

7. Теория автоматического управления : учебник для вузов / Л. С. Гольдфарб [и др.] ; ред. А. В. Нетушил. — Изд. 2-е. доп. и перераб. — М. : Высш. шк., 1976. — 400 с.

The article examines the typical element of objects with distributed parameters and their integral model. Constructed software modules using quadrature methods and on the basis of computational experiments investigated the effectiveness of this approach.

Key words: *dynamic model, integral model, transfer function, Volterra operator, Matlab.*

Отримано: 07.04.2011

УДК 62-83

В. М. Карпенко*, канд. техн. наук,

Н. С. Нікорюк**, канд. техн. наук

*ДП „Науканафтогаз” НАК „Нафтогаз України”, м. Вишневе,

**Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

ФОРМУВАННЯ КЕРУЮЧОГО ВПЛИВУ ПУСКУ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

У роботі досліджений оптимальний алгоритм формування керуючого впливу — напруги живлення на затисках двигуна постійного струму з послідовним збудженням у перехідних режимах пуску. Розроблений алгоритм формування керуючого впливу дозволяє забезпечити швидкодію і мінімум часу на підйом чи спуск колони, при наступних обмеженнях:

$$i \leq I_{\max} ; u \leq U_{\max} .$$

Ключові слова: *бурова установка, система підйимального агрегату, електропривод, система Г-Д, двигун, пуск, напруга на затисках двигуна, керування зміною напруги.*

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Для двигунів постійного струму з незалежним збудженням розроблені і добре апробовані часом ефективні системи керування силовими агрегатами бурових установок. Але для двигунів постійного струму з послідовним збудженням практично відсутні обгрунтовані методи їх керування, не розроблені алгоритми формування керуючого впливу — напруги живлення на затисках двигунів у перехідних режимах. При розгляді цих режимів не враховуються вихрові струми, що мають суттєвий вплив на динаміку перехідних процесів.

Для приводу підйомно-транспортних механізмів широко використовуються двигуни постійного струму з послідовним збудженням,

тому системи автоматизованого електроприводу мають достатній науковий рівень аналізу перехідних режимів їх роботи.

Підіймальні агрегати стаціонарних бурових установок мають власні технологічні особливості роботи. Головними особливостями технології виконання спуско-підіймальних операцій такими агрегатами є: велика вага бурильної колони і діапазон її зміни, значний витяг канату талевої системи, часте реверсування двигуна (двигунів) з навантаженням, зміна моменту інерції в підіймальній системі, довга стоянка двигуна під максимальним навантаженням під час спуску обсадних колон з плавним регулюванням швидкості спуску, тощо.

Використання у якості виконавчих органів підіймального агрегату високо обертових двигунів постійного струму з послідовним збудженням суттєво зменшує вагу агрегату, але накладає на системи управління двигунами жорсткі і точні умови роботи, а саме, мінімізувати під час пуску-зупинки перенавантаження: механічні у редукторах і талевій системі, гідродинамічні у свердловині, електродинамічні у якірному ланцюгу; точність і швидкодія виконання операції позиціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні концепції побудови бурових установок (БУ) ведучих їх виробників ґрунтуються на застосуванні індивідуального плавно регульованого електропривода [1]. Головна ідея конструкторських рішень побудови БУ фірм "Нейшнл Сап плай" (США), "Айдеко" (США), "Бендер" (США) — оснащення основних агрегатів установки плавно регульованим електроприводом постійного струму.

На рис. 1 показана спрощена схема силової частини перспективно-го електроприводу системи підіймального агрегату бурової установки [2]. Силова частина системи побудована по принципу Г-Д (використовується дизель-генераторна установка, що випускається в Україні і яка добре апробована часом) з двома двигунами послідовного збудження, які включені послідовно поміж собою та генератором. Двигуни працюють на загальний вал, що з'єднаний з барабаном лебідки.

