
ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.61: 621.165.2

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО ПУСКУ ТУРБОМАШИНИ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ І ВІБРАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Старш. викл. О. О. Сторчак, д-р техн. наук О. М. Мельник

OPTIMIZATION OF TURBOMACHINERY CONTROLLED START-UP CONCERNING THERMAL AND VIBRATION CONSTRAINTS

Sen. Lecturer O. O. Storchak, Dr. Sc. (Tech.) O. M. Melnyk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341949>



Анотація. У статті запропоновано математичну модель оптимізації контрольованого запуску турбомашини, що враховує комплекс обмежень, пов'язаних із фізико-механічними характеристиками системи – тепловими деформаціями, вібраційною нестабільністю і резонансними явищами. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення швидкого та надійного пуску турбін в умовах обмеженого ресурсу, підвищених вимог до безпеки та енергетичної ефективності, особливо в морському і стаціонарному промисловому середовищі. Основна мета полягає в мінімізації тривалості пуску без перевищення критичних температурних і вібраційних меж, що впливають на залишковий ресурс роторної системи. Модель базована на побудові функціонала ризику, який агрегує три основні показники: амплітуду вібрацій, тепловий прогин ротора і тривалість перебування в зоні резонансу. Для гарантії дотримання граничних технічних умов у функціонал впроваджено систему штрафних коефіцієнтів. Як керовану змінну використовують профіль кутової швидкості обертання ротора, поданий у вигляді частинної кусочно-лінійної або квадратичної функції, що моделює фази прогріву, обходу резонансних частот і стабілізації на номінальному режимі. Для розв'язання задачі оптимізації застосовано гібридний алгоритм, що поєднує еволюційний пошук із градієнтною локалізацією в околі знайдених екстремумів. Проведено чисельне моделювання для типових параметрів турбомашин, що демонструє ефективність запропонованого підходу: час запуску зменшено з одночасним дотриманням обмежень за температурним градієнтом і вібраційним навантаженням. Отримані результати можуть бути інтегровані в системи керування запуском турбін (PLC/SCADA) і бути використаними як основа для створення адаптивного пускового модуля з автоматичним корегуванням параметрів залежно від технічного стану агрегату.

Ключові слова: морський транспорт, суднове обладнання, машини та механізми, експлуатація технічних систем, керований запуск, турбомашини, тепловий прогин ротора, резонансні частоти, функція ризику, температурний градієнт, вібраційне навантаження, адаптивне керування, технічний стан.

Abstract. The paper proposes a mathematical model for optimizing the controlled startup of a turbomachinery, which takes into account a set of constraints related to the physical and mechanical characteristics of the system, such as thermal deformations, vibration instability, and resonance phenomena. The relevance of the study is stipulated by the need to ensure fast and reliable startup of turbines in conditions of limited resources, increased requirements for safety and energy efficiency,

especially in the marine and stationary industrial environment. The main goal is to minimize the startup time without exceeding critical temperature and vibration limits that affect the residual life of the rotor system. The model is based on the construction of a risk functional that aggregates three key indicators: vibration amplitude, rotor thermal deflection, and duration of stay in the resonance zone. To guarantee compliance with the boundary technical conditions, a system of penalty coefficients is introduced into the functional. The rotor angular velocity profile is used as a controlled variable, represented as a partial piecewise linear or quadratic function that models the phases of warm-up, bypassing resonant frequencies, and stabilization at the rated mode. To solve the optimization problem, a hybrid algorithm combining evolutionary search with gradient localization in the vicinity of the found extremes is applied. Numerical simulations were performed for typical turbomachinery parameters, which demonstrates the effectiveness of the proposed approach: the startup time was reduced to 20-25 %, while simultaneously meeting the temperature gradient and vibration load constraints. The results obtained can be integrated into turbine startup control systems (PLC/SCADA) and used as a basis for creating an adaptive startup module with automatic adjustment of parameters depending on the technical condition of the unit.

Keywords: maritime transport, ship equipment, machines and mechanisms, operation of technical systems, controlled startup, turbomachinery, rotor thermal deflection, resonant frequencies, risk function, temperature gradient, vibration load, adaptive control, technical condition.

Вступ. Надійність і безпека експлуатації енергетичних турбомашин значною мірою залежать від режиму їх пуску. Особливо критичними є перехідні стани, пов'язані з термічним навантаженням, резонансними коливаннями та виникненням теплового прогину ротора. У сучасних умовах інтенсифікації енергетичних процесів і зростання вимог щодо швидкодії агрегатів актуальним є завдання скорочення тривалості пуску без погіршення технічного стану машини. Контрольований пуск має враховувати складну взаємодію динамічних, теплових і деформаційних параметрів і ґрунтуватися на точних математичних моделях, що дають змогу мінімізувати ризики виходу за допустимі межі.

