

Суховій С.І.

Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут»
<https://orcid.org/0009-0001-5533-6367>

Лакоза С.Л.

<https://orcid.org/0000-0001-6354-1611>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мацюк Д.М.

<https://orcid.org/0009-0004-5037-0568>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
Акціонерне товариство науково-технічний комплекс «Електронприлад»

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Система автоматичного керування (САК) значною мірою впливає на характеристики, що визначають конкурентоспроможність газотурбінного двигуна (ГТД). Підвищення точності підтримання заданих параметрів дозволяє ГТД працювати ближче до границь їх обмеження. Це забезпечує покращення динамічних властивостей ГТД і важливих експлуатаційних параметрів, зокрема, тяги та витрати палива. Водночас це гарантує збереження ресурсу двигуна, підвищення надійності та безпеки. Точність відпрацювання динамічних режимів ГТД суттєво впливає на можливості пілотування літальних апаратів, вірогідність успішного виходу з аварійних ситуацій. Оскільки в сучасних ГТД використовують електронні цифрові САК, досягнення найкращих показників ГТД значною мірою визначається програмним забезпеченням блоків керування. У даній роботі було проаналізовано основні тенденції вдосконалення ПЗ САК ГТД. Було розглянуто основні етапи розвитку САК ГТД, виявлено основні сучасні проблеми, що потребують досліджень. З аналізу літературних джерел було виділено чотири напрямки вдосконалення ПЗ САК ГТД: розробка релевантних математичних моделей, оптимізація програм регулювання, використання новітніх алгоритмів керування, технологія розробки ПЗ. Тенденції вдосконалення математичних моделей ГТД пов'язані з підвищенням точності та скороченням часу розрахунку. Для програм регулювання актуальним є оптимізація наявних варіантів вибору значень параметрів та пошук нових кращих варіантів. У напрямку вдосконалення алгоритмів керування виділяються тенденції створення нових перспективних підходів, а також удосконалення класичних рішень. Перспективні алгоритми поряд з перевагами мають ряд недоліків, таких як висока складність, великий час чисельних розрахунків, що стримує їх впровадження в реальних системах. Водночас широко використовуються нелінійні регулятори на базі ПД-регулятора з використанням логіки вибору активного контуру. Їх широке застосування в сучасних ГТД пов'язане із простотою реалізації та оптимальному співвідношенні характеристик швидкодії та якості керування. Тенденція вдосконалення технології розробки САК ГТД полягає в застосуванні модельно-орієнтованого проєктування, що дозволяє скоротити час розробки, зменшити її вартість, а також підвищити безпечність та якість системи.

Ключові слова: газотурбінний двигун, алгоритм керування, система керування ГТД, вдосконалення САК, ПД-регулятор



Постановка проблеми. Система автоматичного керування (САК) значною мірою впливає на характеристики, що визначають конкурентоспроможність газотурбінного двигуна (ГТД). Підвищення точності підтримання заданих параметрів роботи ГТД дозволяє працювати ближче до їх граничних значень. Це значно покращує динамічні властивості ГТД і його важливі експлуатаційні параметри, зокрема, тягу та витрату палива. Водночас це гарантує збереження ресурсу двигуна, підвищення надійності та безпеки. Точність відпрацювання динамічних режимів ГТД значно впливає на можливості пілотування літальних апаратів, ймовірність успішного виходу з аварійних ситуацій.

У сучасних ГТД використовують електронні цифрові САК, а тому досягнення необхідних показників роботи ГТД значною мірою визначається програмним забезпеченням (ПЗ) блоків керування. Завданням даного дослідження є аналіз основних тенденцій вдосконалення ПЗ САК ГТД. Результати аналізу можна згрупувати у чотири категорії, як показано на рис. 1. Кожен з цих великих напрямків розглянути більш детально в даній роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу літературних джерел можна виділити чотири основні етапи розвитку систем автоматичного керування ГТД [1, 2]. Перший етап (1945-1970) характеризувався переважним застосуванням гідромеханічних систем керування і найпростіших варіантів САК з одним входом і виходом.

На другому етапі (1970-1990) виникла і набула поширення теорія побудови регуляторів, які застосовувалися до відповідного активного контуру ГТД за допомогою логічних правил. Також у цей період почалося становлення теорії багатовимірних систем керування та перші спроби впровадження цифрових електронних регуляторів.

Третій етап (1990-2004) характеризувався застосуванням новітніх теорій і алгоритмів керування, зокрема, інтегрованого керування силовою установкою і літальним апаратом, багатовимірного

керування, активного керування, інтелектуального ресурсоподовжуючого керування, алгоритмів нечіткої логіки, імплементацію напівнатурних випробувань у практику розробки САК.

На четвертому етапі (з 2004) основна тенденція розвитку САК ГТД полягає в поширенні застосування електронних та електричних компонент у структурі САК, а також розвитку інноваційних алгоритмів керування, зокрема, керування на основі нелінійних математичних моделей ГТД, розподіленого керування, активного керування горінням та ситуаційного керування.

