

**Беляєв Олег Сергійович**, аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(050)692-82-84, olehbieliaiev@gmail.com, ORCID ID:0009-0000-4839-3948.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».*  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З КВАЗІНЕЙРОРЕГУЛЯТОРОМ

**Анотація:** Представлено результати моделювання динаміки двомасової електромеханічної системи з пружним зв'язком і нелінійним фрикційним навантаженням у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах. Реалізовано квазінейрорегулятор, здатний усувати фрикційні автоколивання та забезпечувати задані показники регулювання. Отримані результати моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтверджують адекватність отриманих аналітичних умов стійкості та ефективність обраної структури квазінейрорегулятора.

**Ключові слова:** електромеханічна система, стійкість, електропривод, фрикційне навантаження, безрозмірні параметри, автоколивання, MATLAB/Simulink.

**Bieliaiev Oleh**, PhD student of the Department Automated Electromechanics Systems, +38(050)692-82-84, olehbieliaiev@gmail.com, ORCID ID:0009-0000-4839-3948.

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".*  
2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002.

## SIMULATION OF DYNAMIC MODES OF A TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH A QUASI-NEUROREGULATOR

**Abstract:** The results of dynamic modeling of a two-mass electromechanical system with elastic coupling and nonlinear friction load in modified generalized dimensionless parameters are presented. A quasi-neuroregulator capable of suppressing friction-induced self-oscillations and ensuring prescribed control performance has been implemented. The modeling results obtained in the MATLAB/Simulink environment confirm the validity of the derived analytical stability conditions and the effectiveness of the proposed quasi-neuroregulator architecture.

**Key words:** electromechanical system, stability, electric drive, friction load, dimensionless parameters, self-oscillations, MATLAB/Simulink.

**Вступ.** Електромеханічні системи, зокрема автоматизовані електроприводи машин і механізмів, відіграють важливу роль в розвитку економіки країни. За різними оцінками, електроприводи забезпечують до 50 % загального споживання електроенергії в промисловості [1, 2]. У зв'язку з цим підвищення їхньої енергоефективності є одним із головних напрямів державної політики у сфері енергозбереження [3, 4, 5].

Існує широкий клас електроприводів машин і механізмів, які являють собою двомасову електромеханічну систему (ЕМС) з пружним кінематичним зв'язком та нелінійним фрикційним навантаженням. До них відносяться прокатні стани, металорізальні верстати, рейкові транспортні засоби, електромобілі та багато інших, у яких в режимах буксування або проковзування характеристика навантаження являє собою пару тертя [6, 7]. Механічна характеристика електропривода при цьому містить так звану «падаючу» ділянку, на якій при збільшенні швидкості проковзування відбувається зменшення коефіцієнта тертя. При цьому, можливе виникнення, так званих, фрикційних автоколиваний (АКФ), які або неприпустимі, або суттєво погіршують показники технологічного процесу: погіршення чистоти та точності обробки матеріалу, збільшення втрат енергії, а іноді призводять до поломок кінематичних ланок [6].

З урахуванням мультиплікативного та синергетичного ефектів [1, 6], усунення фрикційних автоколиваний і їх негативних наслідків надає суттєвий ефект збереження енергетичних ресурсів. Усунення фрикційних автоколиваний здійснюється у системах автоматичного регулювання електроприводів. Одним із засобів усунення АКФ є використання запропонованого у 2006 році квазінейрорегулятора (КНР) [8, 9, 10].

**Мета роботи:** комп'ютерне моделювання у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах двомасової електромеханічної системи з пружним зв'язком, нелінійним фрикційним навантаженням та квазінейрорегулятором, на предмет дослідження динамічних процесів у системі і оцінки ефективності квазінейрорегулятора щодо усунення фрикційних автоколиваний.

**Теоретична частина.** Об'єкт моделювання представлений у вигляді двомасової ЕМС, структурна схема якої реалізована в модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах (рис. 1) [11]. У такому вигляді система описує взаємодію між джерелом керувального впливу, електромеханічним перетворювачем, пружним механічним з'єднанням та навантаженням із фрикційною нелінійністю. Базовими величинами для безрозмірних параметрів прийняті швидкість холостого ходу та момент короткого замкнення. Форма

механічної характеристики навантаження приймається, як лінеаризована нелінійна характеристика навантаження, що відповідає типовим ділянкам характеристики тертя, зберігаючи нелінійність «у великому» [6].

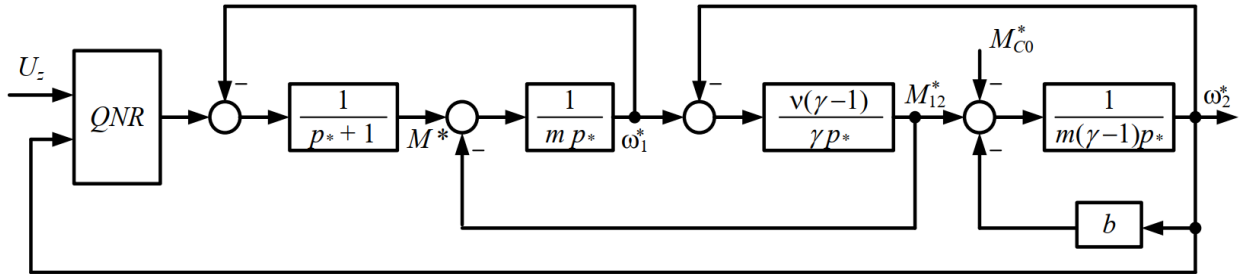


Рисунок 1 – Структурна схема двомасової ЕМС в модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах із квазінейрорегулятором

