

М. А. Денисенко, Д. Г. Караман, А. О. Зуєв, М. В. Гунбін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## РЕГУЛЮВАННЯ КРЕНУ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

**Анотація.** В статті розглянуто процес регулювання крена БПЛА з фіксованим крилом з застосуванням прогнозуючої моделі. **Метою** статті є аналіз та оптимізація процесу регулювання крена за допомогою системи автоматичного керування. Проведено аналіз існуючих технічних рішень та математичних моделей, які описують поведінку літального апарату в повітрі. Наведено алгоритм функціонування Model Predictive Control (MPC)-методу, який лежить в основі схеми керування динамічними об'єктами. Було обрано систему динаміки для БПЛА з фіксованим крилом, яка дозволяє якісно підтримувати кут крену близько до нуля градусів. Розглянуто вирішення завдань оптимізації із застосуванням прогнозуючої моделі. За **результатами** дослідження отримано характеристику перехідних процесів для системи регулювання третього порядку.

**Ключові слова:** БПЛА, літак, кут крену, система автоматичного керування, MPC-метод, прогнозуюча модель, передатна функція, оптимізація.

### Вступ

Системи автоматичного керування дають можливість підтримувати необхідні режими роботи різних технічних об'єктів безпосередньо без участі людини. Зокрема, такі системи дозволяють реалізувати програмне керування БПЛА з фіксованим крилом на різних етапах польоту [1], що значно спрощує та робить більш ефективним використання авіаційної техніки, зокрема БПЛА, навіть при вирішуванні складних задач пілотування.

Система автоматичного керування дозволяє використовувати невелику кількість датчиків інформації про стан польоту яку можна отримати від зовнішніх систем. Обчислювальне ядро таких систем забезпечує достатню надійність та стабільність за рахунок багатократного резервування та охоплення системою вбудованого контролю.

В зв'язку з розвитком складності завдань та напрямів застосування БПЛА, також зростає складність алгоритмів керування та продовжується процес автоматизації окремих етапів польоту. Точна модель БПЛА з фіксованим крилом, яка описує його поведінку в повітрі являє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь зі змінними параметрами, методика знаходження рішень яких детально викладена у [2], але її недоліком є значна математична складність, що ускладнює її використання в малорозмірних БПЛА з бортовими комп'ютерами невеликої обчислювальної потужності. В статті буде розглянута більш практична модель керування.

### Огляд існуючих технічних рішень

Одними з перших регуляторів що застосовувались для керування процесом польоту літаків були ПІ- та ПІД-контролери. Вони довели свою ефективність в управлінні різноманітними процесами. Використання таких контролерів не вимагає знання точної моделі процесу, тому вони ефективні в управлінні промисловими процесами, математичні моделі яких досить складні. ПІ- та ПІД-контролери будуються на основі класичної теорії управління та прості для розуміння, тому встановлення зв'язків між параметрами

управління діями системи можуть здійснюватися інженерами-практиками та безпосередньо операторами. Крім того, за останні десятиліття розроблено кілька методів налаштування ПІ- та ПІД-контролерів. Наприклад, Зіглер і Нікольс запропонували метод налаштування, заснований на даних про реакцію на одиничний ступінчастий вплив. Цей метод широко використовувався протягом багатьох років і виявився досить ефективним на практиці. На його основі Такахаші запропонував метод налаштування для ПІ- та ПІД-контролерів з дискретним часом. Більш сучасний спосіб автоматичного налаштування ПІ- та ПІД-контролерів був запропонований Нішикавою у роботі [3]. Він вимагає подачі вхідного випробувального сигналу для оцінки параметрів процесу керування. Оптимальні значення ПІ- та ПІД-параметрів досягаються шляхом мінімізації зваженого інтеграла квадратичної помилки. Однак, поряд з вищезазначеними перевагами, ПІ- та ПІД-контролери мають і ряд недоліків. Так, якщо робоча точка процесу змінюється, параметри контролера потрібно перенастроювати вручну, щоб отримати нове оптимальне налаштування, яке має виконуватися достатньо досвідченим оператором. Для систем із взаємодіючими контурами ця процедура може бути складною та займати багато часу.

Одним із сучасних підходів до аналізу та синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія керування динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC). Цей метод почав розвиватися ще на початку 60-х років ХХ сторіччя, для керування процесами та обладнанням у нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай утруднене у зв'язку з винятковою складністю математичних моделей що застосовуються. Ідея оптимізації прогнозованого програмного руху, що є основою MPC-методів, виникла в рамках двох незалежних, однак близьких по суті підходів. Перший з них, що називається Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil, а другий – Model Algorithmic Control (MAC) – був розроблений французькими інженерами хімічної промис-

ловості. На основі останнього підходу також вперше було створено комерційний пакет програм IDCOM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом сучасної програмної підтримки методів керування з прогнозом.