Виділяють наступні важливі проблеми та напрямки розвитку САК ГТД, що потребують подальших досліджень [3]: 1) невизначеність параметрів ГТД та об'єкта керування; 2) багатовимірність і багатокритеріальність; 3) відмовостійкість ГТД; 4) розподілені системи керування; 5) інтеграція в єдину САК літак/двигун.

Невизначеність найчастіше пов'язана з неточністю моделі. Тобто математична модель об'єкта керування (ОК), що використовується для розробки регулятора, не збігається з реальною системою в широкому діапазоні умов експлуатації. Водночас це поняття також містить невизначеність зовнішніх збурень. Здатність САК протидіяти різній невизначеності називається робастністю. Розвиток методів забезпечення робастності САК є одним з актуальних напрямків досліджень. Для розв'язання цієї проблеми застосовують лінійний і нелінійний підходи. У першому випадку використовують лінійну модель ОК, що отримана для однієї робочої точки. Її використовують для синтезу регулятора, що забезпечує стійкість в широкому діапазоні режимів. Нелінійні робастні методи базуються на приближенні нелінійних моделей шляхом використання лінійних моделей зі змінними коефіцієнтами. Також у таких алгоритмах широко застосовується ковзний режим керування та адаптивні регулятори, що мають властивості самоналаштування.

Багатовимірне керування актуально для складних систем, на роботу яких одночасно впливає велика кількість параметрів. Для досягнення

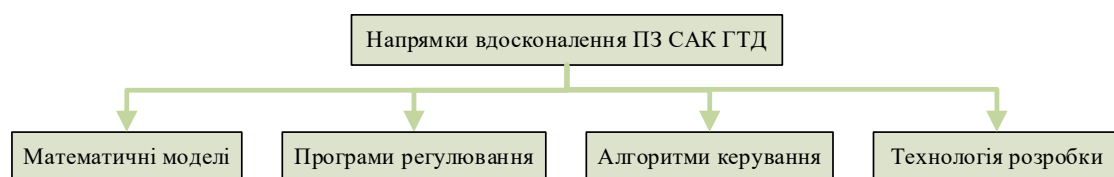


Рис. 1. Напрямки вдосконалення ПЗ САК ГТД

високих експлуатаційних характеристик сучасні САК ГТД, окрім витрати палива, як основного регульовального фактора, використовують інформацію про змінну геометрію, розміри або положення деяких елементів ГТД. Також цей підхід є обов'язковим при розв'язанні спеціальних задач, зокрема, забезпечення високої маневровості та швидкості польоту.

ГТД має декілька фізичних обмежень при роботі, дотримання котрих гарантує безпечну експлуатацію. Одним з напрямків підвищення ефективності ГТД є використання таких режимів, що наближені до граничних обмежень при його безпечній роботі. Суперечливий зв'язок між вимогами безпеки та високої ефективності ГТД обумовлює складну *багатокритеріальну задачу керування*.

Відмовостійкість САК – властивість системи забезпечувати стійкість та нормальну роботу ГТД в умовах, коли датчик, виконавчий пристрій або компонент двигуна вийшли з ладу. ГТД працює в широкому діапазоні зовнішніх умов і збурень, а тому схильний до відмов різних елементів та деградації їх параметрів. У таких умовах для двигуна важливо вчасно змінити стратегію керування для забезпечення безпеки та надійності. Сучасні відмовостійкі САК поділяються на два класи: активні та пасивні. При виявленні поточної відмови у пасивних системах САК переходить до використання відповідного завчасно спроектованого регулятора з метою забезпечення нормального функціонування двигуна. В активних системах вирішується складніша задача, яка полягає у забезпеченні не лише стійкості, а й робастності, необхідної тривалості перехідного процесу, мінімальних затрат на керування.

Розподілені САК – важливий напрямок вдосконалення САК ГТД [4, 5]. Нині більшість САК ГТД є централізованими цифровими електронними системами з повною відповідальністю. В таких системах всі функції обробки та керування виконуються всередині одного блоку [6, 7]. На сучасному етапі керування ГТД не обмежується керуванням витратою палива, а поширюється на вхідний пристрій, сопло, механізацію проточної частини. При керуванні такою складною системою розподілені САК забезпечують ряд переваг: 1) зменшення складності та маси; 2) застосування стандартизованих інтелектуальних пристроїв та інтерфейсів, скорочення термінів та вартості розробки; 3) зменшення вартості експлуатації, підвищення надійності та ремонтпридатності; 4) покращення гнучкості при розробці та оновленні системи.

Для широкого застосування таких систем потрібно вирішити ряд проблем. Серед них ключовими є застосування інтелектуальних датчиків та виконавчих пристроїв, використання високо-температурної електроніки, технологій мережевої комунікації та систем розподіленого живлення.

