Лекція 10

СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ СИСТЕМ

Сучасна система керування є сукупністю фізично різнорідних елементів: механічного об’єкта, електроприводів, джерел енергії, сенсорів, обчислювальних модулів, каналів зв’язку та алгоритмів. Повна модель такої системи може містити сотні змінних і параметрів, тому її безпосередній аналіз часто не дає інженеру цілісного уявлення про причини поведінки. Структурне представлення усуває цю проблему шляхом виділення функціонально завершених частин і явного показу зв’язків між ними. Воно не замінює диференціальних рівнянь або моделей у просторі станів, а організовує їх у форму, зручну для аналізу, синтезу та програмної реалізації.

Структурна модель відповідає на питання, які блоки перетворюють інформацію або енергію, які сигнали передаються між ними, де формуються похибки, де діють збурення і які контури зворотного зв’язку визначають замкнену динаміку. Одна й та сама фізична система може мати кілька коректних структурних моделей, оскільки рівень деталізації залежить від завдання. Для аналізу стійкості достатньою може бути передавальна функція одного каналу, для програмної верифікації потрібні окремі моделі сенсорів, затримок і насичень, а для оцінювання енергоспоживання необхідно додатково описати батарею та силову електроніку.

Головний принцип побудови структури полягає у збереженні причиннона слідкових зв’язків. Вихід кожного блока повинен однозначно визначатися його входами, станом і параметрами. Стрілка має позначати конкретний сигнал із визначеною фізичною розмірністю, напрямом передачі та часовою природою. Невизначені позначення на зразок «дані» або «керування» без уточнення змісту приховують інтерфейсні помилки, які під час комп’ютерного експерименту проявляються як неправильні знаки, одиниці, частоти дискретизації або системи координат.

Призначення структурного представлення

Структурним представленням називають формалізований опис системи у вигляді взаємопов’язаних елементів, кожний з яких реалізує певне перетворення. Елемент може бути фізичним пристроєм, математичним оператором, алгоритмом або агрегованою підсистемою. У класичній теорії автоматичного керування блокові схеми відображають перетворення сигналів передавальними функціями, суматори виконують алгебраїчне додавання, а точки розгалуження передають один сигнал у кілька напрямів без зміни. У складних кіберфізичних системах до цього додаються дискретні події, логічні режими, мережеві затримки й обмеження ресурсів.

Структура потрібна передусім для поділу складної задачі на керовані частини. Декомпозиція дає змогу розробляти моделі окремо, визначати межі відповідальності компонентів і перевіряти їх незалежно. Друге призначення полягає у виявленні домінуючих причинно-наслідкових ланцюгів. Наприклад, команда кутової швидкості ротора проходить через цифровий регулятор, обмежувач, електронний регулятор швидкості, двигун, пропелер і механіку апарата. У кожній ланці виникають затримки та нелінійності. Третє призначення – це одержання еквівалентної математичної моделі, придатної для дослідження стійкості, швидкодії та точності.

Добра структурна схема підтримує трасування вимог. Якщо вимога обмежує кут крену, у схемі повинні бути видимими джерело завдання, контур крену, вимірювальний канал, виконавчі органи та відповідні обмеження. Якщо передбачено відмовостійкість, структура має показувати резервні сенсори, блок діагностики й механізм реконфігурації. Завдяки цьому структурна модель стає спільною мовою для фахівців з механіки, електроніки, керування та програмного забезпечення.

Структурне спрощення завжди пов’язане з областю застосовності. Об’єднання двигуна і пропелера в аперіодичну ланку першого порядку є виправданим поблизу робочої точки, але не описує запуск, насичення струму або аеродинаміку за великих швидкостей. Ігнорування перехресних каналів може

бути прийнятним для малих кутів і симетричного апарата, але небезпечним під час агресивного маневру. Разом зі схемою фіксують припущення, робочий діапазон, одиниці сигналів, непевні параметри та явища, що залишилися поза моделлю.

Структурні моделі використовують на всіх етапах життєвого циклу. На концептуальному етапі вони допомагають обрати архітектуру. Під час математичного моделювання визначають склад рівнянь. Під час синтезу регулятора відокремлюють об’єкт від алгоритму. У програмній реалізації задають інтерфейси, а під час випробувань формують точки спостереження й ін’єкції збурень. Водночас схема не є доказом коректності: усі блоки, параметри та зв’язки мають бути підтверджені рівняннями, даними або специфікаціями.

