

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.81>

УДК 004.94

Комп'ютерна модель синхронізації валів роторно-лопатєвого двигуна за фізичних обмежень електропривода

Галін Юрій Олександрович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-9896>; halin.yurii@chnu.edu.ua

Шевчук Сергій Федорович²⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4579-6483>; s.shevchuk@kitu.nau.edu.ua

Близнюк Микола Миколайович³⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-4118>; Blyzniyk@gmail.com. Scopus Author ID: 57221091774

¹⁾ Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Коцюбинського, 2, Чернівці, 58002, Україна

²⁾ Фаховий коледж «KAІ TEX» Національного університету «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

³⁾ Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка, Остроградського, 2
Полтава, 36000, Україна

АНОТАЦІЯ

Розроблено зв'язану обчислювальну модель синхронізації валів роторно-лопатєвого двигуна внутрішнього згоряння, що враховує електричні обмеження керувальних електричних машин. У наявних моделях таких двигунів електричні машини подають як ідеальні джерела моменту, здатні миттєво й без обмежень сформувати будь-який потрібний момент, тому ці моделі не дають змоги оцінити, чи утримає синхронізацію реальна апаратура. Запропонована модель поєднує механічну динаміку двох валів, змінний газовий момент робочих камер, втрату маси робочого тіла крізь ущільнення лопатей і фізично обмежений електропривод на основі синхронного двигуна з постійними магнітами із векторним керуванням. Виконавчі машини розглядаються як приводи, момент яких формується через динаміку струму обмоток і обмежений доступним струмом і напругою апаратури, а також протиелектрорушійною силою, що зростає зі швидкістю обертання. Над електричним рівнем працює алгоритм синхронізації, який після кожного робочого ходу оновлює заданий середній момент за зміною кінетичної енергії валів. Модель реалізовано як браузерний симулятор. Чисельні експерименти показують, що допустимий масштаб двигуна визначає насамперед запас за моментом привода – відношення максимального моменту, який привод здатен віддати, до середнього газового моменту циклу. Синхронізація втрачається, коли цей запас наближається до одиниці. Той самий критерій описує межу для двох робочих середовищ: за того самого привода допустимий об'єм камери на стисненому повітрі більш ніж на порядок перевищує допустимий об'єм за згоряння, і цю різницю повністю пояснює відношення середнього газового моменту на одиницю об'єму камери. Режим на стисненому повітрі запропоновано як основу першого лабораторного стенда, тому що він дає змогу використати помітно більшу геометрію двигуна за тієї самої апаратури.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання; роторно-лопатєвий двигун; синхронізація валів; електромагнітна синхронізація; векторне керування; синхронний двигун із постійними магнітами; обмеження електропривода; запас за моментом; контур струму; газовий момент

Для цитування: Галін Ю. О., Шевчук С. Ф., Близнюк М. М. «Комп'ютерна модель синхронізації валів роторно-лопатєвого двигуна за фізичних обмежень електропривода». *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 2 (4): 1047–1056. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.81>

Актуальність. Роторно-лопатєві двигуни внутрішнього згоряння (РЛДВЗ), відомі також як двигуни типу «кіт і миша», є об'ємними машинами, у яких робочий цикл формується відносним кутовим рухом валів із лопатями: вали обертаються з однаковою середньою кутовою швидкістю, але з періодичним фазовим зсувом, що утворює змінний об'єм камери без кривошипного механізму. Заміну механічної передачі, яка зазвичай задає цей зсув, електромагнітною координацією лопатей запропоновано в патенті [1]. Сакіта [2] проаналізував конструкцію та кінематику такого двигуна, Такер, Ван і Ліброві [3] розробили модель газодинамічних процесів у камерах, після чого було узагальнено основи термодинамічного циклу. У комп'ютерних моделях РЛДВЗ синхронізацію зазвичай зводять до механічного узгодження руху, подаючи електричні машини як ідеальні джерела моменту, здатні миттєво й без обмежень його формувати. Попередня робота [4] дотримувалася цього підходу і показала здійсненність електромагнітного керування, проте не враховувала ані максимальний струм обмотки, ані зростання проти-ЕРС зі швидкістю, ані обмежену смугу пропускання контуру струму.

Сучасні чисельні дослідження роторних двигунів [5] демонструють можливості обчислювальної гідрогазодинаміки, проте розглядають двигун як суто термогазодинамічний об'єкт. Класична теорія векторного керування (ВК) спирається на стандартні моделі синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) та усталену методологію проєктування електроприводів [6], [7], тоді як сучасні методи керування струмом, зокрема прогнози [8], розвивають незалежно від кінематичної структури роторно-лопатевого двигуна внутрішнього згоряння. Багатоосову координатну досліджували окремо: перехресно-зв'язане керування [9] та архітектури позиційної синхронізації багатодвигунних систем [10] добре опрацьовані, але не адаптовані до пари роторів, зв'язаних спільним газовим середовищем. Внесок цієї роботи – зв'язана модель, у якій фізично обмежений привод СДПМ під векторним керуванням взаємодіє з реалістичним коливальним газовим навантаженням, і встановлення величини, що фактично обмежує допустимий масштаб двигуна.

Мета дослідження полягає у знятті ідеалізації виконавчих машин, на якій ґрунтуються наявні моделі синхронізації валів РЛДВЗ, і в побудові зв'язаної комп'ютерної моделі, де два вали, змінний газовий момент робочих камер, втрата маси робочого тіла крізь ущільнення та фізично обмежений привод СДПМ під керуванням ВК описані як єдина система. Це дає змогу встановити величину, яка фактично обмежує допустимий масштаб електромагнітної синхронізації, та оцінити апаратні конфігурації ще до виготовлення лабораторного стенда.