Постановка завдання. Метою статті є порівняльний аналіз сучасних тенденцій вдосконалення технології розробки САК ГТД при модернізації та проектуванні новітніх систем керування авіаційними ГТД. Коректний та оптимальний вибір підходу до технології розробки САК ГТД дозволяє скоротити час розробки, зменшити її вартість, а також підвищити точність, безпечність та якість системи.

Виклад основного матеріалу. Багато сучасних підходів до розробки САК ГТД базуються на методах оптимізації. Ось основні труднощі в розробці САК при оптимізації регуляторів ГТД [8]: 1) відсутність аналітичних рішень для настройки коефіцієнтів підсилення; 2) необхідність забезпечення компромісу між різними цілями керування; 3) необхідність кількісного подання усіх характеристик керування; 4) велика кількість локальних мінімумів і відповідних режимів роботи; 5) традиційні алгоритми оптимізації мають великий час обчислення, який часто зовсім неприйнятний для розв'язання таких задач.

Програмне забезпечення критично важливих для безпеки систем розробляється з високим рівнем надійності, що потребує значних зусиль, коштів і часу. Забезпечення надійності ПЗ САК ГТД при зменшенні коштів і часу розробки є актуальним напрямком прикладних робіт.

Актуальні напрямки досліджень в області керування ГТД показано на рис. 2.

Вдосконалення математичних моделей ГТД. Математична модель ОК використовується для синтезу алгоритму керування, вона є важливим компонентом САК для методів керування з використанням математичних моделей [3]. В обох випадках ставляться високі вимоги до точності опису ОК математичною моделлю, яка використовується. Оскільки ГТД являє собою складну, суттєво нелінійну, змінну в часі систему, побудова точної моделі для розрахунків у реальному часі є складною задачею.

Найбільшу точність забезпечують нелінійні повузлові моделі, які отримують на основі об'єднання моделей елементів двигуна шляхом узгодження їх входів і виходів. Але у ряді випадків нелінійні повузлові моделі не можуть бути використані безпосередньо для синтезу САК або

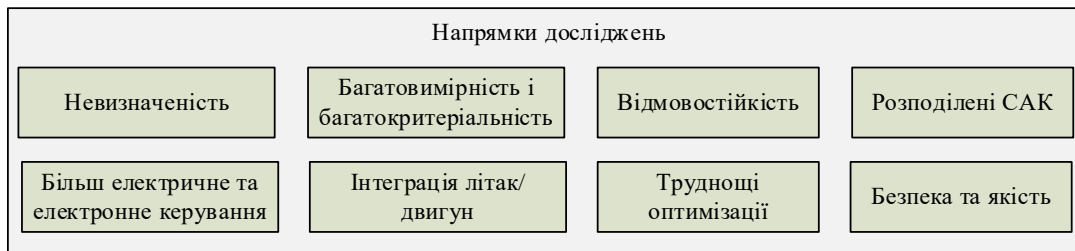


Рис. 2. Актуальні напрямки досліджень в області керування ГТД

для керування в реальному часі. Тому широкого застосування набули моделі в просторі станів або у вигляді передатних функцій, які придатні для розробки перспективних алгоритмів керування, моніторингу та діагностики. У більшості випадків ці моделі отримують за допомогою різних методів лінеаризації нелінійних повузлових моделей.

Згідно робіт [1, 9] основні труднощі розвитку бортових математичних моделей для застосування у керуванні ГТД та визначенні його технічного стану полягають в наступному: 1) забезпечення високої точності моделювання критичних параметрів, особливо на перехідних режимах; 2) забезпечення робастності моделей; 3) час розрахунку параметрів моделей; 4) верифікація і валідація програмного коду для забезпечення надійності та безпеки.

Запропоновано наступні потенційні шляхи вирішення цих труднощів [9]:

- застосування декількох різних математичних моделей для різних параметрів;
- застосування моніторингових систем реального часу для забезпечення надійності та безпеки.

Для зменшення часу розрахунків в [10] запропоновано методіку побудови моделі типу «сірий ящик», як альтернативи моделям «білий ящик» і «чорний ящик», без втрати точності. Модель «білий ящик» авторами використано для опису динаміки ротора, моделі типу «чорний ящик» — для опису решти елементів двигуна.

У [11] виконано порівняння трьох типів моделей на основі нейронних мереж для мікро ГТД. Такі моделі мають переваги для випадків, коли немає характеристик вузлів нелінійної моделі. У роботі [12] запропоновано використовувати поєднання нейронних мереж і розширеного фільтра Калмана для оцінки тяги двигуна у змінному циклі роботи. У [13] в якості бортової моделі було запропоновано квазітривимірну модель динаміки ГТД.

