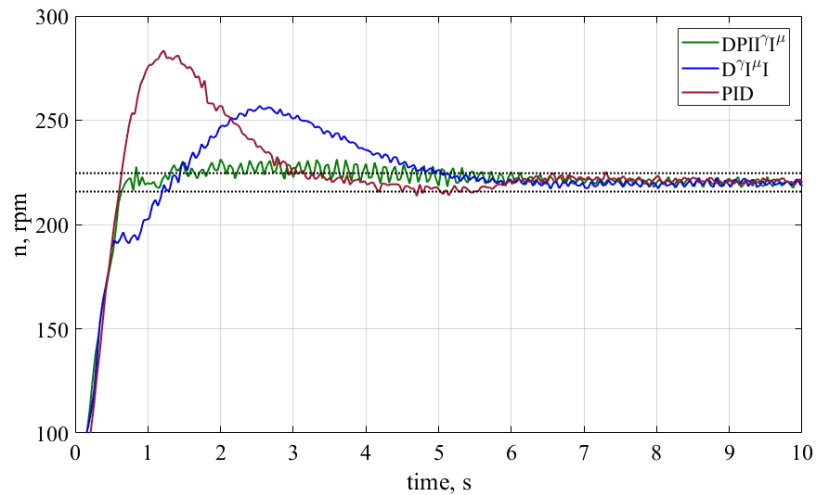


Рис. 6. Графіки переходних процесів середньої швидкості коліс автомобіля при накиду навантаження від ДВС з різними регуляторами

PID-регулятор забезпечив кращу швидкодію (2.55 s), але з найбільшим перерегулюванням, яке склало $\delta_1 = 27.6\%$. З D^μI-регулятором перерегулювання склало $\delta_2 = 16.3\%$, а час переходного процесу – 4.42 s. Найменше перерегулювання отримано з PID^μI-регулятором – $\delta_3 = 3.3\%$ при тривалості переходного процесу 3.8 s.

Проведено експериментальне дослідження при вимірюванні потужності і максимального моменту при лінійному збільшенні швидкості (рис. 7, a) та трикутній тахограмі (рис. 7, b). Результати такого тесту з найшвидшим (PID) і найточнішим (PID^μI) регулятором наведені на рис. 7, a.

Обидва регулятори забезпечують стабілізацію швидкості у всьому діапазоні вимірювань потужності, але на початку розгону (рис. 7, a) PID^μI-регулятор забезпечує найменше перерегулювання, що дозволило прийняти остаточне рішення вибору структури регулятора в його користь.

Визначено швидкісну помилку для двох регуляторів з лінійного завдання (рис. 7, a) на часовому діапазоні з 18 до 50 s. Таким чином показано, що швидкісна

помилка при PID^{II} -регуляторі зменшується майже в три рази швидше, ніж при PID -регуляторі.