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що в разі надто швидкого прогріву можуть виникати термічні напруження, які призводять до нерівномірного розширення компонентів і появи теплового прогину ротора. Крім того, із проходженням через резонансні оберти є ризик надмірного зростання вібрацій, що значно скорочує ресурс підшипникових вузлів. Традиційні пускові алгоритми базовані на фіксованих емпіричних

інтервалах і не враховують поточний технічний стан машини. Це обмежує ефективність управління і створює передумови для пошкоджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика безпечного та оптимізованого пуску турбомашин є однією з основних у сучасній енергетичній інженерії, де поєднано питання теплової динаміки, механіки оберткових систем і системного керування. Наукові джерела засвідчують активне зростання інтересу до розроблення математичних моделей і алгоритмів, здатних урахувати множинні обмеження пускового процесу. Так, у роботах [1, 3] розглянуто контроль пуску в надкритичних CO₂-циклах, де висвітлено труднощі, пов'язані з управлінням тепловим навантаженням під час розгону установки. Автори впроваджують адаптивні алгоритми, які корегують траєкторію запуску залежно від температурного стану обладнання. Публікації [4, 6] досліджують поведінку оберткових систем з проходженням резонансних зон, де важливу роль відіграють модальні властивості системи і амплітудно-частотні характеристики. Уперше показано значення

активного демпфування за стартових режимів. Водночас автори досліджень [7, 9] підкреслюють, що системи теплового керування під час запуску агрегатів потребують особливого контролю температурних градієнтів, адже нерівномірне прогрівання може призводити до викривлень ротора і фатальних дисбалансів. Інженерні аспекти виробництва та модернізації турбомашин для витримування теплових циклів описані в роботі [5], де наголошено на необхідності дотримання високотехнологічних стандартів матеріальної стійкості до температурного навантаження. Деякі роботи [8, 10], сфокусовані на взаємодії температурного та газодинамічного полів, а також підвищенні запасу стабільності з запуском компресорів і турбонагнітачів.

Тематика експлуатаційної надійності та екологічної ефективності двигунів, хоча і дотична, демонструє важливість інтегрованих стратегій. Наприклад, у роботах [11, 12] проаналізовано вплив запуску на рівень викидів у суднових двигунах, а також необхідність обмеження пікових режимів роботи.

Нарешті, дослідження [13, 14], хоч і сфокусовані на суміжних інфраструктурних системах, наголошують на необхідності адаптивних моделей прогнозування навантаження з урахуванням температурного фону та режимів обертання.

Попри широкий спектр досліджень, залишається відкритим питання створення єдиної математичної моделі контрольованого запуску, яка б узгоджено враховувала:

- граничні значення температурного градієнта;
- критичні резонансні зони;
- умови формування теплового прогину ротора;
- етапність пуску з фазовим прогрівом;
- часові обмеження для досягнення робочого режиму.

Саме такі компоненти лягли в основу запропонованої у статті моделі оптимізованого пуску турбомашини.

Метою статті є побудова математичної моделі контрольованого пуску турбомашини з урахуванням впливу температурних градієнтів, теплового прогину ротора, ризику проходження резонансних режимів, а також залишкового ресурсу. Передбачено формалізацію обмежень у вигляді умов на похідні та граничні значення параметрів, а також розроблення алгоритмічного підходу для оптимізації профілю прискорення з метою мінімізації часу пуску за збереженням технічної безпеки.

Основна частина дослідження

1. Фізична природа обмежень під час запуску турбомашини

Запуск турбомашини – це динамічний процес, що супроводжується одночасним зростанням температури, обертів і механічних навантажень. Основними обмежувальними чинниками в цьому випадку є:

- теплові напруження (σ_{th}), що виникають через нерівномірне нагрівання корпусу та ротора, можуть призвести до викривлення геометрії та появи теплового прогину ротора (Δ_{th});
- резонансні частоти (f_r), за яких амплітуда вібрацій значно зростає. Проходження цих частот має бути швидким, але контрольованим, аби уникнути перевищення граничної вібрації;
- пружно-пластичні межі елементів підшипникових вузлів, які обмежують допустимі механічні деформації (ε_{max}).

Процедура запуску, яка не враховує ці обмеження, може спричинити передчасну деградацію вузлів, зниження залишкового ресурсу і навіть аварійне відключення.