У [14] розроблено алгоритм з підвищеною стійкістю числових розрахунків. Для цього авторами був розроблений покращений алгоритм сігма-

точкового фільтра Калмана, у якому застосовано сингулярний розклад. У роботі запропонована «офлайн» корекція не оцінюваних параметрів для зменшення негативного впливу їх деградації.

У роботі [15] виконано порівняння способів отримання лінійних моделей для задач, в яких необхідно брати до уваги деградацію компонентів ГТД.

Формування оптимальних програм регулювання. Формування програми регулювання ГТД дозволяє змінювати належним чином параметри двигуна згідно з умовами та вимогами експлуатації. Застосовуючи декілька програм регулювання можна змінювати параметри ГТД, здійснювати їх перемикання відповідно до умов польоту. Формування програми регулювання полягає у розв'язанні задачі оптимізації відносно заданої цільової функції.

У роботі [16] досліджено можливість покращення рвучкості турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (ТРДДФ) шляхом додаванням двох допоміжних керуючих впливів: перепуску повітря із середніх ступенів компресора та повороту соплового апарату турбіни низького тиску. Для отримання оптимальних програм зміни регульовальних факторів (перепуску повітря компресора, повороту соплового апарату турбіни низького тиску та відношення витрати повітря до тиску за компресором у точках експлуатаційної області) використовувався метод рою частинок (PSO) разом з методом послідовного квадратичного програмування. Отримані результати було розширено на всю експлуатаційну область, використовуючи методи теорії подібності.

У роботі [17] вирішувалась багатокритеріальна задача оптимізації за тягою, питомою витратою палива та витратою повітря. Авторами запропоновано гібридний метод формування оптимальних програм керування усталених режимів двигуна змінного циклу. Метод передбачає використання двох складових: пошуку оптимальних програм керування та бортової програми, що корегує програму керування при деградації технічного стану

ГТД. Першу складову побудовано на базі генетичного алгоритму, другу – на базі градієнтного методу.

Алгоритми керування. На рис. 3 наведено класифікацію регуляторів ГТД [3]. Лінійні регулятори є класичним підходом до розв’язку задач керування. До них відносять: 1) пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор. У САК ГТД широкого поширення набули його нелінійні варіанти з логікою перемикавання активного контуру; 2) лінійний квадратичний регулятор (ЛКР). Для налаштування вагових матриць і параметрів потребує ітераційного процесу; 3) лінійно-квадратичний гаусовий регулятор з відновленням передатної функції контуру. Має властивість придушувати зовнішні збурення і враховувати невизначеність системи, використовуючи алгоритм фільтра Калмана; 4) робастний H_∞ -регулятор. Враховує невизначеність системи та немінуче вносить у неї консерватизм, а тому не дозволяє забезпечити високі характеристики у широкому діапазоні робочих режимів.

Нелінійні регулятори. Лінійний регулятор з налаштуванням підсилення призначений для врахування суттєвої нелінійності ГТД, зміни зовнішніх умов і забезпечення прийнятних динамічних властивостей у всій експлуатаційній області. Класичний регулятор має фіксовану структуру з коефіцієнтами підсилення, що налаштовуються залежно від обраних параметрів. Параметри відображають зміну режиму ГТД і зовнішніх умов [18]. Лінійна інтерполяція застосовується для

визначення поточних підсилень регулятора для вимірних параметрів у реальному часі.

Лінійний регулятор зі змінними параметрами є узагальненням регулятора з налаштуванням підсилення, має більш строгі математичне обґрунтування. Гарантує стійкість і бажані характеристики САК в усій експлуатаційній області. Застосування декількох незалежних параметрів у регуляторі ускладнює проектування САК. Суттєвий недолік таких моделей – важкість отримання багатовимірного варіанта із задовільною точністю [3].

У роботі [19] цей метод було використано для побудови регулятора обмеження температури газу, регулятора прискорення ротора сумісно з основним регулятором сталих режимів. У роботі [20] було застосовано поліноміальну модель зі змінними коефіцієнтами для синтезу регулятора.

Регулятор ковзних режимів відрізняється від інших методів керування наявністю змінної структури, яка відповідає спроектованій траєкторії станів (поверхня ковзних режимів). Ідея такого керування полягає в тому, що система повинна досягти ковзної поверхні з будь-якого початкового стану і залишатися на цій поверхні завдяки регулятору. Спроекована поверхня ковзання описує ідеальні динамічні властивості системи.