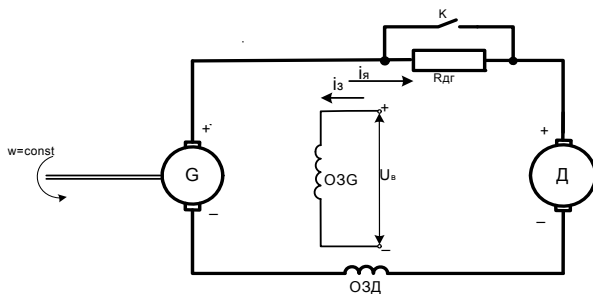


Рис. 1. Схема включення силової частини привода підйома бурової лебідки

Запропонований перспективний варіант силового електроприводу системи підйимального агрегату бурової установки з лебідкою ЛБ-650Е дозволяє здійснити як підйом бурильної колони з регулюванням швидкості, так і її спуск — з електричним гальмуванням і регулюванням швидкості спуска.

Динамічний режим роботи двигуна постійного струму з послідовним збудженням моделюється відомими рівняннями [3]:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{\epsilon.m.} R_{\epsilon.m.} + w_{\epsilon.m.} \frac{d\Phi}{dt}; \\ U_{\gamma} &= k\Phi\omega + i_{\gamma} R_{\gamma\partial} + L_{\gamma\partial} \frac{di_{\gamma}}{dt} + w_{\epsilon} \frac{d\Phi}{dt}; \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $i_{\epsilon.m.}$ — умовний вихровий струм; $R_{\epsilon.m.}$ — опір короткозамкненої обмотки вихрових струмів; $w_{\epsilon.m.}$ — умовна кількість витків короткозамкненої обмотки вихрових струмів, $k = p_n \cdot N / 2\pi \cdot a$ — конструктивна стала двигуна; p_n — кількість пар полюсів обмотки збудження; N — кількість активних провідників якоря двигуна; a — кількість паралельних витків якірної обмотки; ω — кутова швидкість, i_{γ} — струм якірного кола двигуна, $R_{\gamma\partial}$ — опір якірного кола двигуна, $L_{\gamma\partial}$ — сумарна індуктивність розсіювання якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, w_{ϵ} — кількість витків обмотки збудження, M — момент двигуна, M_c — момент сили опору, J — момент інерції двигуна.

Звичайно для обмеження динамічних навантажень електропривода і формування перехідних процесів використовується лінійний закон зміни керуючого впливу — напруги на затисках приводних двигунів. Розглянемо перехідний процес пуску двигуна постійного струму при подачі на його затиски напруги, що змінюється за лінійним законом.

Перехідний процес у цьому випадку відбувається у три етапи: на першому етапі — момент двигуна менше моменту противаги (підйом бурової колони), двигун не рушиться; на другому етапі — момент двигуна більше моменту противаги, прискорення приводу визначається швидкістю зміни напруги живлення, починається рух; на третьому етапі — рух відбувається без зміни напруги живлення. На всіх цих етапах одночасно відбуваються механічний та електромагнітний перехідні процеси.

Перший етап цього перехідного процесу описується рівняннями системи (1), в яких останнє рівняння перетворюється на наступне:

$$\omega = 0.$$

На цьому етапі відбувається лише електромагнітний перехідний процес.

На другому етапі перехідного процесу, на якому одночасно відбуваються два перехідних процеси — механічний та електромагнітний, тривалість електромагнітного процесу значно менше механічного, якщо швидкість зміни напруги живлення $\alpha_{ел} = \frac{du}{dt}$ достатньо мала. Коли завершується електромагнітний перехідний процес привод рухається зі сталим прискоренням

$$\varepsilon_n = \frac{\alpha_{ел}}{k\Phi}. \quad (2)$$

Третє рівняння системи (1), після підстановки в нього (2) дозволяє визначити швидкість зміни напруги на затисках двигуна при русі приводу зі сталою швидкістю

$$\alpha_{ел} = \frac{k\Phi(M - M_c)}{J} = \frac{R_{я\partial}(I - I_c)}{T_M}, \quad (3)$$

де Φ , M , I сталі значення потоку, моменту, струму двигуна, на цьому етапі.

В [4] було проведено дослідження динамічних параметрів системи підйомного агрегату бурової установки при подачі на затиски її двигунів напруги, що змінюється за лінійним законом. В механічній частині електропривода, не залежно від процесу (підйом чи спуск), виникають перехідні процеси, в яких динамічні навантаження перевищують допустимі.