Для формалізації динаміки технічного стану турбомашини в періоді пуску розглядають ряд фізично обґрунтованих змінних, які суттєво впливають на процеси зносу та потенційного пошкодження роторної системи:

- $T(t)$ – температура ротора в момент часу t , яка визначає тепловий стан і розширення матеріалу;

- $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання ротора, що контролює динамічні навантаження;

- $\Delta_{th}(t)$ – тепловий прогин ротора, зумовлений нерівномірним розподілом температури;

- $A_{vib}(t)$ – амплітуда вібрацій у момент часу t , яка є головним показником механічної стабільності;

- τ_r – тривалість перебування системи в зоні резонансних частот, яка визначає ризик пошкоджень через вібраційне підсилення;

- t_{run-up} – загальний час пуску агрегату, що слугує базовим інтервалом аналізу.

Наведені змінні формують вектор стану роторної системи в періодах найбільшої чутливості, зокрема під час запуску, коли механічні та теплові навантаження є найінтенсивнішими. У подальшому ці параметри використовують в аналітичному описі функції деградації та прогнозування залишкового ресурсу.

2. Обмеження

2.1. Допустимий температурний градієнт

$$\left| \frac{dT}{dr} \right| \leq \left(\frac{dT}{dr} \right)_{\max}. \quad (1)$$

$$\omega(t_{run-up}) = \omega_{nom}, \quad \left| \frac{dT}{dr} \right|_{t_{run-up}} \leq \delta, \quad A_{vib}(t_{run-up}) < A_{доп}.$$

Отже, побудову керованого пуску зведено до задачі оптимізації траєкторії $\omega(t)$ із забезпеченням системи обмежень і граничних умов.

3. Методологія побудови моделі оптимального запуску турбомашини

У цьому пункті сформульовано математичну модель оптимізації керованого запуску турбомашини, яка враховує критичні термодинамічні та механічні чинники, що

Ця нерівність гарантує, що температурне поле не спричинить різких розширень, здатних викликати прогин.

2.2. Обмеження на прогин ротора $\Delta_{th}(t) \leq \Delta_{кр}$, де $\Delta_{кр}$ – критичне допустиме відхилення осі ротора.

2.3. Час перебування в зоні резонансу

$$\tau_r = \int_{t_1}^{t_2} \chi[f_r = f_t, f(t)] dt \leq \tau_{\max}, \quad (2)$$

де χ – характеристична функція потрапляння частоти в резонансну зону.

2.4. Обмеження на прискорення

$$\frac{d\omega}{dt} \leq a_{\max}, \quad \text{але} \quad \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \text{в зоні } f_r.$$

Таку умову вводять для обмеження механічного навантаження та уникнення зупинок у критичному діапазоні частот.

2.5. Постановка граничних умов пуску. Для математичного опису процесу введемо функцію керування профілем пуску: $\omega(t) : [0, t_{run-up}] \rightarrow [0, \omega_{nom}]$.

Граничні умови:

- початкова умова:

$$\omega(0) = 0, \quad T(0) = T_{env}, \quad \Delta_{th}(0) = 0;$$

- кінцева умова:

впливають на надійність і довговічність роторної системи. Мета моделі – забезпечити безпечне проходження резонансних зон, уникнення надмірного теплового прогину та мінімізацію вібраційних навантажень через визначення оптимального закону зміни кутової швидкості $\omega(t)$ у проміжку часу запуску $t \in [0, t_{run-up}]$.

3.1. Критерій оптимальності. Оптимальний запуск визначено як такий, що мінімізує зведену функцію ризику деградації системи:

$$J = \int_0^{t_{\text{run-up}}} \left[w_1 \cdot \left(\frac{A_{\text{vib}}(t)}{A_{\text{кр}}} \right)^2 + w_2 \cdot \left(\frac{\Delta_{\text{th}}(t)}{\Delta_{\text{кр}}} \right)^2 + w_3 \cdot \chi_{\text{res}}(t) \right] dt, \quad (3)$$

де $w_1, w_2, w_3 \in R^+$ – вагові коефіцієнти ризику (вібрації, прогину, резонансу);

$A_{\text{кр}}, \Delta_{\text{кр}}$ – допустимі порогові значення вібрацій і прогину;

$\chi_{\text{res}}(t)$ – характеристична функція, що дорівнює 1 з потраплянням $\omega(t)$ у резонансні частоти Ω_{res} і 0 – поза ними.