Такий метод керування повністю інваріантний до зміни параметрів і збурень, тобто робастний. Метод простий у реалізації та дозволяє знизити розмірність використовуваної математичної моделі. Метод придатний для лінійних, нелінійних, безперервних та дискретних систем. Метод

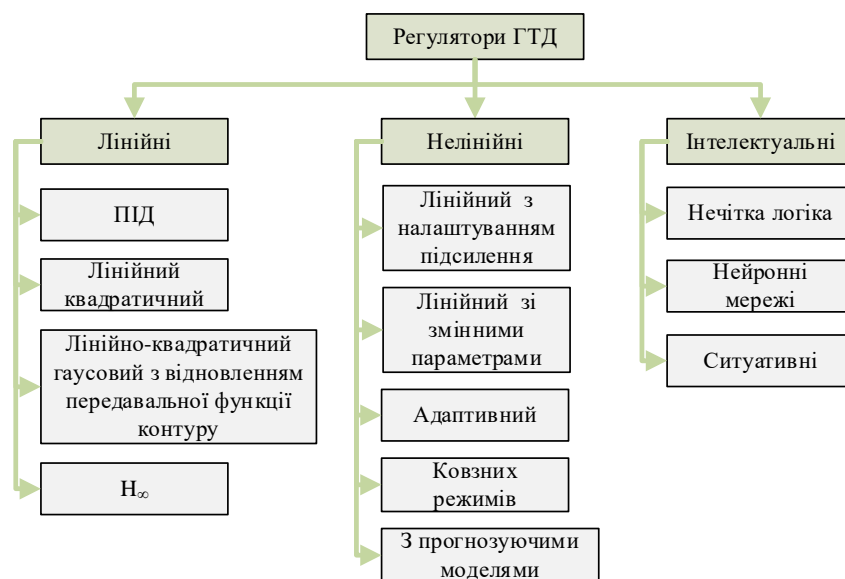


Рис. 3. Класифікація регуляторів ГТД

застосовувався для контурів обмеження параметрів [19], у системах з урахуванням квантування, а також у відмовостійких системах [21].

Адаптивний регулятор призначений нівелювати структурну або параметричну невизначеність, зовнішні збурення, деградацію системи або зміну зовнішніх умов. У ГТД набуло застосування адаптивне керування на основі математичних моделей. Воно просте за принципом та має багато методів проектування. Бажані статичні та динамічні властивості ГТД визначаються моделлю. Перевага метода у тому, що він не потребує точної моделі ОК. Однак адаптивне керування має труднощі у практичному застосуванні. По перше, оцінювані параметри не збігаються до істинних значень під впливом шумів вимірюваних параметрів. По друге, сучасні адаптивні алгоритми керування не показують високих результатів при застосуванні у САК ГТД [3].

Регулятор з прогностичними моделями базується на використанні алгоритму оптимізації цільової функції в реальному часі. Цільова функція будується на основі порівняння параметрів моделі з вимірюваними параметрами та наперед визначеними константами. За типом використовуваної математичної моделі метод поділяється на лінійний та нелінійний. Для задач керування ГТД більше поширення має нелінійний підхід. Цей метод має дві суттєві переваги. По перше, можливо одночасно оптимізувати параметри ГТД і дотримуватися обмежень без складної логіки перемикавання. По друге, метод дозволяє отримати кращі результати ніж інші методи для багатовимірних випадків. Недоліком метода є велике обчислювальне навантаження, особливо, для нелінійних випадків [3]. Метод було застосовано для ТРДД [22], стаціонарних газотурбінних установок, вертолітних силових установок.

Інтелектуальні регулятори. До цього класу регуляторів відносять:

1) *Регулятор з нечіткою логікою.* Його алгоритм базується на розподілі нелінійного об'єкта системою правил на підсистеми, що мають спрощений опис. Два типи моделей застосовують для опису систем: Т-S керування і нейронні мережі. Перший тип моделей являє собою комбінацію констант або лінійних функцій, нейронні мережі є нелінійними моделями.

Принцип нечіткого Т-S керування полягає в тому, що двигун апроксимується серією зважених лінійних підсистем на основі системи правил. Недоліки метода Т-S керування полягають у великій складності нечітких моделей для сучасних

двигунів при суттєвому розширенні області експлуатації, а також для багатовимірних регуляторів. Розробка потребує експертних знань, а при використанні нейронних мереж існує проблема підтвердження стійкості [3].

2) *Регулятори на основі нейронних мереж* використовуються завдяки широким можливостям апроксимації нелінійностей (традиційний синтез регуляторів з використанням математичних моделей ставить високі вимоги до їх точності) [3].

3) *Ситуаційний регулятор* являє собою альтернативний підхід для формування структури САК [23]. У циклі роботи двигуна відокремлюються робочі режими. Для кожного з них розробляється регулятор, як окремий програмний модуль. Ситуаційний регулятор активує той чи інший регулятор залежно від поточного режиму роботи ГТД. Такий підхід обумовлює модульну архітектуру системи та надає можливості для інтегрування систем діагностики та керування.

ПД-регулятори з налаштуванням підсилення і логікою вибору активного контуру керування. Комбінування ПД-регуляторів з логікою вибору активного контуру розв'язало проблему керування багатьма параметрами ГТД, а в поєднанні з можливістю налаштування підсилення законів керування це дозволило враховувати ще нелінійність ГТД і зміну зовнішніх умов. Завдяки структурній простоті, високій робастності, вдосконаленню впродовж багатьох років регулятори даного типу набули довершеності та широкого застосування в серійних ГТД [24, 7]. Такі регулятори не втрачають актуальність і сьогодні. Вони використовуються в нових проектах, служать базою для поступового впровадження інноваційних алгоритмів і підходів до розробки.