В схемі відносні величини:

- $\omega_0^*$  – кутова швидкість холостого ходу електродвигуна;
- $M^*$  – момент електродвигуна;
- $\omega_1^*$  – кутова швидкість валу електродвигуна;
- $M_{12}^*$  – пружний момент;
- $\omega_2^*$  – кутова швидкість другої маси;
- $m = \frac{T_M}{T_e}$  – відношення електромеханічної до електромагнітної постійних часу, де
 
$$T_M = \frac{J_1}{\beta};$$
- $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$  – коефіцієнт співвідношення мас;
- $\nu = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{EM}^2}$  – відношення квадратів частот недемпфованого механічного та електромеханічного резонансів;
- $b = \frac{\beta_S}{\beta}$  – відношення жорсткості лінеаризованої ділянки механічної характеристики навантаження до модуля жорсткості механічної характеристики електроприводу;
- $p_* = p \cdot T_e$  – оператор диференціювання у безрозмірній формі.

Модель передбачає замкнений контур регулювання через блок QNR, який отримує значення  $\omega_2^*$ , обчислює дискретну згортку з ваговими коефіцієнтами ( $W_1-W_4$ ) і формує сигнал керування  $U^*$ .

Модель містить такі компоненти: аперіодичну ланку електромеханічного перетворення енергії двигуна; два інтегруючі блоки мас із різною інерцією; пружний зв'язок між масами; знаходження робочої точки на падаючій ділянці характеристики навантаження; зворотний зв'язок із квазінейроргулятором.

Побудова моделі у вигляді структурної схеми в узагальнених безрозмірних параметрах дозволяє забезпечити універсальність результатів моделювання для різних типів машин та механізмів.

Вибір середовища MATLAB/Simulink для реалізації комп'ютерного моделювання двомасової електромеханічної системи зумовлений рядом функціональних, методичних та інженерно-технологічних переваг, які роблять цю платформу доцільною для створення, дослідження та верифікації складних динамічних об'єктів [12, 13, 14]. Simulink – це спеціалізоване середовище графічного моделювання, орієнтоване на побудову блочних діаграм, які відповідають структурі математичних моделей динамічних систем. Створення моделі у вигляді взаємопов'язаних блоків дозволяє наочно відтворити функціональну архітектуру системи керування, подати взаємодію між її елементами (електродвигуном, масами, пружними з'єднаннями, навантаженням тощо) та візуалізувати потоки сигналів у часі. Це підвищує інтуїтивність моделі, полегшує її верифікацію, налагодження та подальше масштабування.

На рис. 2 зображено реалізацію двомасової ЕМС у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах. Модель реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink, де відображено основні елементи, що визначають динаміку двомасової системи.

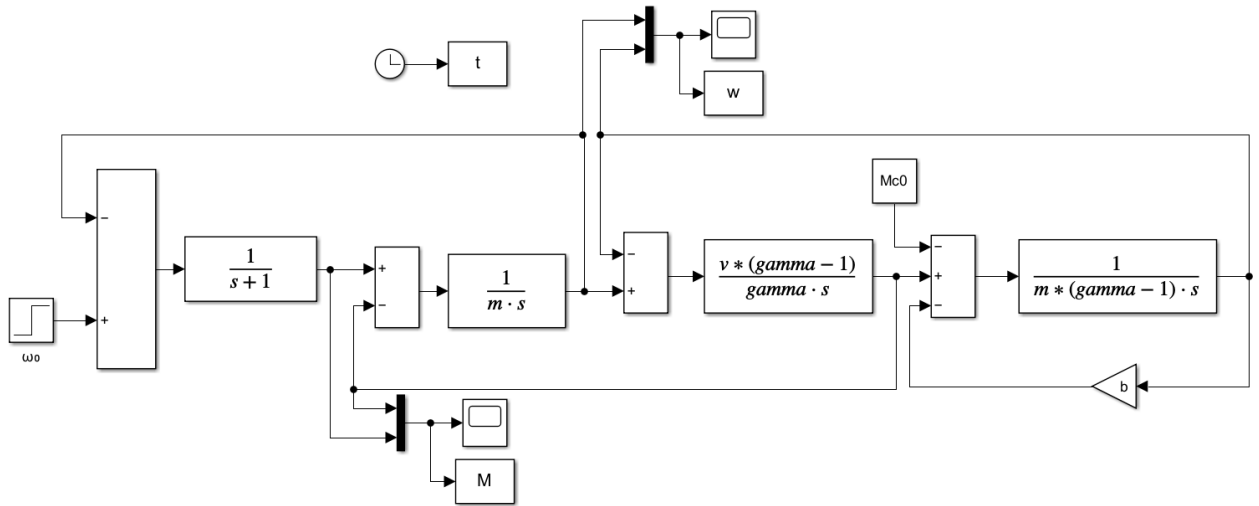


Рисунок 2 – Структурна схема розімкненої двомасової ЕМС з фрикційним навантаженням у MATLAB/Simulink

На рис. 2:

- Вхідна координата – завдання швидкості холостого ходу  $\omega_0^*$ . Його можна задавати у вигляді сталої (Constant block) або імпульсного сигналу (Step), залежно від сценарію моделювання;
- Аперіодична ланка електродвигуна  $\frac{1}{s+1}$  реалізує аперіодичну ланку першого порядку, моделює інерційну поведінку електромеханічного перетворювача та забезпечує згладжування вхідного керуючого сигналу до моменту, прикладеного до першої маси;
- Інтегруюча ланка першої маси  $\frac{1}{ms}$  реалізує І-ланку (інтегратор), яка моделює інерцію першої маси  $J_1$ . Вона приймає на вхід момент (суму від регулятора і реакції пружного зв'язку) та генерує швидкість обертання  $\omega_1^*$ ;
- Пружний зв'язок між масами  $\frac{\nu(\gamma-1)}{\gamma s}$  обчислює момент пружного зв'язку між першою та другою масами;
- У відповідному суматорі відбувається підсумовування моменту пружного зв'язку  $M_{12}^*$  і моменту опору  $M_{c0}^*$ ;

- Інтегруюча ланка другої маси  $\frac{1}{m(\gamma-1)s}$  описує інерційну поведінку другої маси  $J_2$ . На його вхід подається сумарний момент, а виходом є кутова швидкість  $\omega_2^*$ ;
- Фрикційне навантаження (блок з коефіцієнтом  $b$ ) – визначає характер фрикційної ділянки;
- Блоки візуалізації (Scope, Display, To Workspace) – елементи виводу результатів моделювання;
- Таймер та моделювальний час – використовується для синхронізації, побудови часових графіків та реалізації умовного перемикання режимів (наприклад, ввімкнення КНР у певний момент).

На рис. 3 зображено реалізацію структури квазінейрорегулятора (КНР) у середовищі MATLAB/Simulink.

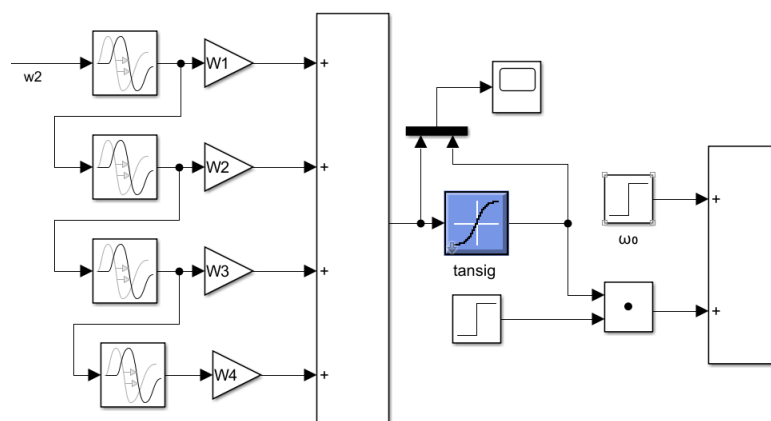


Рисунок 3 – Структурна схема КНР у середовищі MATLAB/Simulink

На даному рисунку:

- Вхідний сигнал:  $\omega_2^*$ , який надходить у чотири паралельні канали, кожен з яких реалізує затримку на величину  $T$ . Для реалізації цього використано послідовні блоки «Transport Delay», параметризовані згідно з обраним кроком дискретизації;
- Блоки вагових коефіцієнтів ( $W_1 - W_4$ ). Кожен із затриманих сигналів масштабовано окремим коефіцієнтом  $W_i$  (Gain). Значення  $W_i$  попередньо

розраховуються за аналітичними виразами на основі методу кінцевих різниць і відповідають бажаному характеристичного поліному [9, 10];

- Суматор сигналів (Sum). Після масштабування всі сигнали надходять у багатовхідний суматор, що реалізує згортку (вихідний нейрон). У результаті формується керувальний сигнал  $U^*$ , який подається на вхід моделі двигуна;
- Блок «*tansig*» у Simulink реалізує гіперболічну тангенсоїдну сигмоїдну функцію активації, яка широко використовується у нейронних мережах та системах керування. Ця функція забезпечує нелінійне перетворення сигналу, яке змінюється від «-1» до «+1»;
- Блок активації або перемикавання регулятора. Цей блок дозволяє активувати або деактивувати дію КНР на основі певної умови;
- Візуалізація і вивід даних. Сигнали передаються на блоки відображення (Scope, Display) та експортуються у Workspace для подальшого аналізу. Це забезпечує можливість побудови графіків часових діаграм.

Об'єднавши схеми на рис. 2 та рис. 3 отримаємо повну схему досліджуваної системи на рис. 4.

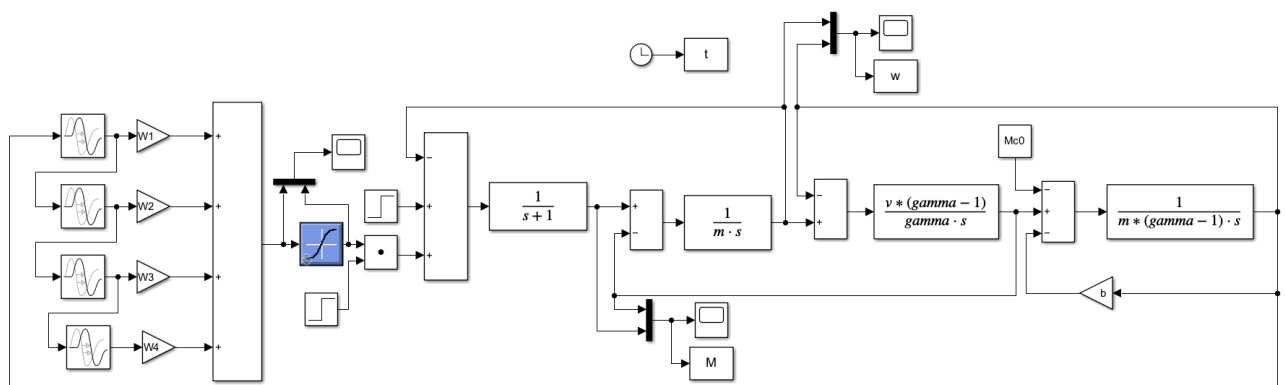


Рисунок 4 – Комп'ютерна модель двомасової електромеханічної системи з квазінейрорегулятором у середовищі MATLAB/Simulink

Схема побудована таким чином, щоб забезпечити дослідження системи у двох режимах: з відключеним та з активованим зворотним зв'язком через КНР. Перемикання здійснюється логічним блоком, що керується умовою часу або зовнішнім логічним сигналом.