Функціональні та інформаційні моделі

Функціональна модель показує, які функції виконує система і як вони взаємодіють для досягнення мети. Її блоки відповідають діям: вимірюванню, фільтрації, оцінюванню стану, формуванню траєкторії, обчисленню керування, розподіленню команд, створенню сили та руху. Фізичний носій функції може не зазначатися. Наприклад, блок оцінювання орієнтації може поєднувати дані гіроскопа, акселерометра, магнітометра й супутникової навігації незалежно від конкретної апаратної платформи.

Інформаційна модель зосереджується на сигналах, їх семантиці та маршрутах. Для кожного інтерфейсу визначають назву величини, розмірність, систему координат, часову мітку, частоту оновлення, точність, допустимий діапазон і правила оброблення недостовірних значень. Вектор кутової швидкості без зазначення системи координат не є повним інформаційним об’єктом. Аналогічно координати положення повинні бути прив’язані до географічної, локальної або зв’язаної системи та до конкретної часової шкали.

Функціональна та інформаційна моделі взаємодоповнюють одна одну. Перша пояснює призначення блоків, друга умови коректної передачі результатів між ними. Помилка функціональної декомпозиції проявляється у відсутній або

дубльованій функції, а помилка інформаційної моделі у неправильній інтерпретації сигналу. У комп'ютерній моделі обидва види помилок можуть давати правдоподібний графік, тому потрібні перевірки розмірностей, знаків, координат і часової узгодженості.

Для систем автоматичного керування корисно розрізняти задавальні, керувальні, вимірювані, вихідні та збурювальні сигнали. Задавання r(t) формулює бажану поведінку, похибка $e(t) = r(t) - y_m(t)$ утворюється порівнянням із виміряним виходом, регулятор генерує керування u(t), об'єкт створює фактичний вихід y(t), а сенсор формує $y_m(t)$. Збурення d(t) може діяти на вхід або стан об'єкта, тоді як вимірювальний шум n(t) додається у каналі спостереження. Змішування цих впливів призводить до неправильного аналізу чутливості.

Межа системи є частиною постановки. Якщо батарея вважається зовнішнім джерелом сталої напруги, її деградація не може бути пояснена моделлю. Якщо вітер задається зовнішнім збуренням, система не моделює атмосферу, а лише її вплив на апарат. Межу обирають так, щоб вона охоплювала явища, важливі для досліджуваних показників, але не вводила зайвої складності. Для кожної межі визначають входи, виходи та умови взаємодії із середовищем.

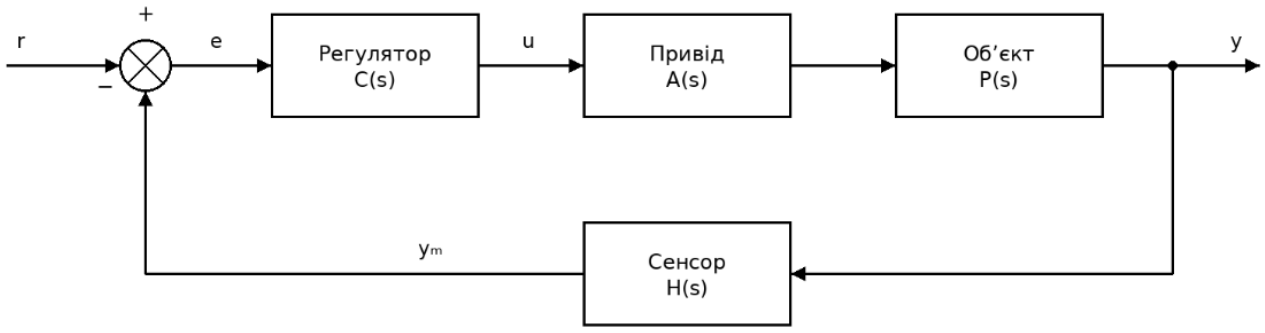


Рисунок 1 – Узагальнене структурне подання замкненої системи керування

Вид моделі	Основне питання	Типові елементи	Результат
Функціональна	Що повинна виконувати система?	Функції та підфункції	Розподіл задач між підсистемами
Інформаційна	Які дані передаються?	Сигнали, формати, частоти, координати	Специфікація інтерфейсів
Динамічна структурна	Як змінюються сигнали в часі?	Ланки, суматори, зворотні зв’язки	Передавальна функція або модель стану
Фізична	Які пристрої реалізують функції?	Сенсори, контролери, приводи, механіка	Склад апаратури та з’єднань