Класичною стала реалізація САК на основі ПД-регуляторів з min/max-логікою вибору активного закону керування та алгоритмом протидії накопичуванню інтеграла неактивного регулятора [25]. Коефіцієнти основного регулятора, що визначає тягу, апроксимовано за висотою та швидкістю в числах Маха. Інтегральна компонента додатково масштабується згідно з робочим режимом двигуна та висотою. Регулятори граничних режимів на відміну від основного регулятора виконано із сталими коефіцієнтами.

Роздільний синтез контурів керування з подальшим об'єднанням в єдину систему не дає оптимальний результат при керуванні ГТД. Це пов'язано з тим, що в системі мають місце перемикавання контурів, які не враховуються в процесі розробки. Подолати цей недолік можна вибором параметрів

з використанням оптимізації цільової функції, яка складається на основі вимог до САК. Так у роботі [26] синтез ПІ-регулятора частоти обертання ротора ГТД було сформульовано як задачу оптимізації за алгоритмом диференціальної еволюції. Даний метод застосовано в декількох точках дросельної характеристики для лінеаризованих моделей і апроксимовано для всього робочого діапазону.

Технологія розробки САК ГТД. Модельно-орієнтований підхід (МОП) до проєктування алгоритмів САК ГТД набув широкого застосування завдяки ефективності і багатьом перевагам. МОП є методикою, що використовується для розробки та тестування критично важливих для безпеки систем [27]. Вона передбачає розробку моделі системи керування, її моделювання та налагодження за допомогою спеціальних інструментів, а потім автоматичну генерацію коду ПЗ керування для цільового мікроконтролера. У сфері вбудованих систем такий підхід надає величезну перевагу і дозволяє уникнути трудомісткого та схильного до помилок останнього етапу кодування.

МОП довів свою ефективність завдяки багатьом успішним впровадженням у різних галузях промисловості. Цей підхід було застосовано для дослідження можливості рекуперації залишкового тепла у вихлопних газах потужного двигуна внутрішнього згоряння [28], проєктування теплових накопичувачів для теплових насосів, концептуального проєктування архітектури системи рідкого водневого палива.

Приклад реалізації методу МОП у Simulink для вбудованих систем керування наведено у [29]. Після завершення формування моделі у Simulink вона перетворюється на проміжну формальну модель на мові синхронного програмування Lustre. Проміжна формальна модель служить для генерування багатозадачного коду для операційної системи реального часу Xenomaі RTOS.

Автори роботи [30] досліджували проблеми, з якими стикається авіаційна галузь під час розробки складних систем у децентралізованому середовищі. Оскільки розробка літаків, двигунів та обладнання виконується багатонаціональними та географічно розподіленими командами, традиційні документоорієнтовані підходи виявляються громіздкими. МОП розв'язує ці проблеми. Він мінімізує залежність від документів, покращує співпрацю та пропонує централізовану систему модель для забезпечення узгодженості усіх рішень. Цей підхід не лише обіцяє підвищення ефективності, але й дозволяє зменшити сегментованість процесу розробки в аерокосмічній галузі.

Концепція МОП та інструменти для її втілення для систем літака обговорювалися в роботі [31]. Інструментальні набори MathWorks та Modelica розглядаються як середовища для реалізації пропонуваної концепції.

Авіаційні газотурбінні двигуни є дуже складними системами, що включають багато модулів та підсистем. САК ГТД з повною відповідальністю авіаційного двигуна сама по собі є дуже складною підсистемою, що охоплює апаратне та програмне забезпечення для керування двигуном на всіх режимах роботи. Тому доцільно використовувати МОП для розробки таких систем.

Висновки. Розвиток та вдосконалення новітніх алгоритмів керування сучасних САК ГТД пов'язано з вдосконалення математичних моделей, підвищенням точності та скороченням часу розрахунків у них. У напрямку вдосконалення алгоритмів керування виділяються тенденції створення нових перспективних підходів, а також удосконалення класичних схем. Перспективні алгоритми поряд з перевагами мають ряд недоліків, таких як висока складність, великий час чисельних розрахунків, що стримує їх впровадження в реальних системах. Водночас широко використовуються нелінійні регулятори на базі ПІД-регулятора з використанням логіки вибору активного контуру. Їх широке застосування в сучасних ГТД пов'язане із простотою реалізації та оптимальному співвідношенні характеристик швидкодії та якості керування. Перспективи їх використання полягають у застосуванні для мало-розмірних ГТД, комбінуванні з перспективними регуляторами, використанні методів оптимізації для їх налаштування. Для програм регулювання параметрів актуальним є оптимізація наявних та пошук нових покращених варіантів обраних характеристик законів керування.