В наш час MPC-метод перебуває у стадії інтенсивного розвитку, про що свідчить велика кількість опублікованих за останні роки наукових праць, присвячених даній проблематиці, зокрема в [4] детально описується алгоритм побудови таких моделей, але не наведена реалізація метода саме на конкретних прикладах, в тому числі в системах керування. У роботі [5] побудована модель керування з прогнозуванням, показана можливість стабільної роботи об'єкта за таким типом керування, але вона потребує багато кроків для оптимізації процесу, що утруднює її практичне застосування для керування польотом БПЛА. Сфера практичного застосування метода також суттєво розширилася та охоплює технологічні процеси в хімічній [6] та будівельній індустрії, легкій та харчовій промисловості [7], в аерокосмічних дослідженнях, у сучасних системах енергетики тощо. Розвиток ідей керування з прогнозуванням відбувається у напрямі використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим для контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі управління, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу.

**Метою статті** є оптимізація процесу керування креном БПЛА з фіксованим крилом з використанням прогнозуючих моделей. При цьому розглянуто вирішення цього завдання з урахуванням вибору різних критеріїв оптимальності та можливостей їхньої технічної реалізації.

### Результати досліджень

Основною перевагою MPC-методу, що визначає його успішне використання у практиці побудови та

експлуатації систем керування, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатовимірними та багатозв'язаними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі та керовані змінні, враховувати невизначеність у завданні об'єктів та обурень що виникають в процесі керування. Крім того, можливе врахування як транспортного запізнення так і змін критеріїв якості під час процесу, а також відмов датчиків інформаційно-керуючої системи. Алгоритм функціонування MPC-методу, який лежить в основі схеми керування динамічними об'єктами полягає в наступному:

1. Розглядається деяка (достатньо проста) математична модель об'єкта, початковими умовами для якої є його (об'єкту) поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на певному кінцевому відрізку часу - горизонті прогнозування.

2. Виконується оптимізація програмного керування, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних сигналів на горизонті прогнозування.

3. Здійснюється оптимізація з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на управляючі та регульовані змінні.

4. На кроці обчислень, який становить фіксовану малу частину горизонту прогнозування, реалізується знайдене оптимальне керування та здійснюється вимірювання (або відновлення за вимірними змінними) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.

5. Горизонт прогнозування зсувається на крок уперед і повторюються пункти 1-3.

Схема керування за цим методом з урахуванням прогнозування наведена на рис. 1.

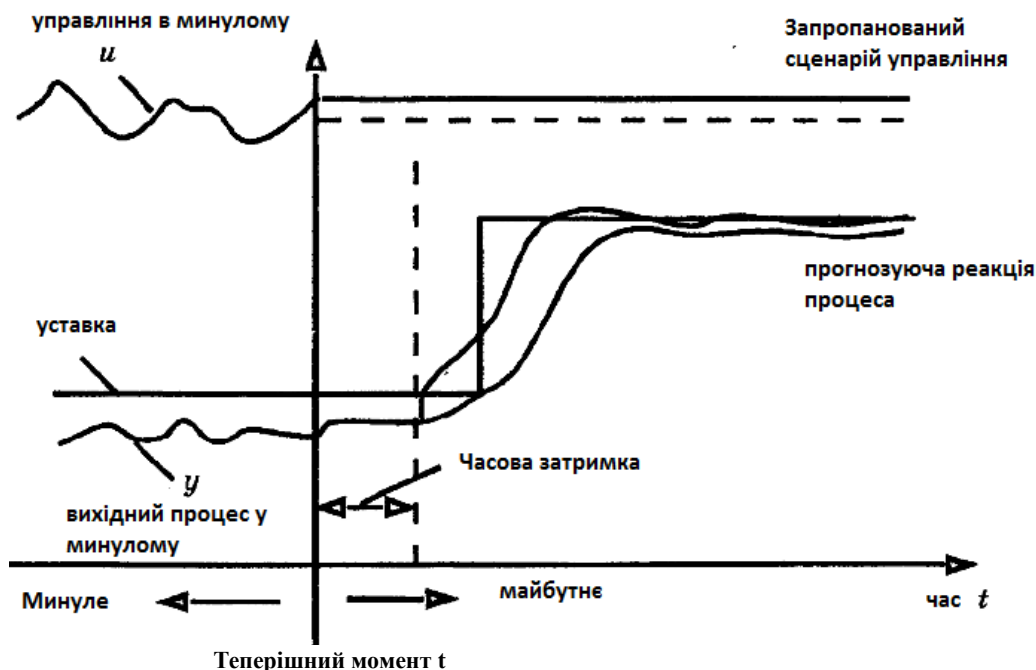


Рис. 1. Схема керування на основі прогнозування

Для розглядання динамічних процесів управління БПЛА з фіксованим крилом, необхідно побудувати математичну модель об'єкта керування. Вона повинна коректно відображати основні властивості реального об'єкта та бути достатньо простою для досліджень. На відміну від математичної моделі керування, яка наведена у [8], в цьому випадку передатна функція не матиме однакових нулів та полюсів, що значно полегшує задачу регулювання.