Механічна частина моделі описує два вали, кожен зі своїм кутовим положенням, кутовою швидкістю та приводом. Рух не обмежений наперед заданою траєкторією і є наслідком газового моменту, інерції системи разом з інерцією маховика та фактичного моменту двигунів. Газовий цикл описує зміну тиску в камерах стиснення та розширення. Привод відповідає стандартному d-q поданню СДПМ із каскадним контуром струму, компенсацією проти-ЕРС і запобіганням інтегральному насиченню [7]. Регулюється струм осі q, завдання струму осі d утримується нульовим, тож машина працює без ослаблення поля. Усі електричні величини подано в амплітудно-інваріантній d-q системі: I_q , обмеження струму $I_{\max}$ і обмеження напруги є амплітудами фазних величин, а не діючими значеннями. Заданий момент перетворюється на бажаний струм осі q й обмежується апаратною межею, після чого ПІ-регулятор формує напругу. Коефіцієнт компенсації проти-ЕРС впливає з прийнятого нормування. Завдання напруги обмежується амплітудою фазної напруги, доступної за просторово-векторної модуляції. Струм не змінюється миттєво, тому що обмотки індуктивні; одержаний струм знову обмежується апаратною межею, перш ніж перетворити на момент.

Над електричним рівнем працює алгоритм синхронізації. Він діє на зміщення бісектриси кута між лопатями – відхилення середнього кутового положення двох валів від ідеального періодичного положення. Після кожного робочого ходу алгоритм обчислює зміну ΔE_k кінетичної енергії відносно опорного стану й оновлює заданий середній момент.

Модель реалізовано як браузерний симулятор, що для кожного ходу повідомляє його тривалість, зміщення бісектриси кута між лопатями, піковий струм і напругу, середню кутову швидкість, діапазон миттєвого газового моменту та ознаки насичення.

Математична модель об'єднує механічну динаміку двох валів, політропні процеси в робочих камерах, електричну модель каналу керування моментом, ПІ-регулятор струму та алгоритм корекції заданого моменту.

Для механічної частини $i \in \{1, 2\}$ є номером вала; t – час, с; θ_i – кутове положення i -го вала, рад; ω_i – його кутова швидкість, рад/с; J – момент інерції кожного вала, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_1 і M_2 – електромагнітні моменти першого та другого електроприводів, Н·м; M_g – газовий момент, Н·м; $s \in \{-1, +1\}$ – безрозмірний знак напрямку руху, який змінюється після завершення робочого ходу. Позначення d/dt означає похідну за часом, тому швидкість є похідною кута, а не самим кутом.

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i, \quad J \frac{d\omega_1}{dt} = s(M_g - M_1), \quad J \frac{d\omega_2}{dt} = s(M_2 - M_g). \quad (1)$$

Для політропних процесів індекс x стосується камери розширення, а індекс c – камери стиснення; p_x і p_c – тиски в цих камерах, Па; V_x і V_c – їхні поточні об'єми, м³; n – безрозмірний показник політропи; C_x і C_c – сталі політроп відповідних камер, що визначаються їхнім станом на початку ходу; α – кут повороту камери, рад; $C_V = dV/d\alpha$ – геометричний коефіцієнт зміни об'єму за кутом, м³/рад.

$$p_x V_x^n = C_x, \quad p_c V_c^n = C_c, \quad M_g = (p_x - p_c) C_V. \quad (2)$$

Електричну частину моделі подано в синхронній системі координат dq , у якій квадратурна вісь q відповідає за формування електромагнітного моменту. Позначення i_q^* та i_q описують відповідно задане й фактичне значення струму вздовж осі q , А; M^* – заданий момент, Н·м; M – фактичний електромагнітний момент, Н·м; K_t – стала моменту, Н·м/А; I_{max} – допустима амплітуда струму, А; L – індуктивність обмотки, Гн; R – її опір, Ом; v_q – прикладена напруга осі q , В; K_e – коефіцієнт проти-ЕРС, В·с/рад; ω – кутова швидкість відповідного вала, рад/с. Оператор $\text{sat}(x, a) = \max(-a, \min(x, a))$ обмежує x інтервалом $[-a; a]$.

$$i_q^* = \text{sat}\left(\frac{M^*}{K_t}, I_{max}\right), \quad L \frac{di_q}{dt} = v_q - R i_q - K_e \omega, \quad M = K_t i_q. \quad (3)$$

Похибка струму e , А, дорівнює різниці між заданим струмом i_q^* і фактичним струмом i_q .

$$e = i_q^* - i_q. \quad (4a)$$

До обмеження регулятор формує напругу $v_{q,0}$, В. Тут K_p – пропорційний коефіцієнт, В/А; K_i – інтегральний коефіцієнт, В/(А·с); z – інтеграл похибки, А·с; складова $K_e \omega$ компенсує проти-ЕРС.

$$v_{q,0} = K_p e + K_i z + K_e \omega. \quad (4b)$$

Стан інтегратора z змінюється зі швидкістю e , доки модуль ненасиченої напруги $v_{q,0}$ не перевищує межу V_{max} , В. За насичення похідна dz/dt приймається рівною нулю, тому накопичення інтегратора припиняється.

$$\frac{dz}{dt} = \begin{cases} e, & |v_{q,0}| \leq V_{max}, \\ 0, & |v_{q,0}| > V_{max}. \end{cases} \quad (4c)$$

До електричної частини подається фактична напруга v_q , отримана обмеженням ненасиченої команди $v_{q,0}$ інтервалом $[-V_{max}; V_{max}]$.

$$v_q = \text{sat}(v_{q,0}, V_{max}). \quad (4d)$$

Для налаштування регулятора b_w – задана смуга пропускання контуру струму, рад/с; V_{bus} – напруга шини постійного струму, В. Співвідношення $K_e = (2/3)K_t$ відповідає прийнятій у моделі нормалізації dq -перетворення, а V_{max} задає межу фазної напруги за просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції.

$$K_p = L b_w, \quad K_i = R b_w, \quad K_e = \frac{2}{3} K_t, \quad V_{max} = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

У чисельній реалізації в момент $t = 0$ задано $i_q(0) = \text{sat}(M^*(0)/K_t, I_{max})$ та $z(0) = 0$. Початкову кутову швидкість ω_0 визначено окремим механічним розрахунком усталеного руху.