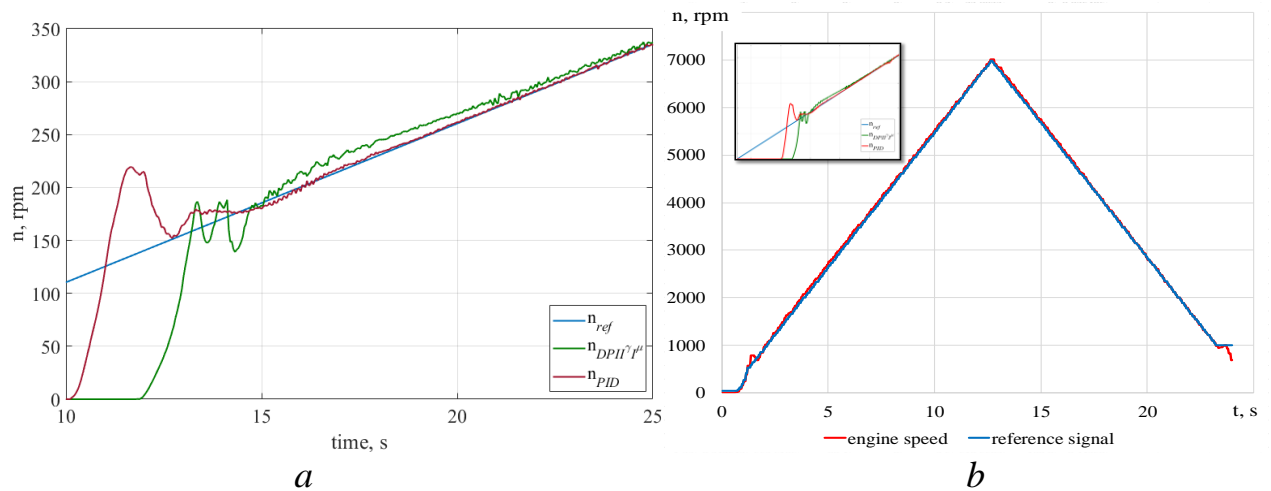


Рис. 7. Перехідні процеси по середній швидкості між напіввісями диференціала при вимірюванні потужності, де a – на початку розгону, b – на трикутній тахограмі

Отже, отримані результати в другому, третьому та четвертому розділі повністю відповідають вище сформульованій науковій новизні та на підставі досліджень трьох типів електричних машин можна зробити загальний висновок, що дробово-інтегральне числення надає можливість опису перехідних процесів в системах зі степеневими властивостями (у разі електричних машин причиною їх існування є насичення магнітної системи) як лінійних об'єктів з диференціальними рівняннями дробового порядку, що, в свою чергу, дозволяє використовувати класичний апарат теорії автоматичного керування для лінійних систем для аналізу таких об'єктів та синтезу регуляторів, які забезпечують оптимізацію динамічних режимів різних за принципом роботи електричних машин за мінімумом перерегулювання та часом першого узгодження. Так, з використанням регуляторів з приблизно однаковою структурою отримано оптимальні показники перехідних процесів в контурі струму двигуна послідовного збудження отримано з PID^{II} -регулятором, в контурі швидкості вентильно-реактивного двигуна – з PID^{II} -регулятором.

регулятором та при керуванні електромагнітними гальмами – з PID^μ-регулятором.

Ключові слова: дробове числення, двигун постійного струму з послідовним збудженням, регулятор з дробовим порядком, генетичний алгоритм, вентиляно-реактивний двигун, дробовий астатизм, електромагнітне гальмо, двигун внутрішнього згоряння, мікропроцесорна система керування.

ABSTRACT

Horoshko V. V. Optimization of dynamic modes of electric machines using fractional-order integral controllers. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2020.

Objects of research in the dissertation – electromechanical systems, a characteristic feature of which is the presence of a significant power dependence in the mathematical description. Because of this, there are problems in choosing the structure and parameters of the controllers. In particular, in a DC motor with sequential excitation, a switched reluctance motor and electromagnetic retarders, the magnetic system can be saturated in static and dynamic modes. The fractional-integral calculus used in the work allows to describe such nonlinear objects with high accuracy by linear transfer functions of fractional order. Thus, for the armature circuit of a DC motor with sequential excitation, such an approximation gives the least root mean square error. The combination of a conventional PID controller with fractional-integral components of the order of 0.35 and 1.35 provides the best quality of the transient process – the current reaches the reference value as quickly as possible without overshoot. Secondly, the switched reluctance motor, in the model of which it is necessary to take into account power dependences, is described by the aperiodic function of the order of 0.7 when

describing the transient processes of the speed during a voltage jump. From the family of studied controllers, the traditional PI-controller with additional fractional-integral components of the order of 0.7 and 1.7 provided the astaticism of the speed loop of the order 1.7 and the smallest overshoot. The third object studied – electromagnetic retarders mounted on the drive wheels of the car to tune the internal combustion engine – also is most accurately described by the transfer function of the fractional order. With the help of the $PIDIT^\mu$ -controller, which provided the closed-loop astaticism of the order of 1.63, the stabilization of the speed of rotation of the two wheels without antiphase oscillations and the exact trajectory of the triangular tachogram were achieved. Thus, thanks to the apparatus of fractional-integral calculus, more accurate identification of object parameters is provided, the mathematical description is reduced to linear transfer functions of fractional order, in closed systems it is possible to provide astaticism of fractional order 1.3 ... 1.7 to achieve better quality of transients than using classical methods.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. *For the first time* perform the identification of the armature circuit in the series DC motor by the transfer function with fractional order, which in comparison with integer order models provides minimal error in calculating transients at armature current above nominal, which allowed to choose the structure of the controller with fractional order of astaticism with the best dynamic and static qualities.