У багатьох випадках такі спрощення у математичній моделі можуть ефективно використовуватися при аналізі та синтезі як окремих контурів управління, так і системи в цілому.

АЧХ має бути обрана таким чином, щоб при частоті що прагне до 0, амплітуда прагнула до нескінченності, а при великих частотах амплітуда прагнула до 0.

Графік необхідної АЧХ наведено на рис. 2.

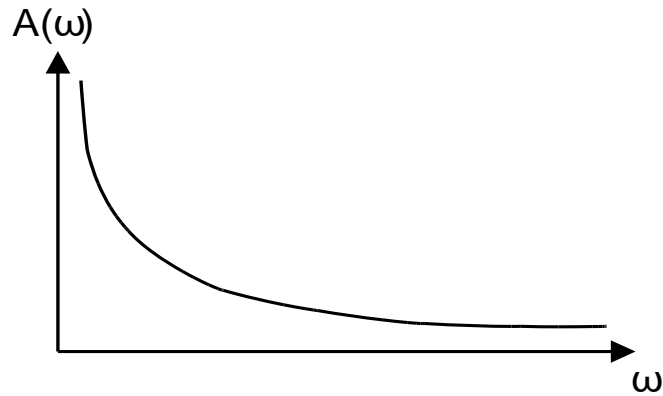


Рис. 2. Графік необхідної амплітудно-частотної характеристики

Система керування положенням БПЛА з фіксованим крилом у повітрі є замкненою і такою що складається з підсилювача, приводу елерона та передатної функції динаміки. Але на відміну від системи що запропонована у [9] доцільно збільшити коефіцієнти аперіодичних ланок, наприклад, до 10 та 11 відповідно, для того щоб досягнути потрібної характеристики наведеної вище. В якості зворотного зв'язку обрано одиничний негативний зв'язок  $K_c = 1$ .

Розглянемо модель динаміки БПЛА з фіксованим крилом у вигляді передатної функції, яка зв'яже відхилення елеронів і кут крену БПЛА з фіксованим крилом. Структурна схема такої моделі наведена на рис. 3.

Згідно з наведеним методом МРС отримана точна передавальна функція:

$$K(p) = \frac{110}{p(p+1)(p+10)}. \quad (1)$$

Тоді амплітудно-частотна характеристика буде мати такий вигляд:

$$A(\omega) = \left| \frac{110}{j\omega(j\omega+1)(j\omega+10)} \right| = \frac{110}{\omega\sqrt{1+\omega^2}\sqrt{100+\omega^2}}. \quad (2)$$

Процес регулювання складається з підтримки кута крену, таким щоб він був близький до нуля за будь-яких непередбачених зовнішніх обурень. Це регулювання на практиці відбувається за допомогою зміни коефіцієнтів підсилювача та гіроскопу.

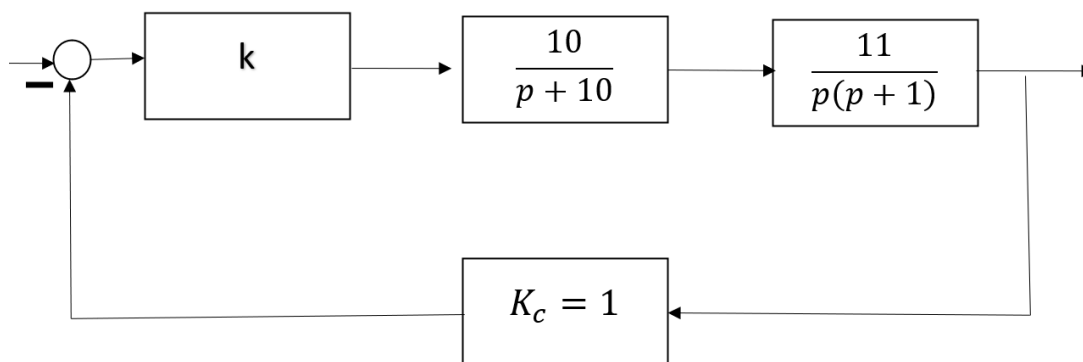


Рис. 3. Структурна схема керування БПЛА з фіксованим крилом

В якості горизонту прогнозування було взято порівняно невеликий інтервал часу [0,40] с, та проведено моделювання процесу регулювання в системі Simulink. На основі розробленої математичної моделі із застосуванням зазначеного метода керування отримано перехідний процес, графік якого наведено на рис. 4.