Типові динамічні ланки

Типова динамічна ланка є математичною абстракцією елемента з характерною залежністю між входом і виходом. Для лінійної стаціонарної неперервної системи з нульовими початковими умовами ця залежність задається передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Полюси визначають власні складові руху, нулі – особливості передачі вхідного сигналу, а коефіцієнт підсилення задає статичний масштаб. Типізація дозволяє розпізнавати фізичний зміст параметрів і прогнозувати перехідні та частотні характеристики без повного чисельного експерименту.

Безінерційна, або пропорційна, ланка описується:

$$y(t) = Ku(t)$$

$$W(s) = K$$

Вона миттєво масштабує сигнал та є ідеалізацією підсилювача, перетворення одиниць або квазістатичної залежності. Реальний пристрій не може мати необмежену смугу пропускання, тому безінерційне наближення справедливе лише тоді, коли його внутрішня динаміка значно швидша за досліджувані процеси. Знак K визначає напрям дії, а його розмірність залежить від входу та виходу.

Аперіодична ланка першого порядку має рівняння:

$$T\dot{y} + y = Ku$$

Передавальну функцію:

$$\frac{K}{Ts+1}$$

Її реакція на одиничний стрибок дорівнює:

$$K\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

За час T вихід досягає приблизно 63,2 відсотка усталеного значення, а за 3T близько 95 відсотків. Так моделюють теплові процеси, згладжувальні фільтри, динаміку швидкості двигуна і спрощений канал датчика. Параметр T має бути додатним для стійкої ланки.

Інтегрувальна ланка визначається:

$$\dot{y} = Ku$$

$$W(s) = \frac{K}{s}$$

Сталий вхід спричиняє лінійне зростання виходу, тому скінченне усталене значення відсутнє. Інтегратор природно виникає з кінематичних співвідношень: кут є інтегралом кутової швидкості, координата – інтегралом швидкості. Полюс у нулі означає нейтральну стійкість автономної ланки. У замкненому контурі інтегратор підвищує астатизм, але зменшує запас стійкості.

Диференціювальна ланка в ідеальному вигляді має:

$$y = K\frac{du}{dt}$$

$$W(s) = Ks.$$

Вона підсилює високі частоти й шум, тому фізично реалізується як реальна диференціювальна ланка (обмежує підсилення):

$$W(s) = \frac{KTs}{Ts+1}$$

Диференціювання корисне для передбачення тенденції похибки, демпфування та оцінювання швидкості, однак потребує фільтрації й урахування дискретизації. Чисельне диференціювання зашумлених вимірювань без попередньої обробки є джерелом великих коливань.

Коливальна ланка другого порядку описується:

$$W(s) = \frac{K{\omega_n}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2}$$

де ω_n – власна частота, а ζ – коефіцієнт демпфування. За $0 < \zeta < 1$ перехідний процес є коливальним; зі зростанням ζ перерегулювання зменшується, але реакція може уповільнюватися. За $\zeta = 1$ отримують критичне демпфування, за $\zeta > 1$ – суму двох аперіодичних складових. Такі моделі описують механічні конструкції, сервоприводи та канали орієнтації поблизу робочої точки.

Ланка чистого запізнення має $W(s) = e^{-\tau s}$ і відтворює вхід із часовим зсувом τ. Запізнення не змінює амплітуду гармонічного сигналу, але створює фазове відставання $-\omega\tau$, яке необмежено зростає з частотою. Воно виникає через передачу даних, обчислення, фільтрацію й транспортні процеси. У раціональних моделях запізнення наближують апроксимацією Паде, проте порядок апроксимації має відповідати робочій смузі, оскільки штучні полюси й нулі змінюють високочастотну поведінку.