2. The method of speed identification in a switched-reluctance motor based on fractional-aperiodic function at different applied voltages with constant on and off angles *was further developed*, which allowed to reduce the identification error and to synthesize a controller with fractional order, with the minimum rise time and overshoot not more than 2%.

3. *For the first time* a controller with a fractional order of integral in the control system of two electromagnetic retarders in the stand for tune the fuel system of the car's

internal combustion engine was synthesized, which allowed to provide more accuracy for measuring torque and electromechanical power.

The practical significance of the obtained results:

1. A model and a method for identifying the parameters of the armature circuit of a series DC motor with subsequent synthesis of controllers that take into account the saturation effect of the motor magnetic system is proposed.

2. The model and method of identification of parameters in the speed loop of the switched-reluctance motor at different voltages with the subsequent synthesis of controllers taking into account nonlinear dependences of flux linkage and the torque on a phase current and position of a rotor are offered.

3. A control system based on a fractional controller was applied in the stand for tune the fuel system of the internal combustion engine, in which the transients had a minimum of overshoot and a higher order of astaticism, which allows to reproduce the reference signal with an accuracy of $\pm 0.2\%$.

The study of each of the listed objects was carried out according to the generally accepted methodology. Based on the testing of objects by supplying standard signals, identification of model parameters was carried out with the subsequent synthesis of optimal controllers and verification of closed systems. However, at the identification stage, in addition to the generally accepted ones, models are considered that include fractional differential equations. This choice is due to the fact that the fractional calculus is based on power functions, and in the considered electromechanical objects the magnetization curve is also close to the power function. This allows us to say that controllers with fractional integral and differential components can provide the best dynamic and static performance of control systems.

The introduction proves the relevance of the work, formulates the purpose and objectives of research, indicates the main scientific and practical provisions submitted for defense. The information on approbation of work and its structure, and also provide the publications of the author on a dissertation theme.

The first chapter provides brief information about the history of fractional calculus, its scope (particularly in control systems) and an overview of various methods for approximate calculation of the fractional integral and derivative.

The second chapter investigates a series DC motor taking into account the magnetization curve in dynamic processes with subsequent approximation of the current circuit by the transfer function with fractional order and synthesis of corresponding controllers with different order of astaticism.

In such a motor at a current value above the nominal transients are significantly different from the solutions of differential equations of the first or second order. In the mathematical description of the transition process, the following transfer functions of the control object are considered:

$$W_{co1} = \frac{K}{a_0 s^\mu + 1}, W_{co2} = \frac{K}{a_1 s + a_0 s^\mu + 1}, W_{co3} = \frac{K}{a_1 s^{1+\mu} + a_0 s^\mu + 1} \quad (2)$$

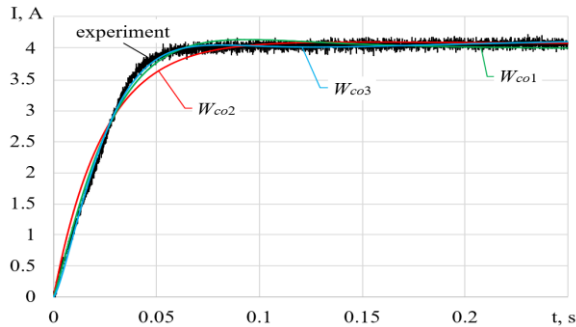


Fig. 1. Transient for transfer functions W_{co1} , W_{co2} , W_{co3} and experimental data

The transfer function W_{co3} with fractional order $\mu + 1$ has a minimum root square mean error. Experimental and calculation diagrams are compared in fig. 1.