Вдосконалення технологій розробки САК ГТД полягає в застосуванні модельно-орієнтованого проєктування, що дозволяє скоротити час розробки, зменшити її вартість, а також підвищити безпечність та якість системи.

Список літератури:

1. Adibhatla S. et al. Propulsion control technology development needs to address NASA aeronautics research mission goals for thrusts 3a and 4: materials of the AIAA Propulsion and Energy Forum 2018, Cincinnati, OH, United States, Jul. 7–13, 2018. Cincinnati, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4732.

2. Mohammadi S. J. et al. A scientometric analysis and critical review of gas turbine aero-engines control: From Whittle engine to more-electric propulsion. *Meas. Control*. 2021. Vol. 54, no. 4. P. 935–966. DOI: 10.1177/0020294020956675.
3. Lv C. et al. Recent research progress on airbreathing aero-engine control algorithm. *Propuls. Power Res.* 2022. Vol. 11, no. 1. P. 1–57. DOI: 10.1016/j.jprr.2022.02.003.
4. Behbahani A. R. et al. Secure embedded distributed control and instrumentation architecture for aircraft propulsion systems: framework, process, methods, challenges, and opportunities: materials of the ASME Turbo Expo 2022 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Rotterdam, Netherlands, Jun. 17–21, 2022. Rotterdam, 2022. DOI: 10.1115/GT2022-82644
5. Pakmehr M. et al. Distributed control of turbofan engines: materials of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Denver, Colorado, Aug. 2–5, 2009. Denver, 2009. DOI: 10.2514/6.2009-5532.
6. Ji X. et al. A linear iterative controller for software defined control systems of aero-engines based on LMI. *Actuators*. 2023. Vol. 12, no. 7. Art. no. 259. DOI: 10.3390/act12070259.
7. Ji X. et al. A decentralized LQR output feedback control for aero-engines. *Actuators*. 2023. Vol. 12, no. 4. Art. no. 164. DOI: 10.3390/act12040164.
8. Liu Y. et al. Advanced optimization of gas turbine aero-engine transient performance using linkage-learning genetic algorithm: Part I, building blocks detection and optimization in runway. *Chin. J. Aeronaut.* 2021. Vol. 34, no. 4. P. 526–539. DOI: 10.1016/j.cja.2020.07.034.
9. Wei Z. et al. Gas turbine aero-engines real time on-board modelling: A review, research challenges, and exploring the future. *Prog. Aero. Sci.* 2020. Vol. 121. Art. no. 100693. DOI: 10.1016/j.paerosci.2020.100693.
10. Moroto R. H. et al. Linear grey-box modeling of gas turbine engines for MIMO control design: materials of the ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway, Jun. 11–15, 2018. Oslo, 2018. Paper GT2018-75847. DOI: 10.1115/GT2018-75847
11. Wu X. et al. A neural network-based modeling approach for transient performance prediction of gas turbine engines. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2025. Vol. 47. Art. no. 119. DOI: 10.1007/s40430-025-05408-0.
12. Ma A. et al. Thrust online fusion estimation of high-flow dual variable cycle engine. *Aerosp. Sci. Technol.* 2024. Vol. 152, no. 12. Art. no. 109388. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109388.
13. Dai Y. et al. Enhanced quasi-three-dimensional transient simulation technique incorporating component volume effects for aero engine. *Chin. J. Aeronaut.* 2024. Vol. 37, no. 12. P. 325–346. DOI: 10.1016/j.cja.2024.07.020.
14. Chen Q. et al. An improved nonlinear onboard adaptive model for aero-engine performance control. *Chin. J. Aeronaut.* 2023. Vol. 36, no. 10. P. 317–334. DOI: 10.1016/j.cja.2022.12.005.
15. Castiglione T. et al. Linear model of a turboshaft aero-engine including components degradation for control-oriented applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 6. Art. no. 2634. DOI: 10.3390/en16062634.
16. Cai C. et al. Full-envelope acceleration control method of turbofan engine based on variable geometry compound adjustment. *Aerosp. Sci. Technol.* 2022. Vol. 128, no. 8. Art. no. 107748. DOI: 10.1016/j.ast.2022.107748.
17. Ji R. et al. A hybrid design method of steady-state throttling control schedules for high-flow variable cycle engine. *Aerosp. Sci. Technol.* 2024. Vol. 151. Art. no. 109284. DOI: 10.1016/j.ast.2024.109284.
18. Härefors M. Application of H_∞ robust control to the RM12 jet engine. *Control Eng. Practice*. 1997. Vol. 5, no. 9. P. 1189–1201. DOI: 10.1016/S0967-0661(97)84358-4.
19. Yang S. et al. LPV based sliding mode control for limit protection of aircraft engines: materials of the ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, Norway, Jun. 11–15, 2018. Oslo, 2018. Paper GT2018-77236. DOI: 10.1115/GT2018-77236.
20. Yang B. et al. Non-affine parameter dependent LPV model and LMI based adaptive control for turbofan engines. *Chin. J. Aeronaut.* 2019. Vol. 32, no. 3. P. 585–594. DOI: 10.1016/j.cja.2018.12.031.
21. Ashraf M. A. et al. A robust sensor and actuator fault tolerant control scheme for nonlinear system. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 626–637. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3137388.
22. Nikolaidis T. et al. Advanced constraints management strategy for real-time optimization of gas turbine engine transient Performance. *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, no. 24. Art. no. 5333. DOI: 10.3390/app9245333.
23. Andoga R. et al. Intelligent situational control of small turbojet engines. *Aerosp. Eng.* 2018. Vol. 2018. Art. no. 8328792. DOI: 10.1155/2018/8328792.
24. Chen H. et al. Design of control laws based on inverted decoupling and LMI for a turboprop engine: materials of the ASME Turbo Expo 2019 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Phoenix, Arizona, USA, Jun. 17–21, 2019. Phoenix, 2019. DOI: 10.1115/GT2019-90429.
25. Csank J. et al. Control design for a generic commercial aircraft engine: materials of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Nashville, Tennessee, Jul. 25–28, 2010. Nashville, 2010. DOI: 10.2514/6.2010-6629.
26. Jiang Z. et al. Design of speed closed-loop control with variable pressure difference valve for aero engine: materials of the ASME Turbo Expo 2020 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Virtual, Online, Sept. 21–25, 2020. Online, 2020. DOI: 10.1115/GT2020-14737.