Отримана характеристика перехідного процесу має відносно низький коефіцієнт перерегулювання (не більше за 15%) та в цілому має вигляд загасаючого процесу, що підтверджує коректність обраної математичної моделі, та можливість її практичного застосування для керування БПЛА за креном.

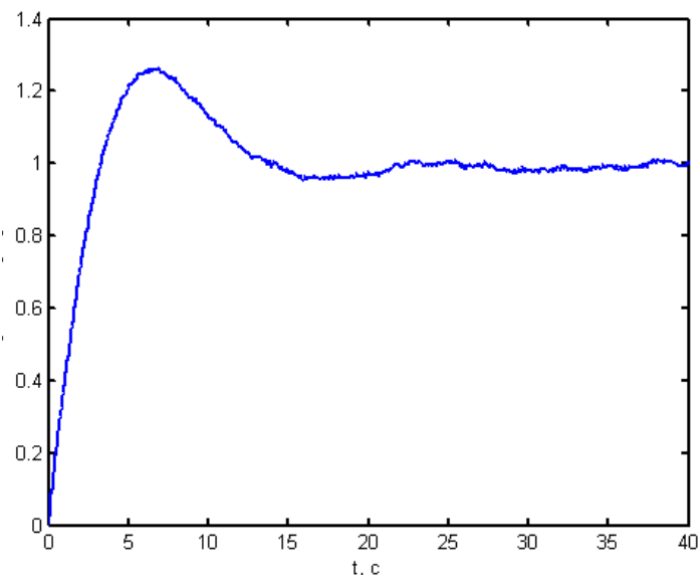


Рис. 4. Графік перехідного процесу

### Висновки

1. Проведений аналіз оптимізації процесу регулювання доводить що метод керування за допомогою прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC), найбільш повно, порівняно з ПІ- та ПІД-управлінням, зв'язує відхилення елеронів та крен без-

пілотного літального апарату з фіксованим крилом, що дозволяє оптимізувати процес керування в режимі реального часу.

2. Отримані залежності амплітудно-частотної характеристики та перехідних процесів регулювання, як системи третього порядку, доводять ефективність застосування цього методу на практиці.

### Список літератури

1. Mani Geetha. Performance Evaluation of Multivariable Optimal and Predictive Controllers on an Aircraft Roll Control System/ Journal of Electrical Engineering, Vol.14. - 2014, p.113-120. ISSN: 1582-4594
2. Maochang Qin, Guihong Fan An effective method for finding special solutions of nonlinear differential equations with variable coefficients// Physics Letters A. – 2008, 372(18):3240-3242 DOI:10.1016/j.physleta.2008.01.058
3. Nishikawa, Y. N Sanomiya, T. Ohta, and H. Tanaka, «A method for auto-tuning of PID control parameters», Automatica, Vol. 20, pp. 321-332, 1984.
4. Bemporad A., Borrelli F., Morari M. Model predictive control based on linear programming – The explicit solution // IEEE transactions on automatic control. 2002. Vol. 47. No 12. P. 1974–1985.
5. Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scaekaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality // Automatica. – 2000. – Vol. 36. – P. 789-814.
6. Diez E., Meyer K., Buck A., Tsotsas E., Heinrich S. Influence of process conditions on the product properties in a continuous fluidized bed spray granulation process // Chemical engineering research and design. – 2018. – Vol. 139. – P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.032>
7. Gao X., Wang J., Wang S., Li Z. Modeling of drying kinetics of green peas by reaction engineering approach / X. Gao [et al.] // Drying Technology. – 2016. – Vol. 34, No 4. – P. 437-442. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1060491>
8. Anatoly Garon, Mykola Denysenko, Andrey Zuev, Natalia Yevsina // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 18-21. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.018>
9. Alexandra Gomes, Afzal Suleman Enhancement of Aircraft Roll Maneuvers Using the Spectral Level Optimization Method MDO Methodologies: Aircraft Design Published Online: 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2004-4608>

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.02.2023

### UAV roll adjustment using a predictive model

Mykola Denysenko, Dmytro Karaman, Andrey Zuev, Mykhailo Gunbin

**Abstract.** The process of roll control for a Fixed-Wing UAV using a predictive model is considered. The **purpose** of the article is the analysis and optimization of the aircraft roll control process using an automatic control system. An analysis of existing technical solutions and mathematical models describing the behavior of the aircraft in the air was carried out. The MPC-method functioning algorithm is presented, which is the basis of the control scheme for dynamic objects. A dynamics system was chosen for a fixed-wing UAV, which allows to qualitatively maintain the roll angle close to zero degrees. The solution of optimization tasks using a predictive model is considered. According to the **results** of the study, the characteristic of transient processes for the third-order control system was obtained.

**Keywords:** UAV, aircraft, roll angle, automatic control system, MPC-method, predictive model, transfer function, optimization.