In experimental studies, the best quality of the transient was obtained with a

PID I^μ -regulator (Fig. 2, a). In this case, the current reaches the set value as quickly as possible and without overshoot.

It turned out that such a controller is effective for task signals twice below the maximum, as well as for a step-wise change of reference signal (fig. 2, b, c). The quality of the system remains unchanged and correspond to optimal. The obtained results are new, which allowed to formulate the 1st point of scientific novelty

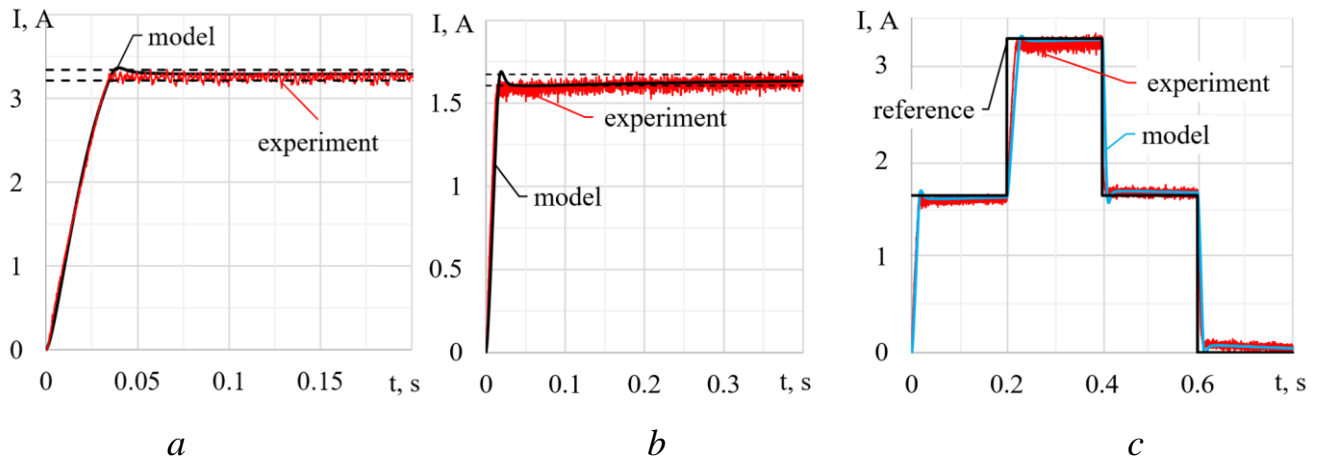


Fig. 2. Transients with PIDI^μ -controller at the current reference signal 3.2 A (a), 1.6 A (b) and at a step-wise change in the reference signal (c)

In **the third chapter** the model of switched-reluctance motor is investigated. In model taken into account nonlinear dependence of flux linkage and the torque with the subsequent approximation of speed and synthesis controllers with a different order of astaticism.

To identify the speed closed loop of switched-reluctance motor, a fractional-a-periodic transfer function of the following type is selected:

$$W_{col} = \frac{K}{a_0 s^\mu + 1}. \quad (2)$$

The results of the approximation are illustrated in fig. 3. As can be seen, at different applied voltages, the nature of the transient process changes, but the use of the transfer function of the fractional order (2) provides the smallest

deviation. It also allows the synthesis of controllers without considering the complex model of the motor, which is based on a system of nonlinear differential equations.

Accordingly, the tuning of the closed loop is significantly simplified – the modular optimum is provided by the II^ν -controller, and the fractional order of astaticism 1.7 is achieved with the PII^μ -regulator.