27. Broy M. et al. What is the benefit of a model-based design of embedded software in the car industry. Emerging Technologies for the Evolution and Maintenance of Software Models / ed. by J. Rech, C. Bunse. Hershey : IGI Global, 2011. P. 410–443. DOI: 10.4018/978-1-4666-4301-7.ch017.
28. Prospero F. et al. Model based design of a turbo-compound bottomed to internal combustion engine exhaust gas. J. Phys.: Conf. Ser. 2024. Vol. 2893. Art. no. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2893/1/012095.
29. Parthasarathi H. et al. Model-based systems engineering for aero gas turbine engine subsystems: materials of the INCOSE International Symposium, Bangalore, India, 2016. Bangalore, 2016. Vol. 26(s1). P. 70–82. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2016.00315.x.
30. Kuhn M. R. et al. Model based specifications in aircraft systems design: materials of the 11th International Modelica Conference, Versailles, France, Sept. 21–23, 2015. Versailles, 2015. DOI: 10.3384/ecp15118491.
31. Alras M. et al. Model-based design of embedded control systems by means of a synchronous intermediate model: materials of the International Conference on Embedded Software and Systems, Hangzhou, Zhejiang, P. R. China, May 25–27, 2009. Hangzhou, 2009. DOI: 10.1109/ICISS.2009.36.

Sukhovii S.I., Lakoza S.L., Matsiuk D.M. MODERN TRENDS ANALYSIS OF GAS-TURBINE ENGINE CONTROL SYSTEMS SOFTWARE IMPROVING

The Automatic Control System (ACS) significantly impacts the characteristics that determine the competitiveness of a gas turbine engine (GTE). Improving the accuracy of maintaining set parameters allows GTE to operate closer to its operational limits, thereby enhancing dynamic properties and critical operational parameters such as thrust and fuel consumption while ensuring engine life preservation, reliability, and safety. The accuracy tracking of GTE dynamic modes substantially influences on aircraft piloting capabilities and the probability of successful exit from emergency situations. Modern GTEs utilize electronic digital ACS, achieved peak performance is largely determined by the control unit software. This paper analyzes the main trends in GTE ACS software improvement. It is examined the key stages of ACS development, and identified primary current issues requiring research. In the work it is highlighting four main directions for improvement: the development of relevant mathematical models, optimization of control programs, implementation of advanced control algorithms, and software development technology. Modern trends in GTE mathematical modeling are focused on increasing accuracy and reducing computation time. For tuning programs, the priority is optimizing of parameter selection and searching for superior alternatives; simultaneously. In the field of control algorithms, there is a trend toward both development promising new approaches and the refinement of classical solutions. Although new advanced promising algorithms face drawbacks such as high complexity and long numerical calculation times that limits their implementation in real systems. At the same time, nonlinear controllers based on PID structures using active loop selection logic remain widely used due to their ease of implementation and optimal balance between response speed and control quality. The overall trend in improving of GTE ACS development technology lies in the application of Model-Based Design, which allows to reduce development time, decreasing its cost, and enhancing safety and quality of the system.

Keywords: gas-turbine engine, control algorithm, GTE control system, gas turbine engine, ACS improvement, PID-controller.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026