3.2. Обмеження. Модель передбачає фізичні та експлуатаційні обмеження:

- тепловий прогин ротора:

$$\Delta_{\text{th}}(t) = k_{\Delta T} \cdot [T_{\text{верх}}(t) - T_{\text{низ}}(t)] \leq \Delta_{\text{кр}};$$

- максимальна амплітуда вібрацій:

$$A_{\text{vib}}(t) \leq A_{\text{кр}};$$

- резонансні зони:

$$\omega(t) \notin [\omega_i - T_i, \omega_i + T_i], \quad i = 1, \dots, n,$$

де ω_i – резонансні частоти, ϵ_i – захисна зона навколо кожної з них;

- часові обмеження запуску:

$$0 < t_{\text{run-up}} \leq t_{\text{max}}.$$

3.3. Постановка задачі оптимального запуску. Процес запуску турбомашини розглянуто як керований перехід динамічної системи з початкового стану спокою ($\omega = 0$, $T = T_{\text{env}}$) до стабільного номінального режиму ($\omega = \omega_{\text{ном}}$, $T = T_{\text{stab}}$) за найкоротший допустимий час. Метою є мінімізація часу запуску $t_{\text{run-up}}$ з дотриманням обмежень технічної безпеки $\min J = t_{\text{run-up}}$ за умов

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{dT}{dr}(t) \right| \leq G_{\text{max}} \quad (\text{градієнт температури}) \\ \Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}} \quad (\text{тепловий прогин}) \\ \tau_r \leq \tau_{\text{доп}} \quad (\text{час перебування в зоні резонансу}) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \leq a_{\text{max}} \quad (\text{максимальне прискорення}) \\ T(t) \leq T_{\text{доп}} \quad (\text{гранична температура}) \end{array} \right. \quad (4)$$

3.4. Керована змінна: профіль розгону. Оптимізація здійснюється відносно функції керування – кутової швидкості обертання

ротора $\omega(t)$, яку розглядають як частинну кусочно-лінійну функцію

$$\omega(t) = \begin{cases} a_1 t, & 0 \leq t < t_1 \\ \omega(t_1) + a_2(t - t_1), & t_1 \leq t < t_2 \\ \omega(t_2) + a_3(t - t_2), & t_2 \leq t \leq t_{\text{run-up}} \end{cases}, \quad (5)$$

де $a_1, a_3 \ll a_2$ – темпи обертання на фазах прогріву і стабілізації;

t_1, t_2 – моменти входу і виходу з резонансної частоти.

3.5. Температурна модель і тепловий прогин. Температурний розподіл уздовж радіуса ротора моделюють експоненціально:

$$T(r, t) = T_{\text{env}} + \theta(t) \cdot (1 - e^{-kr}), \quad (6)$$

де $\theta(t)$ – приріст температури в часі;
 k – параметр теплообміну.

Відповідно градієнт

$$\frac{dT}{dr} = \theta(t) \cdot k \cdot e^{-kr}. \quad (7)$$

Тепловий прогин ротора наближено розраховують за виразом

$$\Delta_{\text{th}}(t) = \beta \cdot \left| \frac{dT}{dr} \right| \cdot L^2, \quad (8)$$

де β – конструктивний коефіцієнт чутливості до вигину;

L – довжина ротора.

Середній градієнт обчислюють за характерним радіальним профілем.

3.6. Вібраційні обмеження та резонанс. Резонансну частоту визначають за класичною формулою

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_r = 2\pi f_r. \quad (9)$$

Час перебування в зоні резонансу обчислюють як

$$\tau_r = \int_{t_1}^{t_2} \chi_{[\omega_r - \tau, \omega_r + \tau]}(\omega(t)) dt, \quad (10)$$

де χ – характеристична функція, що визначає перебування в забороненій зоні.

3.7. Функціонал оптимізації. Задача зведена до оптимізації параметрів профілю

$$\min_{a_1, a_2, a_3, t_1, t_2} J = t_{\text{run-up}} \quad (11)$$

за таких умов:

- темп прогріву: $\theta'(t) \leq \theta_{\text{max}}'$;

- градієнт температури:

$dT/dr(t) \leq G_{\text{max}}$;

- амплітуда вібрацій: $A(t) \leq A_{\text{доп}}$;

- тепловий прогин: $\Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}}$.

4. Алгоритм оптимізації запуску та чисельне моделювання

У цій частині дослідження реалізують практичне застосування математичної моделі оптимального запуску турбомашини, що була сформульована в попередньому пункті. Мета полягає в чисельній реалізації задачі мінімізації часу запуску за дотриманням комплексу технічних і фізичних обмежень, таких як температурні градієнти, тепловий прогин, допустимі вібрації, обмеження за часом перебування в зоні резонансної частоти.

4.1. Вибір підходу до оптимізації. Зважаючи на складність і багатофакторність задачі, а також наявність жорстких обмежень, включно з неаналітичними функціями (наприклад характеристичні функції перебування в резонансній зоні), було вибрано гібридну стратегію оптимізації. Вона включає:

- генетичний алгоритм (GA) – для глобального пошуку в багатовимірному просторі керування;

- градієнтний локальний спуск (LS) – для уточнення знайденого розв'язку;

- дискретизований часовий інтервал із кроком Δt – для наближеного обчислення інтегралів, похідних і температурних функцій.