Для оцінювання стану після кожного ходу j – номер завершеного ходу; $E_{k,j}$ – сумарна кінетична енергія двох валів після j -го ходу, Дж; $E_{k,0}$ – її початкове значення, Дж; δ_j – зміщення бісектриси після j -го ходу, град; wrap_{90° – оператор приведення кута до інтервалу $[-45^\circ; 45^\circ]$. Множник $180^\circ/\pi$ переводить радіани у градуси.

$$E_{k,j} = \frac{J}{2} (\omega_1^2 + \omega_2^2), \quad \delta_j = \text{wrap}_{90^\circ} \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \frac{180^\circ}{\pi} \right). \quad (6)$$

Після завершення j -го ходу обчислюється заданий момент M_{j+1}^* для наступного ходу, Н·м. Тут A_g – робота газу за цикл, Дж; k – безрозмірна частка цієї роботи, врахована в завданні моменту; K_{corr} – коефіцієнт корекції, град⁻¹; δ_j – зміщення бісектриси; $E_{k,j} - E_{k,0}$ – зміна кінетичної енергії, Дж; u_1 і u_2 – початковий та кінцевий кути камери в межах ходу, рад. Обчислене значення M_{j+1}^* залишається сталим протягом наступного ходу.

$$M_{j+1}^* = \frac{kA_g - K_{corr}\delta_j(E_{k,j} - E_{k,0})}{u_2 - u_1}. \quad (7a)$$

Середній газовий момент $\bar{M}_g$, Н·м, визначається як відношення врахованої роботи kA_g до кутового інтервалу ходу $u_2 - u_1$.

$$\bar{M}_g = \frac{kA_g}{u_2 - u_1}. \quad (7b)$$

Безрозмірний показник Λ характеризує запас моменту як відношення максимально доступного електромагнітного моменту $K_t I_{max}$ до середнього газового моменту $\bar{M}_g$.

$$\Lambda = \frac{K_t I_{max}}{\bar{M}_g}. \quad (7c)$$

Безрозмірний показник Π порівнює характерний час струмового контуру $1/b_w$ із тривалістю одного робочого ходу T_h , с.

$$\Pi = \frac{1}{b_w T_h}. \quad (7d)$$

У базовому розрахунку використано дані приводу ODrive M8325s 100KV з параметрами $R = 0,024$ Ом, $L = 9,9$ мкГн, $K_t = 0,083$ Н·м/А та $I_{max} = 60$ А. Напруга шини $V_{bus} = 56$ В відповідає межі фазної напруги $V_{max} = 32,33$ В; смуга пропускання контуру струму $b_w = 1000$ рад/с.

Геометрію задано об'ємом камери $V_c = 4,0$ см³, кутовим розміром лопаті $U_L = 40^\circ$ та ступенем стиснення $\varepsilon = 9$. Звідси кутовий інтервал між лопатями $\varphi_s = 100^\circ$, початковий і кінцевий кути робочого ходу $u_1 = 10^\circ$ та $u_2 = 90^\circ$, а внутрішній радіус камери $R_1 = 6,592$ мм. Для густини матеріалу ротора $\rho = 7800$ кг/м³ та додаткового моменту інерції маховика $J_f = 1,0 \cdot 10^{-4}$ кг·м² момент інерції кожного вала становить $J = 1,21694 \cdot 10^{-4}$ кг·м².

Початкові параметри робочого тіла становлять $p_{at} = 100$ кПа та $T_{at} = 300$ К; показник політропи $n = 1,3$. Для режиму згоряння приріст температури $\Delta T = 2200$ К, для режиму стисненого повітря $\Delta T = 0$ К; у базовому режимі $\lambda = 20$ % – частка втраченої маси робочого тіла. В алгоритмі синхронізації $K_{corr} = 0,3$ град⁻¹ і $k = 1$. Крок інтегрування $\Delta t = 0,5$ мкс, тривалість розрахунку – 30 робочих ходів. Значення 185,0 рад/с і 8,49 мс є результатами розрахунку усталеного режиму, а не незалежними вхідними параметрами.

Інтегратор ПІ-регулятора попередньо встановлюється у його усталене значення: якщо він стартує з нуля, тоді як струм наперед задано, контур протидіє сам собі й струм падає з 27,5 А до 14,9 А за 0,8 мс, що породжує хибний пусковий перехідний процес і сплеск струму близько 50 А. Незалежність від кроку перевірено послідовним його зменшенням удвічі: між $dt = 4$ мкс і $dt = 0,125$ мкс залишкове зміщення бісектриси змінюється з $1,403^\circ$ до $1,181^\circ$, а піковий струм – з 27,54 А до 27,49 А. Результати одержано за $dt = 0,5$ мкс, для якого подальше зменшення кроку вчетверо змінює зміщення менш ніж на $0,04^\circ$.