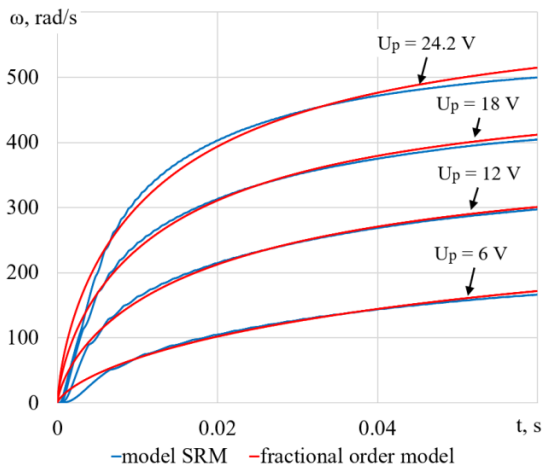


Fig. 3. Transients of speed in an open loop at different voltage

In fig. 4 shows the results of simulation of transients in the speed control loop of the switched-reluctance motor. In fig. 4, *a* – diagram of transients during the step reference, in Fig. 4, *b* – at a step-wise change in the reference signal. In both cases, the system with a fractional order of astaticism is characterized by better dynamic performance.

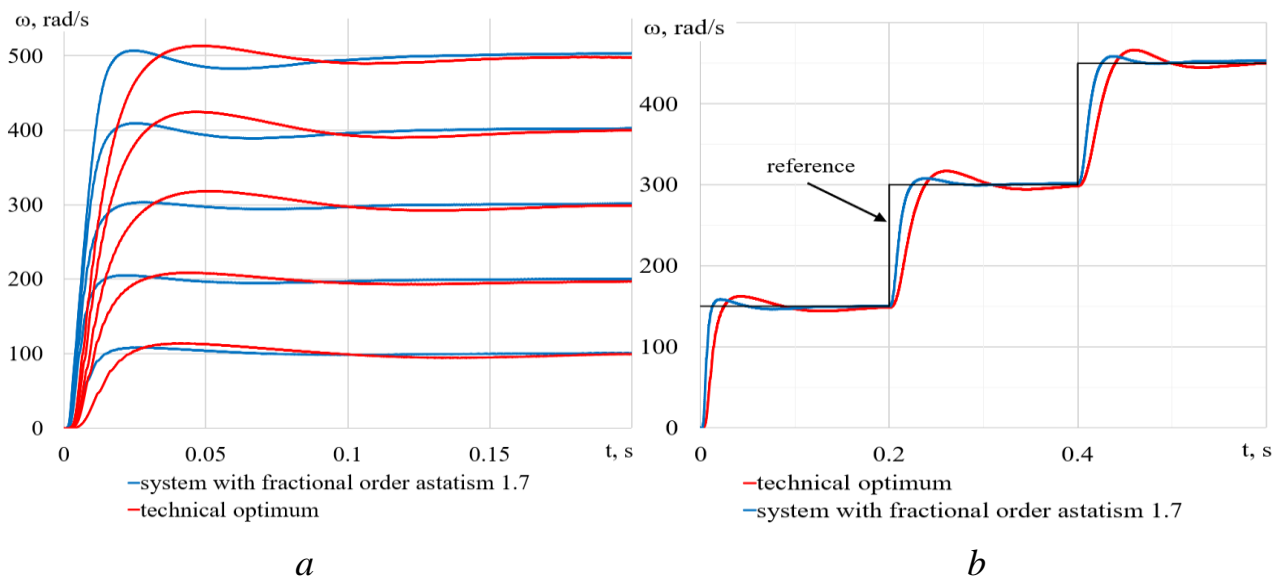


Fig. 4. Transients of speed switched-reluctance motor: *a* – at different value of speed reference signal, *b* – at a step-wise change in the reference signal

The fourth chapter investigates the control system of two electromagnetic retarders. According to the principle of operation, the electromagnetic brake has nonlinear dependences, which make hard to synthesis the control system. Also, unlike the other two objects, electromagnetic retarders are built into the stand to tune the fuel system of the car's internal combustion engine. Therefore, it was selected PID-controller

for obtain a transient with the least oscillations, overshoot and antiphase oscillations of wheel speeds. This allowed us to identify the block diagram and parameters of the dynamic model in the control object.