У режимі розімкненої системи (на початковому етапі моделювання або при відключеному КНР),  $\omega_0^*$  подається безпосередньо на об'єкт. Такий режим дозволяє аналізувати природну динаміку системи, зокрема виявити фрикційні автоколивання при попаданні робочої точки на падаючу ділянку характеристики навантаження, що дає змогу підтвердити межі стійкості для обраних параметрів системи.

У режимі замкненої системи з активованим КНР, керувальний сигнал формується у блоці квазінейрорегулятора на основі попередніх значень швидкості другої маси  $\omega_2^*$ , помножених на відповідні вагові коефіцієнти. КНР активується через логічний блок перемикачання після досягнення умовного моменту часу ( $t \geq t_s$ ).

Представлена модель використовується для перевірки теоретичних результатів та верифікації ефективності синтезованого КНР у динамічних режимах двомасової ЕМС. У результаті отримано модель із можливістю зміни параметрів, яка відтворює динамічні властивості системи з достатнім рівнем точності для цілей аналізу стійкості, оцінки ефективності регулятора та підтвердження теоретичних результатів.

Створена комп'ютерна модель має бути здатна реалізувати наступні цілі:

- перевірити доцільність використання математичної моделі двомасової ЕМС у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах;
- дослідити режими функціонування системи у розімкненому стані з метою виявлення автоколивальних, визначення меж стійкості;
- здійснити оцінку адекватності та коректності функціонування КНР шляхом порівняння результатів моделювання з теоретичними положеннями.

З цією метою реалізовано такі ситуаційні режими моделювання:

1. розімкненої системи при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці механічної характеристики фрикційного навантаження;
2. моделювання автоколивального режиму при знаходженні робочої точки на межі стійкості;
3. моделювання розбіжного коливального процесу;



4. моделювання з підключенням КНР під час перехідного процесу розімкненої системи;
5. запуск системи одразу з КНР.

Таким чином, реалізовані режими моделювання охоплюють широкий спектр типових ситуацій, з якими може стикатись електропривод в умовах практичної експлуатації.

Тривалість кожного моделювання становила 60 одиниць симуляційного часу. Крок інтегрування було встановлено як  $T = 0,01$ , що гарантує точність у розрахунку похідних і відповідність реалізації методу кінцевих різниць при дискретизації сигналів у модулі КНР.

Розгляд динаміки розімкненої двомасової ЕМС є важливим етапом підтвердження теоретичних положень, зокрема аналітичних умов меж стійкості системи. Відсутність замкненого контуру керування у цьому випадку дає змогу дослідити внутрішню динаміку об'єкта, яка визначається виключно фізичними параметрами системи та характером нелінійного фрикційного навантаження. Метою моделювання є підтвердження того, що при перебуванні робочої точки на падаючій ділянці характеристики навантаження виникають автоколивання, які можуть мати зростаючий або незгасаючий характер залежно від параметрів системи.

На рис.5 в якості прикладу розглянута система з параметрами  $\gamma = 1,2$ ,  $\nu = 10$  і надана їй межа стійкості. Штрихування межі спрямоване у бік області стійкості.

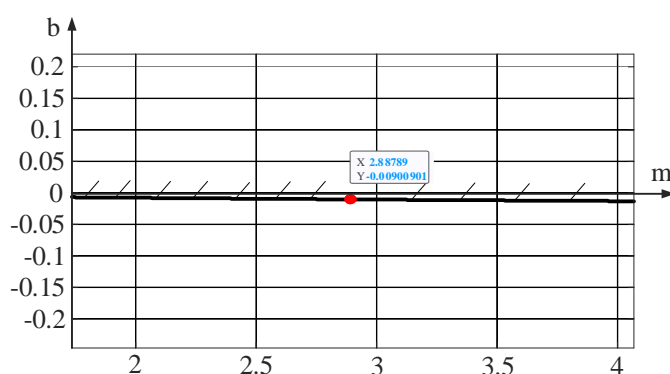


Рисунок 5 – Межа стійкості для ЕМС у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах при  $\gamma = 1.2$ ,  $\nu = 10$

У подальшому, результати комп'ютерного моделювання часових діаграм кутової швидкості другої маси  $\omega_2^*$  та моменту навантаження  $M^*$  проведені для різних значень параметра  $b$  та при сталих параметрах  $m = 2,887$ ,  $\gamma = 1,2$ ,  $\nu = 10$ .

На рис.6 результати моделювання для випадку  $b = 0.2$  що відповідає області асимптотичної стійкості. На діаграмах видно згасаючий перехідний процес для обох координат. Коливання кутової швидкості та моменту затухають протягом перших 30 одиниць часу, після чого система виходить на стаціонарний режим. Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями. Для додатного коефіцієнта  $b$  система демонструє стабільну поведінку з поступовим переходом до рівноважного стану.