Базовий режим імітує згоряння бутану в камері 4,0 см³ за двадцятивідсоткової втрати маси робочого тіла. Система синхронізує тридцять послідовних робочих ходів: зміщення бісектриси монотонно збігається від нуля й усталюється на $-1,213^\circ$, тривалість ходу стабілізується на 8,49 мс, середня кутова швидкість – на 185,0 рад/с. Піковий струм становить 27,50 А проти межі 60 А, пікова напруга – 17,35 В проти 32,33 В; насичення не досягається в жодній точці. Рис. 1 показує, як фактично навантажений привод у межах одного усталеного ходу: миттєвий газовий момент проходить від +15,08 до -3,11 Н·м, тобто розмах становить 18,2 Н·м, тоді як момент привода сталий і дорівнює 2,274 Н·м із пульсацією нижче за чисельну роздільність розрахунку. Увесь розмах поглинає інерція системи, а контур струму працює у квазістаціонарному режимі.

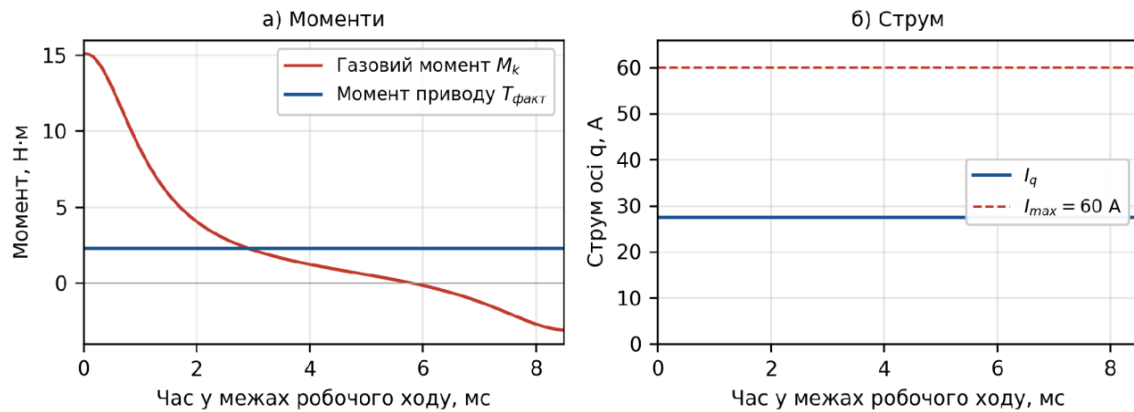


**Рис. 1. Газовий момент і момент, який віддає привод (а);
струм осі q у межах одного усталеного ходу (б)**
Джерело: розроблено авторами

Допустимий об'єм камери визначено послідовним збільшенням робочого об'єму однієї камери ssv, аж до втрати синхронізації. Піковий струм зростає прямо пропорційно об'єму, а синхронізація руйнується щойно потрібний середній момент наближається до максимального моменту приводу. Допустимий об'єм камери, отже, становить 8,7 см³ за згоряння і 125 см³ на стисненому повітрі для того самого приводу. Механізм повністю пояснює середній момент на одиницю об'єму – 0,568 проти 0,040 Н·м/см³, тобто відношення 14,2, що збігається з відношенням допустимих об'ємів. Режим на стисненому повітрі є перспективним варіантом для першого лабораторного стенда: він переводить геометрію від діаметра корпусу близько 40 мм до близько 125 мм за тієї самої апаратури.

Рис. 2а показує ці залежності для обох робочих середовищ: обидві криві круто підіймаються до апаратної межі 60 А, і саме точка її досягнення задає допустимий масштаб. Смугу пропускання контуру струму змінювали в межах чотирьох декад (Рис. 2б). Від 20 до 30000 рад/с залишкове зміщення лишається в межах 1,16...1,24°, а піковий струм – у межах 0,02 А. Погіршення з'являється лише нижче за 10 рад/с. Це узгоджується зі структурою: оскільки завдання стає в межах ходу, від контуру струму ніколи не вимагають відстежувати швидкий перехідний процес.

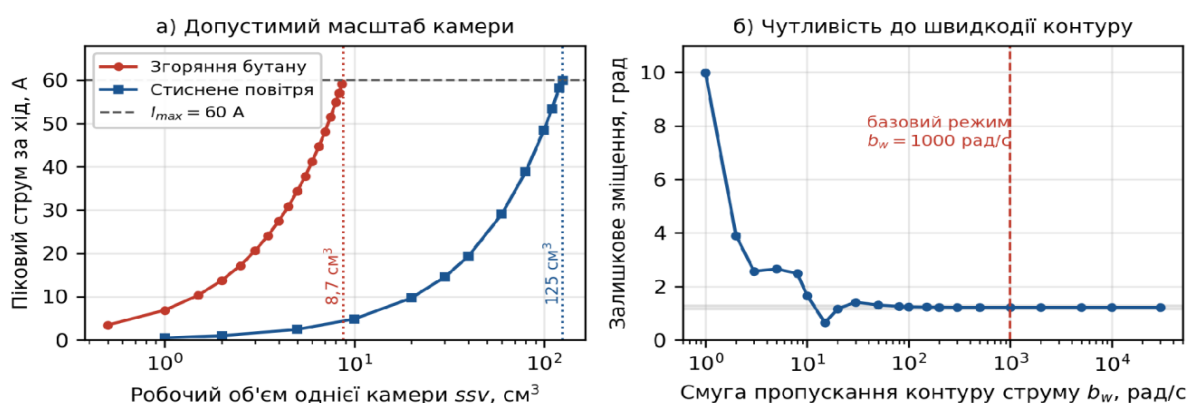


**Рис. 2. Піковий струм за хід залежно від об'єму камери для двох середовищ (а);
залишкове зміщення бісектриси залежно від смуги пропускання контуру струму(б)**
Джерело: розроблено авторами

Втрата маси робочого тіла λ послаблює газовий імпульс і монотонно зменшує навантаження на привод (Таблиця 1). Для етапу експериментальної перевірки це послаблює вимоги до приводу, хоча в машині, що виробляє потужність, знижувало б ККД.