Ланка	**Передавальна функція**	**Визначальні параметри**	**Типове застосування**
Пропорційна	K	Коефіцієнт K	Підсилення, перерахунок одиниць
Аперіодична першого порядку	$\frac{K}{Ts+1}$	K, стала часу T	Привід, сенсор, фільтр
Інтегрувальна	$\frac{K}{s}$	Швидкість інтегрування K	Кінематика, накопичення
Реальна диференціювальна	$\frac{KTs}{Ts+1}$	K, частота зрізу 1/T	Демпфування, оцінка похідної
Коливальна	$\frac{K{\omega_n}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2}$	ω_n, ζ, K	Механіка, сервосистема
Запізнення	$exp(-\tau s)$	Затримка τ	Мережа, обчислення, транспорт

Послідовне і паралельне з’єднання

За послідовного з’єднання вихід першої ланки є входом другої. Якщо внутрішнє з’єднання не навантажує попередню ланку і всі моделі мають сумісні

змінні, еквівалентна передавальна функція дорівнює добутку $W\text{екв} = W_1 W_2 \dots W_\text{n}$. Порядок множення скалярних передавальних функцій не впливає на результат, але фізичний порядок блоків може впливати через насичення, шум, нелінійність або багатовимірність. Для матричних передавальних функцій множення не є комутативним, тому порядок є принциповим.

Полюси й нулі послідовних ланок об'єднуються. Формальне скорочення однакових множників у чисельнику та знаменнику можливе лише за точного збігу. У реальній системі параметри мають невизначеність, тому скорочення нестійкого полюса стабільним нулем є неприйнятним: прихована внутрішня мода залишається і може зростати. Навіть скорочення стійких швидких мод потребує оцінки похибки в робочому діапазоні.

За паралельного з'єднання один вхід надходить до кількох ланок, а їх виходи алгебраїчно сумуються. Еквівалентна функція дорівнює $W\text{екв} = \Sigma\sigma_\text{i} W_\text{i}$, де σ_i набуває значень +1 або −1 відповідно до знака в суматорі. Паралельна структура використовується для поєднання пропорційної, інтегральної та диференціальної складових регулятора, для суперпозиції фізичних каналів або для введення коригувальної гілки.

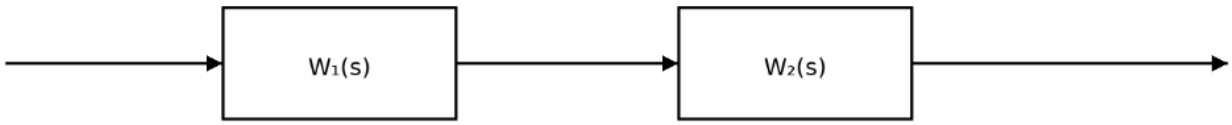
Точки сумування і розгалуження можна переносити через блоки, але при цьому необхідно компенсувати масштаб. Якщо суматор переноситься з входу блока W на його вихід, додаткова гілка повинна пройти через W, у зворотному напрямі через W^{-1}, якщо обернений оператор існує і є фізично змістовним. Перенесення точки відбору через блок аналогічно потребує множення або ділення сигналу. Помилки в цих правилах часто змінюють модель, хоча графічно схема здається подібною.

Еквівалентне перетворення зберігає зовнішній зв'язок між вибраними входами та виходами, але може приховувати внутрішні сигнали, насичення і початкові умови. Тому згорнута передавальна функція придатна для аналізу лінійного каналу, але не завжди для моделювання обмежень або відмов. У програмній моделі блоки доцільно залишати окремими, якщо потрібно

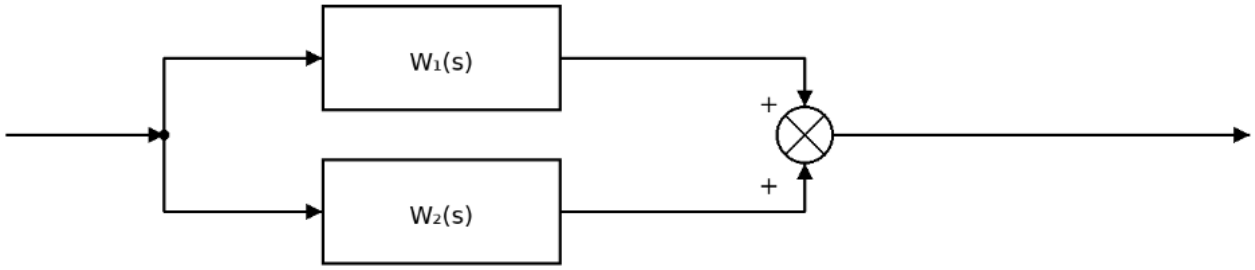
контролювати внутрішні стани, діагностувати насичення або змінювати компоненти незалежно.