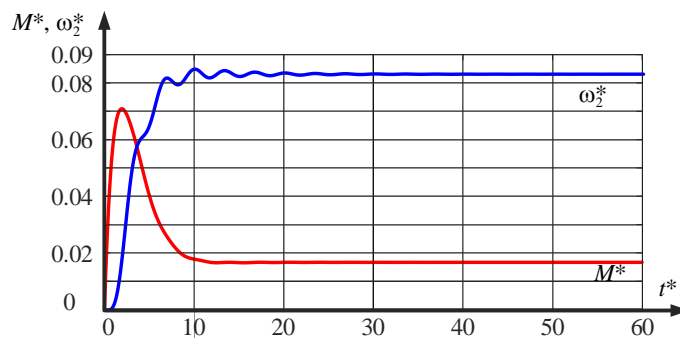


Рисунок 6 – Перехідний процес у стійкій системі при  $b = 0.2$ , згасаючі коливання швидкості та моменту.

Результати моделювання для випадку, коли параметри системи належать межі коливальної стійкості  $b = -0.009$  представлені на рис. 7. Спостерігається усталений автоколивальний режим.

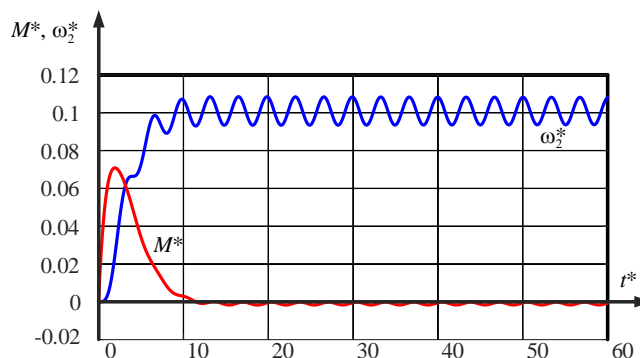


Рисунок 7 – Усталений автоколивальний режим на межі стійкості при  $b = -0,009$ .

Коливання мають сталу амплітуду, що не змінюється в часі, а самі діаграми є типовими для так званої консервативної системи. Це свідчить про те, що кількість енергії, яка надходить у систему через механізм негативного в'язкого тертя, дорівнює кількості енергії, яка втрачається через електромеханічні дисипативні ефекти. Таким чином, система перебуває у стані граничної рівноваги між збудженням і розсіюванням енергії.

Моделювання при  $b = -0,1$ , яке відповідає області за межами стійкості, представлено на рис. 8. У цьому випадку система переходить у розбіжний автоколивальний режим. Початкова фаза коливань швидко змінюється на фазу зростання амплітуди, що видно з часової діаграми: амплітуда коливань зростає, особливо після 30 одиниці часу. Це є прямим свідченням втрати стійкості при зменшенні  $b$  до значень, при яких система вже не здатна самостійно стабілізувати динамічний режим після збурення на падаючій ділянці характеристики моменту навантаження.

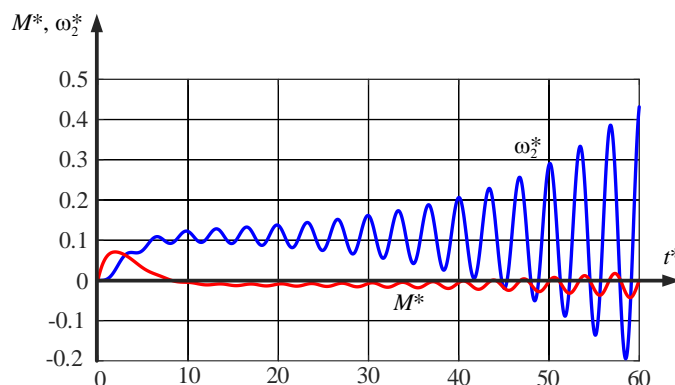


Рисунок 8 – Розбіжний автоколивальний процес при  $b = -0,1$

Отримані результати підтверджують залежність динаміки двомасової ЕМС від параметра  $b$ . Перехід від згасаючого до сталого і далі до розбіжного коливального процесів при зменшенні  $b$  демонструє типову зміну властивостей для систем з від'ємним в'язким тертям і узгоджується з теорією [6].

Аналіз результатів моделювання підтверджує, що за відсутності активного регулювання, двомасова ЕМС при певних параметрах тертя є внутрішньо нестійкою системою. Виникнення автоколивань на падаючій ділянці фрикційного

навантаження є прямим наслідком негативної диференціальної жорсткості, яка не компенсується жодними внутрішніми властивостями системи. Це створює підґрунтя для запровадження замкненої структури регулювання, що буде розглянуто далі.

КНР підключається у визначений момент під час розвитку автоколивального режиму. Основна мета полягає у встановленні того, наскільки стабілізуючий вплив КНР залежить від фази коливального процесу на момент активації. Для цього було змодельовано два характерні сценарії: збуджений автоколивальний режим на межі стійкості та розбіжний коливальний процес за межами стійкості.

На рис. 9-11 наведено результати моделювання, коли система функціонує при  $b = -0,009$  (тобто на межі коливальної стійкості). До моменту  $t^* \approx 30$  система демонструє стабільні автоколивання сталої амплітуди — це типова поведінка для консервативної системи, у якій надходження та розсіювання енергії збалансовані. Після активації КНР у момент часу  $t^* \approx 30$ , залежно від фази автоколивань, спостерігається характерна реакція системи. Було досліджено три випадки:

- рис 9 – підключення у фазі мінімальної амплітуди;
- рис.10 – підключення у фазі нульового середнього значення (точка переходу через вісь);
- рис 11 – підключення у фазі максимальної амплітуди.