Of the considered variants of the mathematical description, the best and almost identical coincidence of the calculated and experimental characteristics was provided by two transfer functions – the inertial link of the 3rd order:

$$W_{co1}(s) = \frac{K}{(a_1s + 1)(a_2s + 1)(a_3s + 1)} \quad (3)$$

and fractional order model:

$$W_{co2}(s) = \frac{K}{a_1s^{1+\mu_{co}} + a_2s^{\mu_{co}} + 1} \quad (4)$$

Transients in the transfer functions (3), (4) and obtained experimental data compared in fig. 5.

Based on the transfer functions W_{co1} (3) and W_{co2} (4), the PID-, D^μI- and PIDI^μI^γ-controller are obtained. The experimental researches allowed to compare the speed and speed overshoot in the system with the synthesized controllers (Fig. 6).

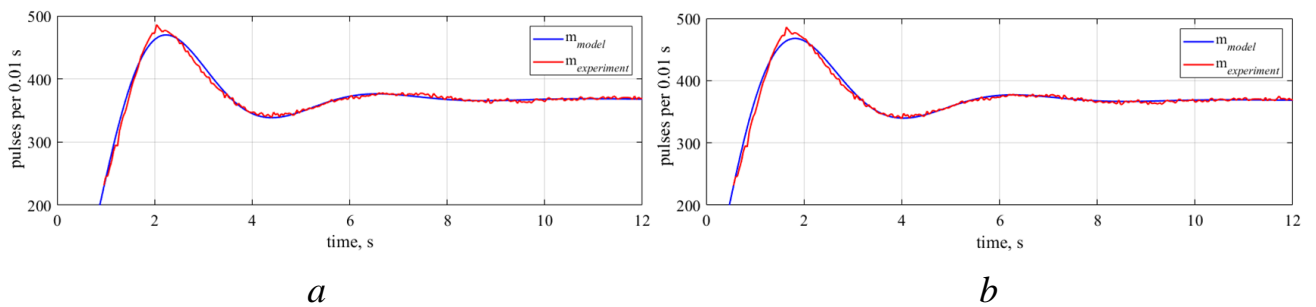


Fig. 5. Transients in model m_{model} by transfer functions W_{co1} (a), W_{co2} (b) and experimental data $m_{experiment}$

The PID controller provided better performance (2.55 s), but with the largest overshoot, which value $\delta_1 = 27.6\%$. With the D^μI controller, the overshoot value $\delta_2 = 16.3\%$, and the settling time 4.42 s. The smallest overshoot was obtained with the PIDI^μI^γ controller – $\delta_3 = 3.3\%$ with a settling time 3.8 s.

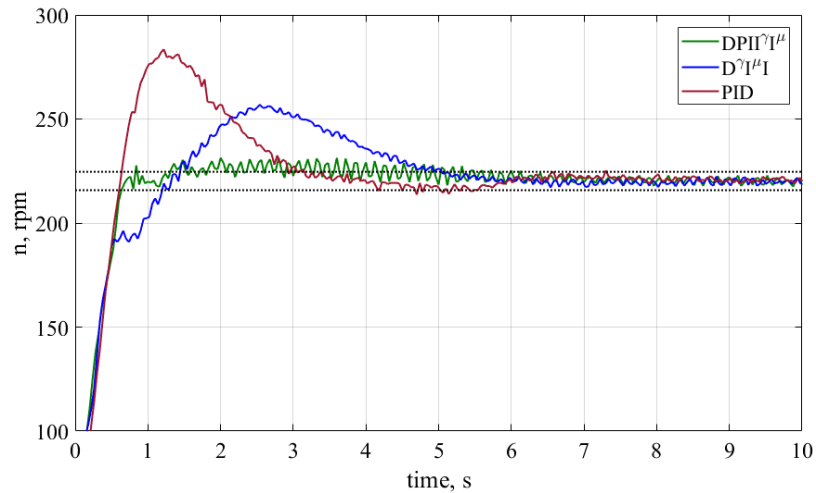


Fig. 6. Transients in average speed of wheels car during stabilization

An experimental study was performed by measuring power and maximum torque with a linear increase in speed (fig. 7, *a*) and a triangular tachogram (fig. 7, *b*). The results of such a test with the fastest (PID) and most accurate (PIDI T^{μ}) controller are shown in fig. 7, *a*.