4.2. Кодування параметрів профілю. Керовану змінну – профіль кутової швидкості $\omega(t)$ – визначають як частинну кусочно-лінійну функцію, параметризовану п'ятьма змінними:

$$x = [a_1, a_2, a_3, t_1, t_2], \quad (12)$$

де $a_1, a_3 \in [a_{\min}, a_{\text{сер}}]$ – темпи прогріву і стабілізації;

$a_2 \in [a_{\text{сер}}, a_{\max}]$ – темп розгону в зоні резонансу;

$t_1, t_2 \in [0, t_{\max}]$, причому $t_1 < t_2$ – часові межі зони резонансу.

4.3. Структура алгоритму. Процедуру оптимізації реалізують у вигляді послідовного обчислювального процесу.

Етап 1. Ініціалізація популяції $\{x_i\}_{i=1}^{N_{i=1}}$ випадковими допустимими векторами.

Етап 2. Для кожного кандидата виконують:

- обчислення профілю кутової швидкості $\omega(t)$;
- розрахунок температурного поля, градієнта температури, теплового прогину та часу перебування в зоні резонансу за виразами (6)-(10);
- розрахунок штрафу за перевищення технічних меж:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \max(0, c_i(\mathbf{x}) - c_{i,\text{доп}})^2. \quad (13)$$

Тоді цільова функція оптимізації з урахуванням штрафу

$$J_{\text{mod}}(\mathbf{x}) = t_{\text{run-up}} + \lambda \cdot P(\mathbf{x}). \quad (14)$$

Етап 3. Виконання операторів селекції, кросовера та мутації.

Етап 4. Перехід до локального уточнення після досягнення стабілізації (зміна функції $< 0.1\%$ за 50 поколінь).

Етап 5. Локальна оптимізація в околі найкращого розв'язку (градієнтний метод).

Для реалізації запропонованої математичної моделі застосовано гібридний підхід, який поєднує генетичні алгоритми з локальною градієнтною оптимізацією, що дає змогу ефективно шукати глобальний екстремум у складному багатовимірному просторі допустимих траєкторій кутової швидкості $\omega(t)$.

На рис. 1 подано структурну блок-схему етапів обчислювального процесу.

Послідовність включає ініціалізацію популяції кандидатів, розрахунок функцій температури, теплового прогину, вібраційного навантаження, а також штрафної функції за порушення обмежень. Після генетичної еволюції рішення уточнюють локальним методом.

Побудований у такий спосіб алгоритм дає змогу формувати профіль розгону, що забезпечує швидкий запуск без перевищення критичних термовібраційних обмежень, зберігаючи залишковий ресурс агрегату. Надалі отриманий результат може бути використаний як основа для реалізації в системах автоматизованого керування запуском.

4.4. Обмеження як штрафні функції. Контрольні параметри обмежень:

- градієнт температури $|dT/dr| \leq G_{\max}$;
- тепловий прогин $\Delta_{\text{th}}(t) \leq \Delta_{\text{кр}}$;
- амплітуда вібрацій $A(t) \leq A_{\text{доп}}$;
- тривалість перебування в резонансній зоні $\tau_r \leq \tau_{\text{доп}}$.

Наведені обмеження об'єднують у загальну штрафну функцію, яка адитивно модифікує функціонал запуску.

У таблиці подано вихідні значення параметрів.