На рис. 9 підключення КНР здійснюється у точці, що відповідає нижньому значенню автоколивального сигналу швидкості. Регулятор формує керуючий сигнал у протифазі до напрямку руху, що викликає ефективне демпфування коливань. При цьому амплітуда керуючого моменту помірна, з компенсаційним піком. Система стабілізується плавно без суттєвого перерегулювання.

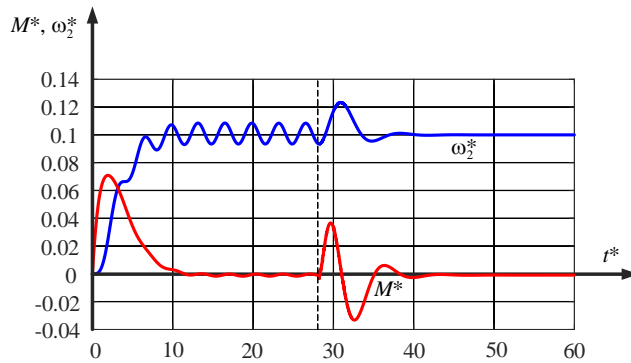


Рисунок 9 – Підключення КНР в усталеному автоколивальному режимі у фазі мінімальної амплітуди  $t^* = 28.2$ ;

На рис. 10 КНР активується у момент, коли проходить через нуль. У цьому випадку амплітуда керуючого моменту є найменшою серед усіх трьох сценаріїв, а перехідний процес характеризується високою гладкістю. Стабілізація відбувається поступово, з мінімальним коливальним впливом і без перенавантаження. Це свідчить про високу узгодженість з алгоритмом регулятора, коли зміна напрямку швидкості не вимагає інтенсивного втручання.

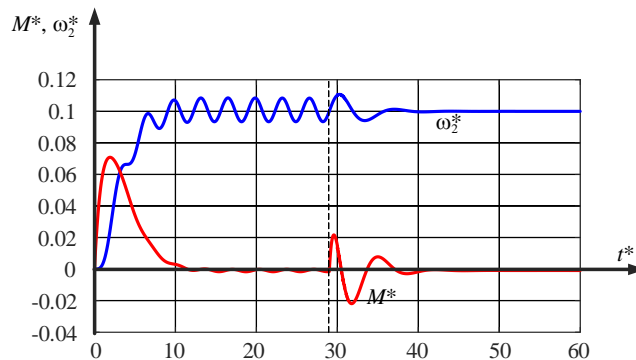


Рисунок 10 – Підключення КНР в усталеному автоколивальному режимі у фазі нульового середнього значення  $t^* = 29$

На рис. 11 у момент активації КНР швидкість досягає свого максимуму. Це зумовлює найбільшу амплітуду керуючого моменту серед трьох випадків, оскільки регулятор намагається швидко компенсувати енергію, накопичену в системі. У результаті виникає короткочасний перевищуючий імпульс, однак згасання коливань відбувається, із дещо довшим перехідним процесом, порівняно з іншими режимами.

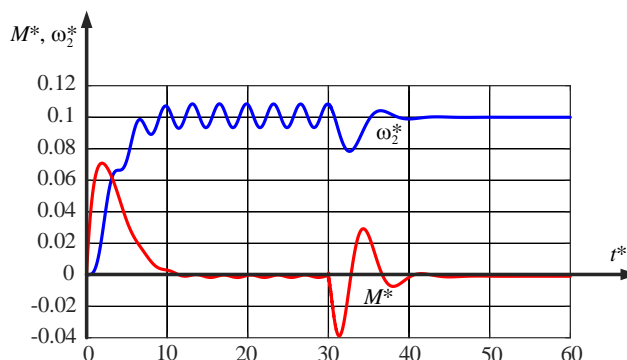


Рисунок 11 – Підключення КНР в усталеному автоколивальному режимі у фазі максимальної амплітуди  $t^* = 30$

Аналіз результатів моделювання підключення КНР в усталеному автоколивальному режимі дозволяє зробити висновки, що усі три режими активації КНР забезпечують стабілізацію системи з переходом до усталеного режиму. З точки зору компромісу між швидкістю згасання та енергетичними витратами найбільш ефективним є підключення КНР поблизу нульового значення швидкості.

Аналогічно, на рис. 12–14 наведено результати моделювання поведінки двомасової електромеханічної системи при активації квазінейрорегулятора у розбіжному автоколивальному режимі. До моменту підключення КНР система демонструє зростаючі автоколивання з розбіжною амплітудою. Так само можна зробити висновки, що усі три режими активації КНР забезпечують стабілізацію системи з переходом до усталеного режиму.