Постановка завдання. У роботі поставлена така задача: розробити принцип формування керуючого впливу — зміни напруги на затисках двигуна, що забезпечує швидкодію і мінімум часу на підйом чи спуск колони, при наступних обмеженнях:

$$i \leq I_{\max}; u \leq U_{\max}.$$

Характер перехідного процесу зміни швидкості електродвигуна повинен бути без перерегулювання.

У відповідності до принципу динамічного програмування, сформульованого Беллманом Р., для досягнення електродвигуном заданої швидкості ω_c за мінімальний час необхідно, щоб в кожному наступному інтервалі розрахунку часу Δt швидкість отримувала максимально можливе прискорення $\Delta\omega_{\max}$. Це реалізується, якщо струм двигуна I на кожному інтервалі Δt досягає максимального значення, а максимальне прискорення швидкості за обраний шаг розрахунку Δt стає обмеженою величиною:

$$\Delta\omega_{\max} = (k\Phi_{\max} I_{\max} - M_c) \Delta t / J,$$

де k — конструктивна стала двигуна, Φ_{\max} — максимальне значення потоку двигуна, M_c — приведений момент навантаження на валу двигуна.

В електроприводі одночасно відбуваються, як електромагнітний, так і механічний перехідні процеси. Умовно можливо рахувати, що на першому етапі цього процесу домінуючим є електромагнітний процес (зміна струму, потоку і моменту двигуна, кутова швидкість змінюється в стислих межах), на другому етапі домінуючим є механічний процес (зміна швидкості, струм, момент і потік двигуна обмежені), на третьому етапі вагомими є ці два процеси. Формування керуючого впливу — зміни напруги на затисках двигуна повинно відбуватися у відповідності до процесів, що протікають в електроприводі. На першому етапі — формується такий закон зміни напруги живлення, що забезпечує досягнення максимально припустимих значень струму, потоку, моменту за мінімальний час з найменшим перерегулюванням; на другому — зміна напруги живлення забезпечує рух привода зі сталим прискоренням, струм, потік, момент є незмінними; на третьому етапі відбувається рух при незмінній напрузі на затисках двигуна.

На рис. 2 приведений графік зміни напруги живлення, що забезпечує формування належного керуючого впливу. Проміжок часу $0 \leq t \leq t_1$ це перший етап формування напруги на затисках двигуна. На цьому етапі струм, потік, момент зростають від нуля до припустимих значень. Для підтримки найбільшої швидкодії (зростання струму, потоку, моменту) напруга на затисках двигуна повинна бути максимальною $u = U_n$, якщо миттєве значення струму не перевищує припустиме.

Проміжок часу $t_1 \leq t \leq t_2$ напруга змінюється за лінійним законом, швидкість зміни якої визначається припустимим струмом і розраховується за формулою (3).

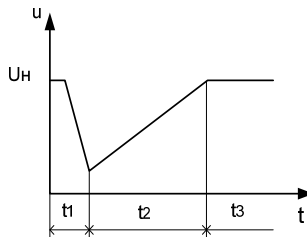


Рис. 2. Графіки зміни напруги на затисках двигуна

На третьому етапі напруга обмежена номінальним значенням $u = U_n$. Для апробації розробленого алгоритму було проведено моделювання перехідних процесів в електроприводі постійного струму послідовного збудження з двигуном МП-72, за допомогою комп'ютерного математичного пакету MathCAD 2001, в якому для рішення

системи нелінійних рівнянь (1) використовувався метод Рунге-Кутти з фіксованим шагом (функція rkfixed (y0, t0, t1, M, D)).

На рис. 3 приведена залежність напруги u на затисках двигуна, що визначається запропонованим алгоритмом. На рис. 3 та 4 надаються розраховані залежності у відносних одиницях швидкості (ωl), току (ТОК1), потоку (P1), моменту (M1) двигуна при пуску. Відносні одиниці введені наступним чином: $u = \frac{U}{U_n}$, $\omega l = \frac{\omega}{\omega_n}$, $\text{ТОК1} = \frac{i}{I_n}$, $P1 = \frac{\Phi}{\Phi_n}$, $M1 = \frac{M}{M_n}$, де U , ω , i , Φ , M — поточні значення напруги, кутової швидкості, струму, потоку, моменту двигуна.