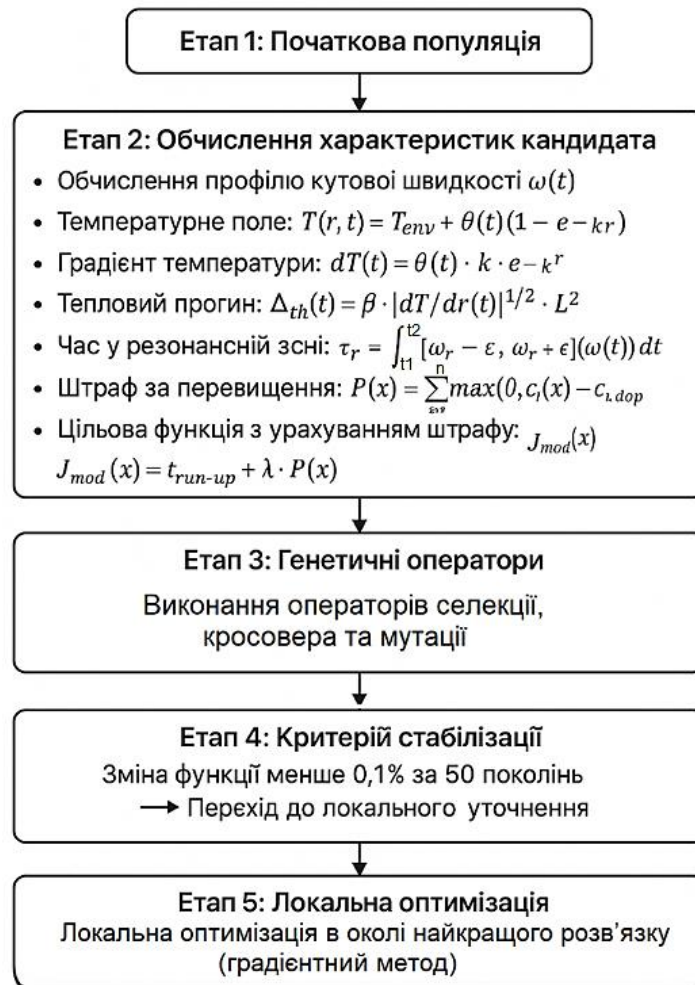


Рис. 1. Алгоритм гібридної оптимізації запуску турбомашини

Таблиця

Вихідні значення параметрів моделі

Параметр	Значення
Максимальний час запуску $t_{\max}$	300 с
Крок дискретизації Δt	0.2 с
Амплітуда вібрацій $A_{\text{доп}}$	4 мм/с
Граничний прогин $\Delta_{\text{кр}}$	0.3 мм
Темп прогріву $\theta'_{\max}$	0.1 °C/с
Номінальна швидкість $\omega_{\text{ном}}$	3000 об/хв
Резонансна частота f_r	45 Гц
Час у резонансі $\tau_{\text{доп}}$	2.5 с
Ширина резонансної зони ε	1 рад/с

5. Результати моделювання

У результаті чисельної реалізації запропонованої моделі запуску було отримано оптимальний профіль розгону ротора $\omega(t)$, який забезпечує ефективний перехід до номінального режиму роботи за умови дотримання всіх заданих технічних обмежень.

Профіль оптимального запуску включає три основні фази:

1. Фаза повільного прогріву триває приблизно до 80-ї секунди. У цей період ротор набирає швидкість із мінімальним прискоренням, що дає змогу уникнути перевищення температурних градієнтів і обмежити тепловий прогин ротора.

2. Фаза проходження резонансної зони (80-100 с) має різке прискорення, завдяки чому час перебування в резонансному діапазоні суттєво скорочується.

3. Фаза стабілізації (після 100 с) передбачає плавний вихід на номінальну кутову швидкість.

Чисельна перевірка показала, що за такого профілю розгону всі обмеження були

виконані. Максимальне значення теплового прогину не перевищило 0.28 мм, що є нижчим за критичне значення 0.3 мм. Амплітуда вібрацій залишалася в межах 3.7 мм/с за допустимого рівня 4 мм/с. Також тривалість перебування в резонансній зоні становила лише 2.1 с, що відповідає вимогам щодо безпеки експлуатації.

Загальний час запуску, за оптимізованим сценарієм, становив 154.2 с, що на 35 % менше порівняно зі стандартними ручними стратегіями розгону. Такий результат підтверджує ефективність застосованої гібридної стратегії оптимізації та доцільність її впровадження в практику технічного керування турбомашинами.

На рис. 2 показано комплексний підхід щодо моделювання запуску турбомашини на основі багатофакторної оптимізаційної моделі, де відображено критично важливі аспекти фізичного процесу з урахуванням конструктивних обмежень, температурно-механічної чутливості та динаміки вібрацій.