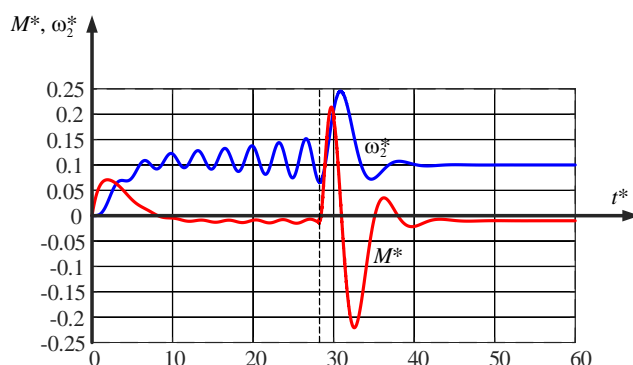


Рисунок 12 – Підключення КНР в розбіжному автоколивальному процесі у фазі мінімальної амплітуди  $t^* = 28.2$

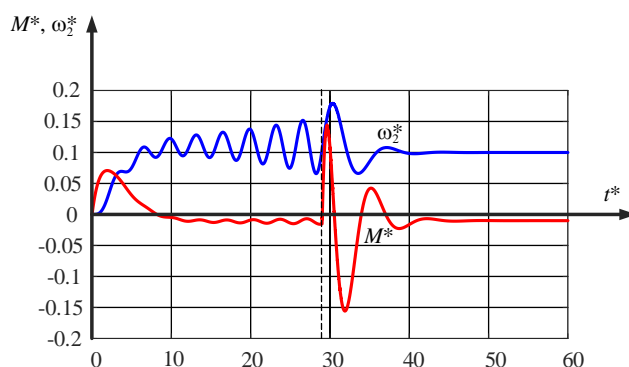


Рисунок 13 – Підключення КНР в розбіжному автоколивальному процесі у фазі нульового середнього значення  $t^* = 29$

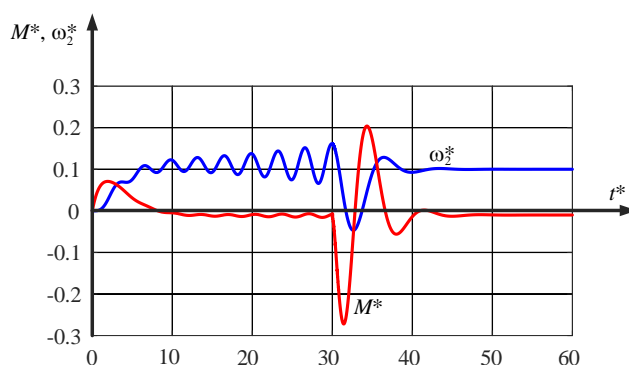


Рисунок 14 – Підключення КНР в розбіжному автоколивальному процесі у фазі максимальної амплітуди  $t^* = 30$

Результати моделювання демонструють здатність квазінейрорегулятора ефективно стабілізувати динаміку двомасової ЕМС навіть за умов попередньо збудженого автоколивального процесу. Перехідний процес супроводжується усуненням фрикційних автоколивань з досягненням заданих показників регулювання.

На рис. 15 та рис. 16 розглядається робота КНР, який активується одночасно з запуском системи, тобто при  $t^* = 0$ . Різниця полягає у параметрі фрикційного навантаження, що визначає характер автоколивань.

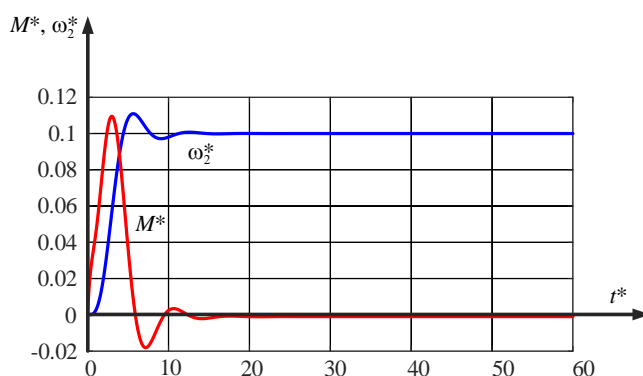


Рисунок 15 – Підключення КНР в усталеному автоколивальному режимі при  $t^* = 0$

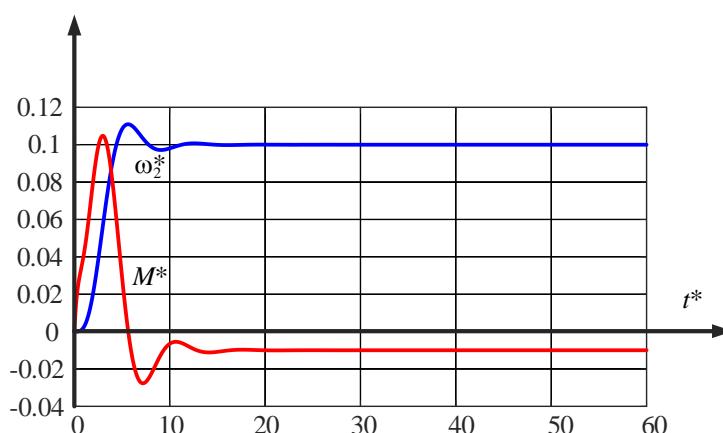


Рисунок 16 – Підключення КНР в розбіжному автоколивальному процесі при  $t^* = 0$

З отриманих графіків можна зробити висновки, що підключення КНР із моменту запуску системи дозволяє запобігти формуванню автоколивань. Таким чином, результати моделювання демонструють ефективність квазінейрорегулятора в умовах пуску системи. КНР запобігає виникненню автоколивань та досягнення заданих показників регулювання.