Номинальні параметри двигуна: потужність $P_n = 80$ кВт, напруга живлення $U_n = 220$ В, струм $I_n = 405$ А, кутова швидкість $\omega_n = 48.2$ 1/с, потік $\Phi_n = 0.0758$ Вб, момент $M_n = 1661$ Нм. Момент навантаження прийнятий рівним номінальному моменту двигуна, тобто $M_c = 1661$ Нм.

Перехідний процес пуску формується за рахунок зміни керуючого впливу — напруги на затисках двигуна і відбувається в три етапи. На першому етапі пуску ($0 \leq t \leq 0.04$ сек.) напруга змінюється від номінальної U_n до $u = 0.12U_n$ за наступним законом: $U = U_n(1 - 22t)$, на другому ($0.04 \leq t \leq 0.44$ сек.) напруга змінюється від $0.12U_n$ до U_n за законом: $U = U_n[2.2(t - 0.04) + 0.12]$, на третьому: $U = U_n$.

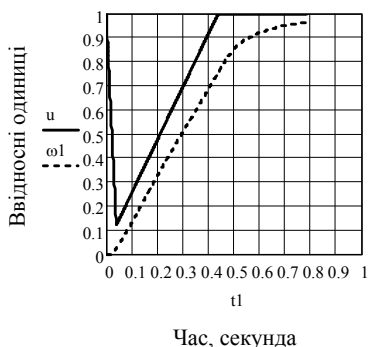


Рис. 3. Залежність напруги на затисках двигуна та кутової швидкості від часу

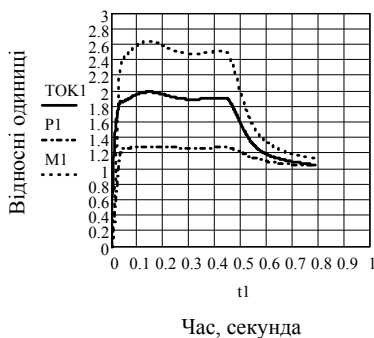


Рис. 4. Залежність струму, потоку та моменту двигуна від часу

На першому етапі кутова швидкість практично нульова, а на другому змінюється за лінійним законом, на третьому — за експоненціальним законом. Струм досягає номінального значення через 0.01 секунди, потік — лише через 0.027 секунди, а момент — 0.018 секунди. Саме з цього часу (досягнення моменту двигуна значення, що дорівнює моменту навантаження) починається рух приводу. Швидкість руху двигуна в

кінці першого етапу досягає значення 1.134 1/с. Струм двигуна не перевищує максимально припустиме $i = 2I_n$ на протязі всього процесу пуску.

Розглянемо формування перехідного процесу на першому інтервалі. Якщо напруга на затисках двигуна зменшується за лінійним законом, тоді залежність струму, потоку, моменту від часу має екстремум. Максимальне значення струму, потоку, моменту двигуна та швидкість їх зміни, коли цей процес починається при початкових значеннях керуючого впливу $u = U_n$, визначається швидкістю зміни напруги живлення на затисках двигуна. Ці максимуми повинні досягатися в кінці цього етапу. В протилежному випадку збільшується, або зменшується тривалість цього інтервалу. На рис. 5 показані залежності струму двигуна від часу при наступних законах зміни напруги на затисках двигуна: Z1 — $u = U_n(1-22t)$, Z2 — $u = U_n(1-25t)$, Z3 — $u = U_n(1-20t)$. При моделюванні навантаження двигуна приймалося незмінним і рівним номінальному.

При зміні напруги, що визначається законом Z1, найбільше значення струму складає 1.87 від номінального, а при законах Z2 — 1.65, Z3 — 2.06. Таким чином, змінюючи швидкість зменшення напруги на затисках двигуна, можливо забезпечити бажане значення струму на другому етапі перехідного процесу. Зростання спаду напруги зменшує ці максимуми, а зменшення — приводить до їх збільшення.

Очевидно, що навантаження двигуна не впливає на формування перехідного процесу на першому інтервалі. Кутова швидкість в кінці його складає приблизно декілька радіан/сек.

На рис. 6 надаються результати розрахунків перехідного процесу на першому інтервалі формування перехідного процесу при зміні напруги на затисках двигуна: $u = U_n(1-22t)$ і навантаженні: Z3 — $M_c = 0.1M_n$, Z4 — $M_c = 1.5M_n$. Максимальне значення струму в першому випадку (мінімальне навантаження) становить 1.82 I_n , а в другому — 1.88 I_n .