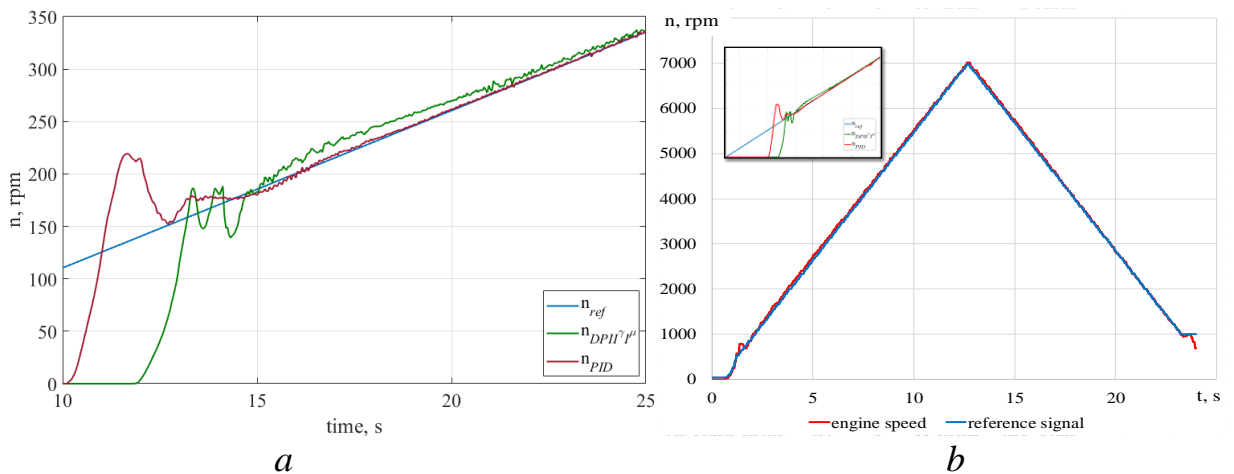


Fig. 7. Transients on the average speed between the semi-axes of the open differential then measuring power, where *a* – at the beginning of acceleration, *b* – at a triangular tachogram

Both controllers provide speed stabilization in the entire range of power measurements, but at the beginning (fig. 7, *a*) PIDI T^{μ} -controller provides the least

overshoot, which allowed to make the final decision on the choice of controller structure in its favor.

The speed error for two controllers from the linear reference (fig. 7, *a*) in the time range from 18 to 50 s is determined. Thus, it is shown that the speed error at the $PID I^{\mu} I^{\nu}$ controller decreases almost three times faster than at the PID controller.

The results obtained in the second, third and fourth chapters fully correspond to the above scientific novelty. Based on studies of three types of electric machines it can be concluded that fractional-integral calculus provides a description of transients in systems with power function properties (in the case of electric machines the reason for its existence is the saturation of the magnetic system) as linear objects with differential equations of fractional order, which, in turn, allows to use the classical apparatus of automatic control theory for linear systems to analyze such objects and synthesize controllers that optimize dynamic modes different on the principle of operation in electric machines with a minimum of overshoot and the rise time. Thus, with the use of controllers with approximately the same structure, the optimal transients in the current circuit of the series DC motor were obtained with a $PID I^{\mu} I^{\nu}$ -controller, in the speed loop of switched-reluctance motor with a $PIII^{\mu} I^{\nu}$ -controller and when controlling electromagnetic retarders – $PID I^{\mu} I^{\nu}$ -controller.

Keywords: fractional calculus, series DC motor, fractional order controller, genetic algorithm, switched-reluctance, fractional astaticism, electromagnetic retarders, internal combustion engine, microprocessor control system.