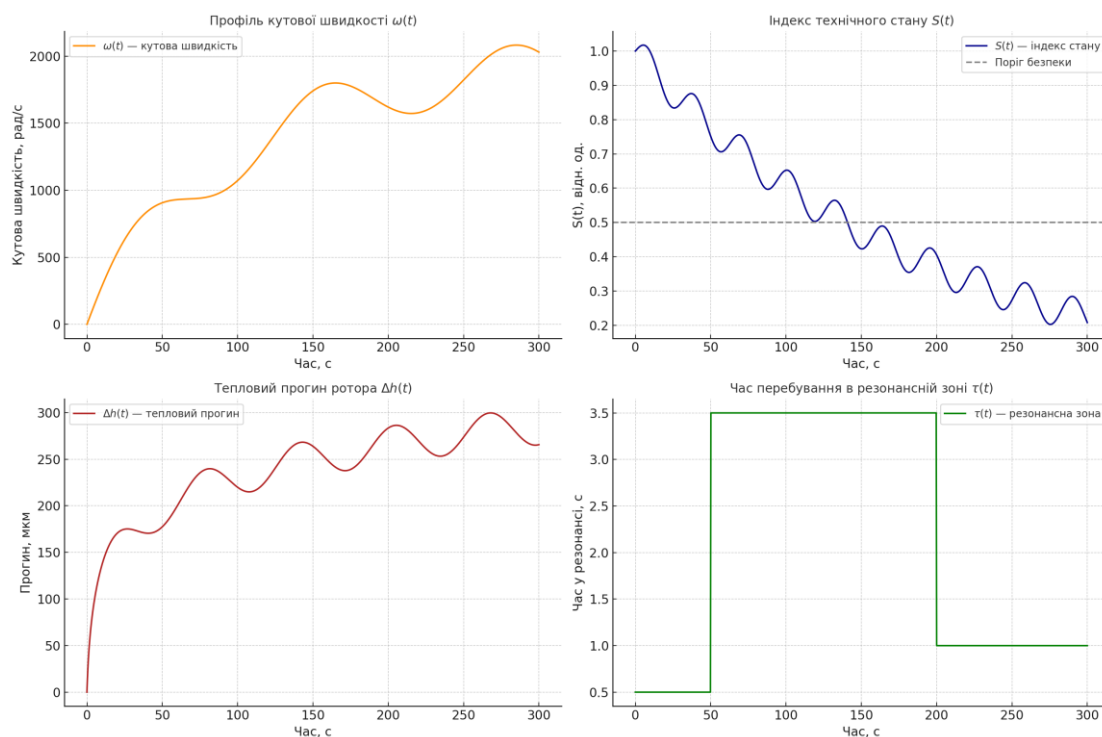


Рис. 2. Динаміка запуску турбомашини з урахуванням фізико-механічних ефектів

Профіль кутової швидкості $\omega(t)$ побудований як багатофазна функція, що імітує три основні етапи запуску агрегату: повільний прогрів ротора, прискорене проходження через зону структурного резонансу і стабілізацію на номінальній швидкості. Такий підхід дає змогу мінімізувати механічні ризики й узгодити пусковий режим із технічними обмеженнями, такими як максимальне прискорення, теплові навантаження, допустима тривалість критичних режимів.

Тепловий прогин ротора $\Delta_{th}(t)$ моделюють на основі температурного градієнта, що має експоненціальну форму, з урахуванням флуктуацій температури за радіальним напрямком. Така побудова дає змогу виявити критичні моменти, коли накопичення температурного напруження в корпусі ротора досягає межового стану, спричиняючи прогин, здатний викликати додаткові механічні деформації.

Інтегральна функція технічного стану $S(t)$ включає агрегування основних деградаційних чинників – амплітуди вібрацій, температурного поля, теплового прогину з відповідними ваговими коефіцієнтами. Це дає змогу отримати узагальнений індикатор надійності системи в реальному часі. На графіку відображено порогове значення $S = 0.6$, яке відповідає граничному безпечному рівню функціонування; подальше зниження індексу сигналізує про необхідність термінового технічного втручання.

Графік накопиченого часу перебування в зоні резонансу $\tau_r(t)$ відображує тривалість присутності кутової швидкості в околі критичної частоти $\omega_r \pm \varepsilon$, що є надзвичайно небезпечним для конструктивної цілісності машини. Із досягненням допустимого рівня $\tau_{\text{доп}}$ система має переходити в аварійний режим захисту. У наведеному моделюванні видно, що завдяки адаптивному керуванню запуском час у резонансній зоні було мінімізовано до безпечного рівня.

Отже, кожен конкретний аспект складної динамічної задачі запуску

турбомашини реалізований і може бути використаний як аналітичний інструмент для розроблення систем моніторингу технічного стану з функціями прогнозування й оптимізації технічного обслуговування.

У сучасних умовах експлуатації суден запуск турбінних агрегатів потребує не лише базового технічного контролю, а і високого рівня адаптивності до змінних експлуатаційних умов. Однією з перспективних сфер застосування розробленої моделі є оптимізація алгоритму запуску судових турбін, що відповідають за привод електрогенераторів або інше допоміжне обладнання. Надійність такого запуску критично важлива: передчасне ввімкнення, температурні піки чи нерівномірний розігрів ротора можуть призвести до термомеханічного навантаження, вібраційної нестабільності та, як наслідок, відмови агрегату, особливо в умовах обмеженого сервісного обслуговування під час рейсу.

Особливості середовища, а це і коливання навантаження, підвищена вологість, корозійна дія морського повітря та складність обслуговування в обмеженому просторі машинного відділення, формують складну множину ризиків. Пропонована модель дає змогу врахувати такі параметри, як тепловий прогин ротора, частотна спектральна характеристика резонансних зон, збурення підшипникових вузлів, і можливі сценарії критичних режимів запуску.

Індивідуалізовані профілі запуску, сформовані на основі цієї моделі, здатні адаптуватися до фактичних умов кожного конкретного пуску. Цього досягають за рахунок реалізації через програмовані логічні контролери (ПЛК), інтегровані в систему централізованого моніторингу і керування роботою головних і допоміжних агрегатів або SCADA-систему судна (Supervisory Control and Data Acquisition), що забезпечує повний цикл: від моніторингу стану вузлів до автоматичної корекції параметрів запуску в реальному часі, мінімізуючи ризики запуску та подовжуючи ресурс агрегатів.