Таблиця 1. Вплив втрати маси робочого тіла

$\lambda, \%$	Базовий момент, Н·м	Піковий газ. момент, Н·м	Піковий струм, А	Зміщення, град
0	3,042	18,90	36,80	1,396
10	2,658	16,99	32,15	1,315
20	2,273	15,08	27,50	1,217
30	1,889	13,17	22,85	1,103
40	1,505	11,25	18,20	0,960
50	1,120	9,34	13,55	0,785

Джерело: розроблено авторами

Симулятор реалізовано засобами HTML, CSS і JavaScript; побудову інтерактивних графіків забезпечує Chart.js. Інтерфейс дає змогу змінювати параметри камери й газового циклу, R , L , K_t , $I_{\max}$, V_{bus} , b_w , коефіцієнт корекції, крок інтегрування та кількість ходів. Доступні вибір пресетів, ручне введення, табличне подання результатів, перебір параметра та експорт результатів перебору у форматі CSV. Структуру взаємодії підсистем наведено на Рис. 3.

На Рис. 3 показано структуру взаємодії чотирьох частин моделі. Верхній лівий блок є алгоритмом синхронізації: на його вхід надходять зміщення бісектриси δ та зміна кінетичної енергії ΔE_k , а на виході формується заданий момент M^* . Верхній правий блок описує два контури струму з ПІ-регуляторами та обмеженнями за напругою V і струмом I ; результатом є моменти приводів M_1 і M_2 . Нижній правий блок є механічною моделлю двох валів, у якій розраховуються кути θ_1 , θ_2 та кутові швидкості ω_1 , ω_2 . Нижній лівий блок описує модель камер: кути камер перетворюються на тиски, а різниця тисків формує газовий момент M_g . Горизонтальні стрілки між механікою та моделлю камер показують взаємний обмін кутами, тисками й моментами. Вертикальна стрілка передає від контурів струму електромагнітний вплив на механіку, а пунктирною стрілкою показано повернення інформації про стан системи до алгоритму синхронізації для наступного коригування M^* .

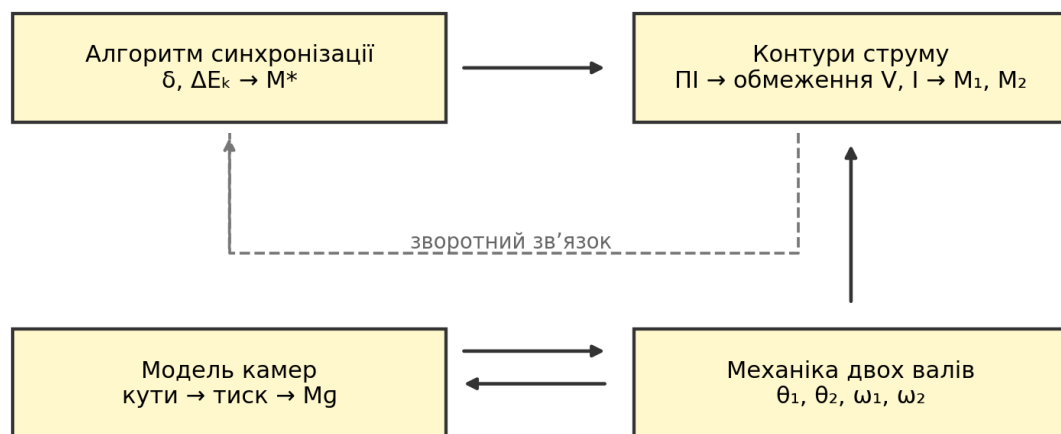


Рис. 3. Структура моделі та алгоритму синхронізації РЛДВЗ за фізичних обмежень сервоприводів

Джерело: розроблено авторами

На Рис. 4 інтерфейс поділено на панелі налаштування зліва та результати розрахунку справа. У верхній лівій панелі «Пресет двигуна» вибирають готову електричну машину або режим власних параметрів; нижче відображаються стала моменту K_b , опір R , індуктивність L ,

максимальний струм I_{max} , напруга шини V_{bus} і смуга пропускання b_v . Панель «Пресет контролера» задає режим роботи регулятора; у показаному варіанті обмеження контролера вимкнено, тому результат є контрольним для ідеального джерела моменту.

У панелі «Двигун внутрішнього згоряння» вводяться об'єм камери, ступінь стиснення, приріст температури, теплові втрати та кутовий розмір лопаті. Панель «Розрахунок» містить крок інтегрування, кількість тактів, коефіцієнт корекції, частку відбору енергії, прапорець анімації та кнопки запуску розрахунку і перебору параметра. У правій частині спочатку показано повідомлення про досягнення синхронізму, далі картки із запасом моменту Δ , часовим показником Π , середнім газовим моментом, тривалістю такту, обертами, роботою циклу, потужністю та моментом інерції. Нижче вкладка результатів містить графік тривалості такту за номерами тактів і таблицю з тривалістю, зміщенням, піковим струмом, піковою напругою та середньою швидкістю.