Список публікацій здобувача

1. Бушер В. В. Модифицированный метод управления моментом вентильно-реактивного двигателя [Текст] / В. В. Бушер, В. В. Горошко, К. А. Хандакжи // Электротехнические и компьютерные системы, ISSN Print 2221-3937, ISSN Online 2221-3805 – ELTEKS-2017. – Киев: Техника, 2017. – Вып. 25(101). – С. 44–52. Access mode: <http://etks.opu.ua/core/getfile.php?id=2185>, <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.25.101.2017.05>, **Фах.вид.кат. В**
2. Бушер, В., Хандакжи, К., Горошко, В., Кравченко, В. Техническая реализация дробных интегрально-дифференцирующих регуляторов в микропроцессорных системах управления. [Текст] // International conference Ships' Electrical Engineering, Electronics And Automation, 05.12.2018 – 06.12.2018 – Odessa: NU «ОМА». – 2019. – Р. 180–186. Access at:http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/electro_conf_50_60ka_228str.pdf
3. Busher, V. Synthesis and implementation of fractional-order controllers in a current circuit of the motor with series excitation [Text] / V. Busher, L. Melnikova, V. Horoshko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729–3774. Industry Control System. – Kharkov: PC Technology Center, 2019. – Vol. 2, No 2 (98), (2019). – Р. 63–72. Access mode: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/161352> DOI: 10.15587/1729-4061.2019.161352, **SCOPUS – Q2, Фах.вид.кат. А**
4. Бушер В. В. Дробные интегрально-дифференцирующие регуляторы в системе управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением [Текст] / В. В. Бушер, В. В. Горошко // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Методи моделювання та оптимізації. XXVII МНТК 11-12 квітня 2019 р. ISSN 2079-5106. – Кременчук: КрНУ, 2019. – С. 39–41. Access at: http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO_2019.pdf, **Фах.вид.кат. Б**
5. Busher V.V., Goroshko V.V. Fractional Integral-Differentiating Control in Speed Loop of Switched Reluctance Motor [Текст] // Problemele Energeticii Regionale – vol. 1, No 2(42) – 2019 – Р. 46–54. – ELTEKS-2019. http://journal.ie.asm.md/assets/files/05_12_41_2019.pdf <https://doi.org/10.5281/zenodo.3239166> <http://journal.ie.asm.md/en/contents/electronii-jurnal-1241-2019>, **WEB OF SCIENCE**
6. Busher V. Dual Electromagnetic Retarder Control System for Tuning Internal Combustion Engines. / Busher V. V., Horoshko V. V. // Modern Electrical and Energy Systems (MEES–2019) September 23-25, 2019 – ISBN 978-1-7281-2569-

5, IEEE Cat. No.: CFP19K83-ART. – Kr.: M.Ostrogradsky NU – 2019. – P.26–29. Access at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8896526>, **SCOPUS / WEB OF SCIENCE**

7. Horosko, V. Control optimization of electromechanical systems by fractional-integral controllers / Technology Audit and Production Reserves. Information and Control Systems. p-ISSN 2664-9969, e-ISSN 2706-5448. – Kharkov: PC Technology Center, 2020. – Vol. 3, No 2 (53), (2020). – P. 56–59. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.207037>, **Фах.вид.кат. Б**
8. Горошко, В. В. Применение аппарата дробного исчисления в системах управления электрическими машинами / Theoretical and Practical Foundations of Social Process Management. XXIII International Scientific and Practical Online Conference, San Francisco, USA, 29–30 June, 2020. – с. 172–176. <https://doi.org/10.46299/ISG.2020.XXIII>, ISBN 978-1-64871-431-3,
9. Simulation of Internet of Things based Systems. Practicum / O.V. Drozd, D. A. Maevsky, O. J. Maevskaya, O.M. Martynyuk, G.V. Tabunshchyk, V.V. Goroshko and other, D. A. Maevsky (ed.) – Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa National Polytechnic University, 2019. – 130 p. – ISBN 978-617-7361-95-3. https://alioi.eu.org/wp-content/uploads/2019/10/ALIOT_PC1_Sim-of-IoT-Sys_web.pdf