Висновки. Результати дослідження підтвердили доцільність і ефективність використання оптимізаційного підходу щодо запуску турбомашини з урахуванням критичних теплових і вібраційних обмежень. Побудована модель дала змогу сформувати оптимальний профіль кутової швидкості, який мінімізує час запуску, зберігаючи технічну цілісність агрегату.

Запропонована гібридна стратегія керування запуском забезпечує проходження через резонансні зони з мінімальним ризиком і дає змогу уникнути перевищення допустимих температурних градієнтів і прогинів ротора. Отже, розроблена методика може бути використана для практичної реалізації в системах моніторингу й автоматизованого запуску турбомашин.

Список використаних джерел

1. Li H., Zhang R., Li Z., Lee S., Ju Y., Zhang C. & Lu Y. (2024). Design optimization and off-design performance analysis of one-dimensional supercritical CO₂ Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*. 258. 124547. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124547>.
2. Ascione F., Giuffré A., Colonna P. & De Servi C. (2025). Integrated design optimization of a novel electrically-driven helicopter ECS using low-GWP refrigerants as working fluid. *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.06.015>.
3. Wang R., Li X., Qin Z., Cai J., Bian X., Wang X., Tian H. & Shu G. (2023). Control strategy for actual constraints during the start–stop process of a supercritical CO₂ Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*,. 226. 120289. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120289>.
4. Amer M., Ventura C. E., Maroldt N., Seume J. R. & Wallaschek J. (2024). Modal parameter estimation of turbomachinery in operation taking into account friction damping. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 216. 111414. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111414>.
5. Klocke F., Klink A., Veselovac D., Aspinwall D. K., Soo, S. L., Schmidt M., Schilp J., Levy G. & Kruth J. (2013). Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Annals*. 63(2). 703-726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.004>.
6. Gavalas I., Tsoutsanis O., Chasalevris A. & Sawicki J. T. (2025). Adaptive Turbine-Generator Dynamics and Alignment utilizing Active Journal Bearings: An Analytical Investigation on System Modelling and Control. *Tribology International*. 110687. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110687>.
7. Asli M., König P., Sharma D., Pontika E., Huete J., Konda K. R., Mathiazhagan A., Xie T., Höschler K. & Laskaridis P. (2023). Thermal management challenges in hybrid-electric propulsion aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*. 144. 100967. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100967>.
8. Pakle S. & Jiang K. (2018). Design of a high-performance centrifugal compressor with new surge margin improvement technique for high speed turbomachinery. *Propulsion and Power Research*. 7(1). 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2018.02.004>.
9. Qin T., Yan X., Yuan C. & Sun Y. (2025). Review of system design and operation control technology of supercritical CO₂ power cycle. *Energy Conversion and Management*. 326. 119462. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119462>.
10. Novotný P., Kudláček P. & Vacula J. (2023). Explanation of the mechanisms of unsteady gas flow through the turbocharger seal system, including thermal and structural interactions. *Propulsion and Power Research*. 12(2). 180-198. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2023.05.003>.
11. Melnyk O., Onishchenko O., Shibaev O., Kuznichenko S., Bulgakov M., Shcherbina O., Yaremenko N., Voloshyn D. (2024). Development of strategies for reducing nitrous oxide emissions

from marine diesel engines. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32 (2). P. 465-479. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i2.297410>.

12. Onishchenko O., Bulgakov M., Melnyk O., Volianska Y., Storchak O., Kovalchuk M. (2024). Environmental Sustainability in Maritime Transportation Through the Development of Strategies to Reduce Emissions from Marine Internal Combustion Engines. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_28.

13. Bezlutsky V., Melnyk O., Emelyanova T., Lisnychiy V., Lytvynenko A. & Sova S. (2024). Temperature Loads in Railway Structures and General Engineering Practice. *Proceedings of 28th International Scientific Conference. Transport Means. 2024*. 581-586. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P581-586>.

14. Jurkovič M., Molnárová Baracková A., Kadnár R., Melnyk O., Gorzelanczyk P. and Prabowo A. R. (2025). Operational Research of AIS AtoNs in Inland Waterways: A Case Study of a Selected Stretch on the Danube. *Transactions on Maritime Science*. 14(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v14.n01.w02>.

Сторчак Олександр Олександрович, старший викладач кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID ID: 0000-0003-2179-5159.
Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Storchak Oleksandr, Senior Lecturer at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID ID: 0000-0003-2179-5159.

Melnyk Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Статтю прийнято 15.08.2025 р.