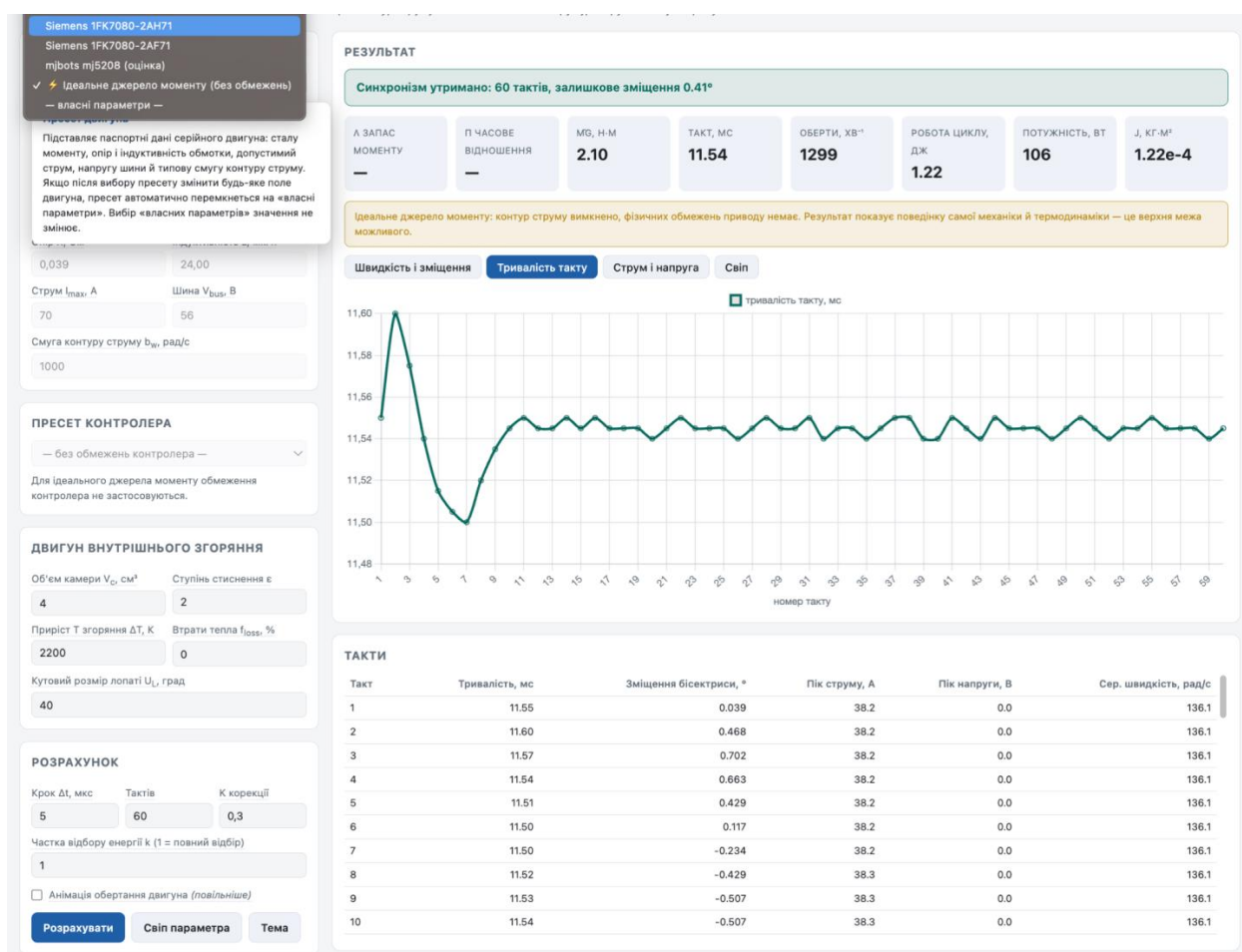


Рис. 4. Програмний інтерфейс браузерного застосунку для моделювання синхронізації РЛДВЗ за фізичних обмежень сервоприводів

Джерело: розроблено авторами

На Рис. 5 зліва показано параметри конкретного привода ODrive D5065 270KV: сталу моменту K_t , опір R , індуктивність L , максимальний струм I_{max} , напругу шини V_{bus} і смугу пропускання струмового контуру b_v . Окрема панель пресету контролера показує, який режим обмежень використано. У блоці «Двигун внутрішнього згоряння» задано параметри робочого тіла та геометрії камер, а в блоці «Розрахунок» – крок, кількість тактів, коефіцієнт корекції, частку відбору енергії та анімацію. У верхній правій частині червоне повідомлення фіксує втрату синхронізму й номер такту, на якому лопаті зімкнулися; жовте пояснення вказує на перевищення межі струму та насичення напруги. Ряд карток під повідомленням містить Δ , Π , середній газовий момент, тривалість такту, оберти, роботу циклу, потужність і момент інерції. На вкладці «Струм і напруга» показано два графіки за тактами: піковий

струм на лівій шкалі та пікова напруга на правій. Нижній блок «Анімація обертання» відтворює положення валів і камер, показує номер такту, час, розбіжність та тиск, а також містить кнопки запуску, повернення на початок і повзунки швидкості та позиції. Панель «Свіп» унизу задає параметр, діапазон і кількість точок для дослідження його впливу на результат.