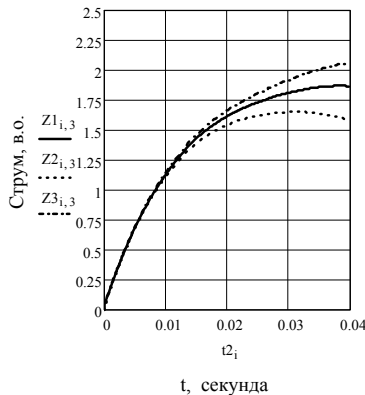


Рис. 5. Залежність струму двигуна від часу:
Z1 — $u = U_n(1-22t)$; Z2 — $u = U_n(1-25t)$; Z3 — $u = U_n(1-20t)$

Таким чином, зміна навантаження від мінімального (режим руху без навантаження) до максимального практично не впливає на характер перехідного процесу і приводить до зміни струму приблизно на 3%. Кутова швидкість при пуску без навантаження в кінці цього інтервалу складає 2.53 рад/сек., а з навантаженням — 0.571 рад/сек. Таким чином, зміна навантаження суттєво не впливає на кутову швидкість в кінці цього інтервалу.

Розрахуємо швидкість зміни керуючого впливу — напруги для кривих рис. 3, 4 на другому етапі пуску ($0.04 \leq t \leq 0.44$ сек.).

Швидкість зміну напруги за даними експерименту

$$\alpha_{el} = \frac{du}{dt} = \frac{d(220(2.2(t-0.04)+0.12))}{dt} = 2.2 \times 220 = 484 \text{ В/с.}$$

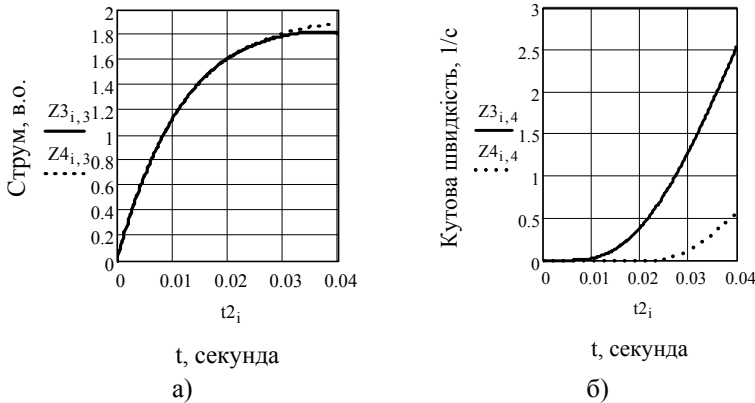


Рис. 6. Залежність струму а) та кутової швидкості б) двигуна від часу: Z3 — $M_c=0.1M_n$; Z4 — $M_c=1.5M_n$

Якщо припустити, що на другому етапі пуску двигуна припустиме значення струму дорівнює $2I_n$, а $J = 28 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (як у експерименті), і визначити за допомогою залежності $\Phi = f(i)$ потік двигуна і $k\Phi = 5.6$. Тоді у відповідності з формулою (3)

$$\alpha_{el} = \frac{R_{я\delta} (I_{\max} - I_c)}{T_m} = \frac{R_{я\delta} (I_{\max} - I_c)}{J \frac{R_{я\delta}}{(k\Phi)^2}} = \frac{k\Phi (M_{\max} - M_c)}{J} = \frac{5.6(2.5 \cdot 1661 - 166)}{28} = 498 \text{ В/с.}$$

Таким чином, на другому етапі пуску швидкість зміни керуючого впливу — напруги на затисках двигуна в експерименті та визначена формулою (3) співпадають.

Моделювання цього перехідного процесу (рис. 3, 4) дозволяє стверджувати, що розроблений алгоритм формування керуючого впливу — зміни напруги на затисках двигуна дозволяє: на першому етапі пуску забезпечити швидке зростання струму, потоку, моменту від нуля до припустимих значень, на другому етапі підтримку цих координат на заданому рівні.