**Висновки.** Комп'ютерне моделювання двомасової електромеханічної системи з нелінійним фрикційним навантаженням у модифікованих узагальнених безрозмірних параметрах і аналіз динаміки в умовах розімкненого й замкненого (з квазінейрорегулятором) регулювання підтвердили висновки щодо можливої нестійкості електромеханічної системи при знаходженні робочої точки на падаючій ділянці характеристики фрикційного навантаження. У розімкненому режимі при зниженні параметра  $b$  нижче критичного значення виникає розбіжний



характер коливального процесу, який в умовах нелінійності переходить в автоколивальний режим. Дослідження варіантів підключення КНР в різні фази коливального процесу, як у випадку знаходження параметрів системи на межі стійкості, так і у режимі розбіжних коливань, показали, що найменша амплітуда коливань під час перехідного процесу спостерігається при підключенні КНР у фазі нульового значення швидкості. Аналіз часових діаграм підтвердив, що підключення КНР усуває нестійкість системи і фрикційні автоколивання. Сучасний розвиток мікропроцесорної техніки та суттєве покращення роздільної здатності енкодерів створюють передумови для практичного використання квазінейрорегуляторів в електроприводах машин і механізмів, які мають вигляд двомасової електромеханічної системи з пружним кінематичним зв'язком та нелінійним фрикційним навантаженням.

#### БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Загірняк М. В., Клепиков В. Б., Ковбаса С. М., Михальський В. М., Пересада С. М., Садовой О. В., Шаповал І. А. Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. 310 с.
2. Dinolova P, Ruseva V, Dinolov O. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations. *Energies*. № 16(20):7136, 2023.
3. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода : навч. посіб. Київ : Кондор, 2005. 408 с.
4. Жовтянський В. А. Ключові проблеми енергозбереження у розрізі енергетичної стратегії України // Енергоефективність-2002 : тези Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 2002). Київ, 2002. С. 20–25.
5. Ковалко М. П., Денисюк С. П.; відп. ред. Шидловський А. К. Енергозбереження – пріоритетний напрям державної політики України. Київ : УЕЗ, 1998. 506 с.
6. Клепиков В. Б. Динаміка електромеханічних систем з нелінійним тертям: монографія. Харків : Підручник НТУ ХПІ, 2014. 408 с.
7. Armstrong-Helouvry V. J. Control of Machines with Friction. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1991. 173 p.
8. Клепиков В. Б., Колотіло В. І., Полянська І. С., Руденко А. В. Квазінейрорегулятор для електромеханічної системи. Деклараційний патент України № 12362.
9. В. Klepikov, O. S. Bieliaiev, «Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load», *Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2022, pp. 1–4.
10. Клепиков В. Б., Беляєв О. С. Нейрорегулятор зі спрощеною структурою для електроприводу з фрикційним навантаженням // *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. №3, 2023. С. 3–13.
11. Обруч И. В., Хорева А. В. Новая модель двухмассовой электромеханической системы в обобщенных параметрах. *Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*, 2015. № 12 (1121). С. 160–163.

12. Tyagi A. *MATLAB and SIMULINK for Engineers*. – New Delhi: Oxford University Press, 2012. – 504 p.
13. Palani S. *Automatic Control Systems: With MATLAB*. 2nd ed. Cham : Springer, 2022. 908 p.
14. Esfandiari R. *Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2013. 550 p.

#### REFERENCES:

1. Zahirniak M. V., Klepikov V. B., Kovbasa S. M., Mykhalskyi V. M., Peresada S. M., Sadovyi O. V., Shapoval I. A. *Energy-Efficient Electromechanical Systems for General Technological Applications*. Kyiv. Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2018. 310 p.
2. Dinolova P., Ruseva V., Dinolov O. «Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations.» *Energies*, 2023. vol. 16. no. 20, art. 7136.
3. Zakladnyi O. M., Prakhovnik A. V., Solovey O. I. *Energy Saving by Means of Industrial Electric Drives: textbook*. Kyiv : Kondor, 2005. 408 p.
4. Zhovtianskyi, V. A. «Key Problems of Energy Saving in the Context of Ukraine’s Energy Strategy.» *Energy Efficiency-2002: proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Kyiv, February 2002)*. Kyiv : 2002, pp. 20–25.
5. Koval’ko M. P., Denysiuk S. P. (ed. Shydlovskyi A. K.) *Energy Saving – a Priority Direction of Ukraine’s State Policy*. Kyiv – Ukrainian Energy Publishing, 1998. 506 p.
6. Klepikov V. B. *Dynamics of Electromechanical Systems with Nonlinear Friction: monograph*. Kharkiv – NTU «KhPI» Textbook, 2014. 408 p.
7. Armstrong-Helouvry B. J. *Control of Machines with Friction*. Boston – Kluwer Academic Publishers, 1991. 173 p.
8. Klepikov V. B., Kolotilo V. I., Polianska I. S., Rudenko A. V. «Quasi-Neuroregulator for an Electromechanical System.» *Ukrainian declarative patent UA 12362 A*, 2021.
9. Klepikov V. B., Bieliaiev O. S. «Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load.» *Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2022. pp. 1–4.
10. Klepikov V. B., Bieliaiev O. S. «Neuroregulator with a Simplified Structure for Electric Drive with Frictional Load.» *Energy Saving. Energy. Energy Audit*, 2023, no. 3, pp. 3–13.
11. Obruch I. V., Khoreva A. V. «New Model of a Two-Mass Electromechanical System in Generalized Parameters.» *Vestnyk NTU KhPI. Thematic Issue: Problems of Automated Electric Drives. Theory and Practice*, 2015, no. 12(1121), pp. 160–163.
12. Tyagi A. *MATLAB and Simulink for Engineers*. 1st ed. New Delhi – Oxford University Press, 2012. 504 p.
13. Palani S. *Automatic Control Systems: With MATLAB*. 2nd ed. Cham – Springer, 2022. 908 p.
14. Esfandiari R. *Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB*. Boca Raton – CRC Press, 2013. 550 p.