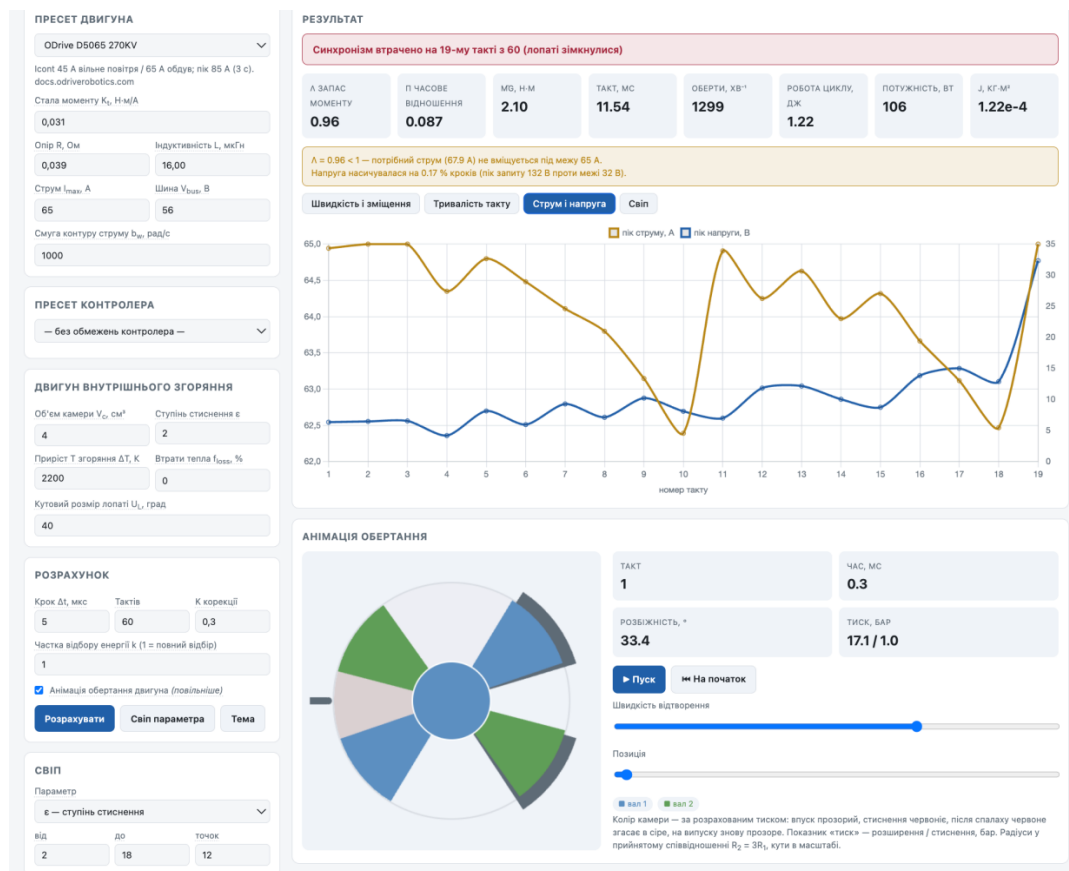


Рис. 5. Результати розрахунку та діаграми струму і напруги у програмному інтерфейсі браузерного застосунку для моделювання синхронізації РЛДВЗ за фізичних обмежень сервоприводів
Джерело: розроблено авторами

Висновки. Розроблено зв'язану комп'ютерну модель синхронізації валів роторно-лопатевого двигуна, у якій керувальні електричні машини описано не як ідеальні джерела моменту, а через динаміку струму з урахуванням опору та індуктивності обмоток, проти-ЕРС, обмежень за струмом і напругою та обмеженої смуги пропускання контуру струму. Це дало змогу перейти від ідеалізованого механічного керування моментом до фізично коректної електромеханічної моделі, придатної для попереднього оцінювання реальної апаратури.

Установлено, що в межах розглянутих конфігурацій допустимий масштаб двигуна визначає насамперед запас за моментом привода — відношення максимального моменту, який привод здатен віддати, до середнього газового моменту циклу. Синхронізація втрачається в околі одиничного запасу, причому той самий критерій описує межу для двох робочих середовищ, допустимі об'єми камери для яких різняться більш ніж на порядок. Тому режим на стисненому повітрі є перспективним варіантом для першого лабораторного стенда: він дозволяє перейти до помітно більшої геометрії за тієї самої апаратури.

Показано, що в дослідженому діапазоні смуга пропускання контуру струму не впливає на якість синхронізації. Це впливає зі структури закону керування, який формує одне стале завдання моменту на кожен робочий хід: коливання газового моменту в межах ходу поглинає інерція системи, а контур струму працює у квазістаціонарному режимі.

Втрата маси робочого тіла крізь ущільнення лопатей послаблює газовий імпульс і знижує піковий струм привода, тому на етапі експериментальної перевірки алгоритму вона діє як сприятливий чинник, хоча в машині, що виробляє потужність, знижувала б ККД. Запропонований симулятор може слугувати інструментом попереднього добору апаратури та оцінювання параметрів роторно-лопатевих двигунів з електромагнітною синхронізацією валів до фізичного прототипування.