Висновки

1. Розроблений алгоритм формування керуючого впливу — напруги на затисках двигуна постійного струму з послідовним збудженням, що дозволяє забезпечити швидкодію і мінімум часу на підйом чи спуск колони, при наступних обмеженнях:

$$i \leq I_{\max}; u \leq U_{\max}.$$

2. Формування керуючого впливу здійснюється в три етапи. На першому етапі для забезпечення оптимальної швидкості зростання струму I , потоку Φ , моменту M початкове значення напруги повинно бути найбільшим, тобто номінальним. Швидкість лінійного зменшення напруги U забезпечує обмеження швидкості зростання цих координат, а також прикінцеві їх значення на цьому етапі. При зростанні швидкості зменшення напруги U швидкодія, а також максимальне значення цих координат зменшуються. При зменшенні швидкості зміни напруги U все відбувається навпаки — швидкодія та максимальне значення координат зростають.

3. На другому етапі формування напруги початкові значення струму I , потоку Φ , моменту M повинні бути рівними сталим значенням цих координат на цьому етапі. А напруга U на затисках двигуна повинна забезпечити рівновагу правої та лівої частин рівняння 2 системи (1) при початковій кутовій швидкості ω на цьому інтервалі. Тобто, початкове значення напруги U та швидкість її зростання повинні забезпечити процес розгону без коливань (без перехідного процесу).

4. На останньому етапі напруга U підтримується на номінальному рівні.

Список використаних джерел:

1. Карпенко В. Н. Концепция построения главного привода подъемного агрегата буровой установки 6 класса с лебедкой ЛБ-650Е / В. Н. Карпенко, В. А. Эсауленко, Н. С. Никорюк // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". — Донецьк : ДонНТУ, 2007. — Вип. 7/128. — С. 279—284.
2. Карпенко В. М. Підймальний агрегат бурової установки (винахід) / В. М. Карпенко. — № 20610.
3. Эсауленко В. А. Методика и алгоритм расчета переходных процессов в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением / В. А. Эсау-

- ленко, Н. С. Никорюк, А. И. Пурис // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — КДПУ, 2006. — Ч. 2. — С. 137—139.
4. Стасенко В. М. Дослідження динамічних параметрів елементів талевої системи підйимального агрегату бурової установки 6 класу з лебідкою ЛБ-650Е. / В. М. Стасенко, В. М. Карпенко, О. В. Карпенко // Проблеми нафтогазової промисловості : зб. наук. праць. — К., 2006. — Вип. 3. — С. 174—189.

In the robot examines the optimal control algorithm for the formation of influence — the supply voltage at the terminals of a DC motor with series excitation in the start-up transients. The developed algorithm allows the formation of control actions to ensure performance and minimum time for recovery or down columns, with the following restrictions:

$$i \leq I_{\max}; \quad u \leq U_{\max}.$$

Key words: *Boring setting, system of lifting aggregate, electro-drive, system generator-engine, DC motor, starting, the supply voltage at the terminals of a DC motor, management the change of tension.*

Отримано: 25.04.2011

УДК 519.6:519.85

Є. Ю. Карпенко, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПРИНЦИП НЕВ'ЯЗКИ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ФРЕДГОЛЬМА І РОДУ МЕТОДОМ УСІЧЕНОГО SVD РОЗКЛАДУ

У статті розглянуто підхід до розв'язання інтегрального рівняння Фредгольма 1-го роду методом усіченого SVD розкладу з використанням узагальненого принципу нев'язки для визначення оптимального розв'язку.

Ключові слова: *інтегральне рівняння Фредгольма, SVD розклад, узагальнений принцип нев'язки.*

Вступ та постановка задачі. При використанні методу квадратур для розв'язання інтегральних рівнянь Фредгольма I роду [1], отримується апроксимуюча система лінійних алгебраїчних рівнянь

$$Ay = F, \quad (1)$$

де $A_{ij} = r_j K(x_i, s_j)$, $F_i = f(x_i)$, $i = \overline{1, l}$, $j = \overline{1, n}$, r_j — коефіцієнти квадратурних формул. При збільшенні параметру дискретизації, спектр матриці наближається до спектра інтегрального оператора (в силу четвертої теореми Фредгольма найменше власне значення інтегрального оператора дорівнює нулю). Таким чином, мінімальне по