Конфлікт інтересів: Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису

Використання засобів штучного інтелекту: Під час підготовки рукопису використовувався інструмент штучного інтелекту (ШІ) Opus 5 для граматичної та стилістичної перевірки тексту. Усі фрагменти, опрацьовані за його допомогою, були перевірені й відредаговані автором. ШІ не використовувався для генерації тексту, формул і таблиць, формування наукових положень, отримання результатів або формулювання висновків. Наукові положення, результати та висновки є власним інтелектуальним внеском авторів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Galin, A., Galin, O., Galin, N. & Galin, V. “Electromagnetic only vane coordination of a cat and mouse engine”. *US Patent No. 10,472,965 B2. IPC F01C 1/063; F01C 20/08; F04C 2/063; F04C 23/02. Filed 17.06.2016, granted 12.11.2019.* – Available from: <https://imageppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/10472965>.
2. Sakita, M. “A Cat-and-Mouse type rotary engine: engine design and performance evaluation”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2006; 220 (8): 1139–1151. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO223>.
3. Tucker, R. W., Wang, C. & Librovich, B. V. “Mathematical modelling of rotary vane engines”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2003; 217 (6): 687–704. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440603321919608>.
4. Ushenko, Y. O., Uhryn, D. I., Karachevtsev, A. O., Halin, Y. O. & Ilin, V. A. “Method for automated control of rotor engine blade synchronization”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2025; 8 (3): 334–347. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.22>.
5. Kim, Y.-J., Yoon, A.-S. & Lee, C.-E. “Validation of CFD analysis on flow and combustion characteristics for a GP3 rotary engine”. *Energies*. 2025; 18 (4): 758. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18040758>.
6. Boldea, I. & Nasar, S. A. “Electric Drives”. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315368573>.
7. Sul, S.-K. “Control of Electric Machine Drive Systems”. Hoboken: Wiley-IEEE Press. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470876541>.
8. Xu, Y., Li, S. & Zou, J. “Integral sliding mode control based deadbeat predictive current control for PMSM drives with disturbance rejection”. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2022; 37 (3): 2845–2856. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3115875>.
9. Wang, S., Chen, Y. & Zhang, G. “Adaptive fuzzy PID cross coupled control for multi-axis motion system based on sliding mode disturbance observation”. *Science Progress*. 2021; 104 (2). DOI: [10.1177/00368504211011847](https://doi.org/10.1177/00368504211011847).
10. Zhang, X., Xu, W. & Wang, J. “Overview of position synchronous control technology for multi-motor system” *Systems Science & Control Engineering*. 2024; 12 (1): 2427074. DOI: [10.1080/21642583.2024.2427074](https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2427074).

Отримано 27.08.2026

Отримано після перегляду 24.09.2026

Прийнято 05.10.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.81>

UDC 004.94

Computer model of rotary-vane engine shaft synchronization under physical electric-drive constraints

Yurii O. Halin¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-9896>; halin.yurii@chnu.edu.ua

Serhii F. Shevchuk²⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4579-6483>; s.shevchuk@kitu.nau.edu.ua

Mykola M. Blyzniuk³⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-4118>; Blyzniuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57221091774

¹⁾ Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kotsyubynsky 2 Str. Chernivtsi, 58002, Ukraine

²⁾ Vocational College «KAI TECH» of National University “Kyiv Aviation Institute”, 5-A, Metrobudivska Str. Kyiv, 03065, Ukraine

³⁾ Poltava V.G. Korolenko National Pedagogical University, 2, Ostrogradski St. Poltava, 36000, Ukraine

ABSTRACT

A coupled computational model of shaft synchronization for a rotary-vane internal combustion engine is developed that accounts for the electrical constraints of the control machines. Existing models of such engines treat the electric machines as ideal torque sources capable of producing any required torque instantly and without limits, so they cannot show whether real hardware is able to maintain synchronization. The proposed model combines the mechanical dynamics of two shafts, the variable gas torque of the working chambers, the loss of working-fluid mass past the vane seals, and a physically constrained electric drive based on a permanent magnet synchronous motor under field-oriented control. The actuating machines are treated as drives whose torque is formed through winding current dynamics and is bounded by the current and voltage available from the hardware and by the back electromotive force, which grows with rotational speed. Above the electrical level, a synchronization algorithm updates the commanded mean torque after every working stroke from the change in the kinetic energy of the shafts. The model is implemented as a browser-based simulator. Numerical experiments show that the admissible engine scale is governed primarily by the torque reserve of the drive, that is, the ratio of the maximum torque the drive can deliver to the mean gas torque of the cycle. Synchronization is lost as this reserve approaches unity. The same criterion describes the boundary for two working media: with the same drive, the admissible chamber volume for compressed air exceeds that for combustion by more than an order of magnitude, and this difference is fully explained by the ratio of the mean gas torque per unit chamber volume. The compressed-air regime is proposed as the basis for the first laboratory test bench, because it allows a considerably larger engine geometry with the same hardware.

Keywords: computer simulation; rotary-vane engine; shaft synchronization; electromagnetic synchronization; field-oriented control; permanent magnet synchronous motor; electric drive constraints; torque reserve, current control loop; gas torque

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ



Галін Юрій Олександрович - аспірант кафедри Комп'ютерних наук. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Коцюбинського, 2. Чернівці, 58002, Україна

Галузь досліджень: програмна інженерія

Yurii O. Halin - PhD student, Computer Science Department. Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynsky Str. Chernivtsi, 58002, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-9896>; halin.yurii@chnu.edu.ua

Research field: software engineering



Шевчук Сергій Федорович - канд. техн. наук, доцент. Фаховий коледж «KAI TECH» Національного університету «Київський авіаційний інститут». Київ, Україна

Галузь досліджень: програмна інженерія

Serhii F. Shevchuk - Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor. Vocational College «KAI TECH» of National University «Kyiv Aviation Institute», 5-A, Metrobudivska Str. Kyiv, 03065, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4579-6483>; s.shevchuk@kitu.nau.edu.ua

Research field: technical sciences



Близнюк Микола Миколайович - доктор пед. наук, професор кафедри Професійної освіти та дизайну. Полтавський національний педагогічний університет імені В. Г. Короленка, Остроградського, 2. Полтава, 36000, Україна

Галузь досліджень: професійна освіта

Mykola M. Blyzniuk - Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Department of Professional Education and Design. Poltava V.G. Korolenko National Pedagogical University, 2, Ostrogradski St. Poltava, 36000, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-4118>; Blyzniuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57221091774

Research field: vocational education