$$Wseries(s) = \prod_i W_i(s),$$

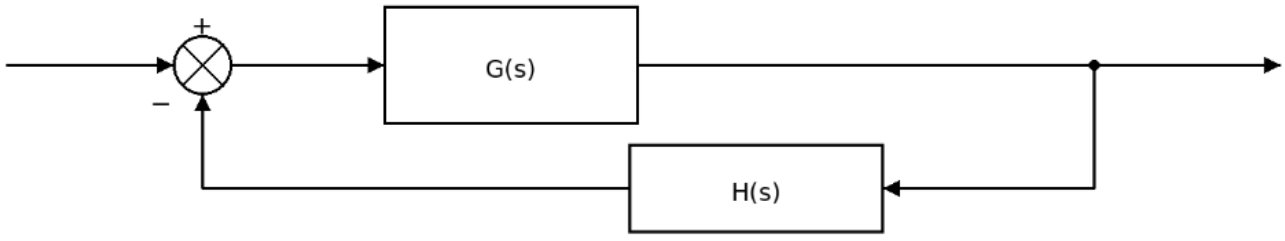
$$Wparallel(s) = \Sigma_i \sigma_i W_i(s)$$



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Основні правила еквівалентного перетворення структурних схем

а) Послідовне з’єднання; б) Паралельне з’єднання; в) Від’ємний зворотний зв’язок.

Додатний і від’ємний зворотний зв’язок

Зворотним зв’язком називають передачу інформації про вихід або внутрішній стан системи на її вхід. У від’ємному зворотному зв’язку виміряний вихід віднімається від завдання, тому збільшення виходу зменшує похибку. Для

прямого каналу G(s) і каналу зворотного зв'язку H(s) замкнена передавальна функція від завдання до виходу дорівнює:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Добуток $L(s) = G(s)H(s)$ називають петльовою передавальною функцією, а рівняння $1 + L(s) = 0$ визначає характеристичні корені замкненої системи.

Від'ємний зворотний зв'язок зазвичай зменшує чутливість до зміни параметрів прямого каналу, пригнічує вихідні збурення і розширює робочу смугу. Функція чутливості $S(s) = \frac{1}{1+L(s)}$ описує передачу багатьох збурень і похибок моделі, а комплементарна чутливість $T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)}$ проходження завдання та вимірювального шуму залежно від місця його введення. Виконується тотожність $S + T = 1$, тому неможливо одночасно зробити обидві функції малими на всіх частотах.

Велике петльове підсилення на низьких частотах зменшує усталену похибку та вплив повільних збурень. На високих частотах велике підсилення небажане, оскільки пропускає шум, збуджує невраховані моди та збільшує керувальні дії. Практичний синтез формує L(s) так, щоб низькочастотна точність поєднувалася з достатнім спадом на високих частотах і запасами стійкості. Запізнення та немінімально-фазові нулі обмежують можливу швидкодію.

Додатний зворотний зв'язок утворюється, коли сигнал зворотного каналу додається до входу. Тоді $T^+(s) = \frac{G(s)}{1-G(s)H(s)}$, а характеристичне рівняння має вигляд $1 - L(s) = 0$. Додатний зв'язок підсилює відхилення і часто зменшує стійкість, однак він не є безумовно помилковим. Його застосовують у генераторах, тригерах, схемах гістерезису та для створення нестійкої поведінки, якщо це є функціональною метою. В системі стабілізації ненавмисний додатний знак майже завжди призводить до розбігання.

Знак зворотного зв'язку визначається не лише символом у суматорі, а сукупністю знаків усіх перетворень. Зміна орієнтації сенсора, напряму обертання двигуна, системи координат або знака коефіцієнта може перетворити задуманий

від’ємний зв’язок на додатний. Саме тому перед замиканням реального контуру виконують перевірку напряму реакції з малим безпечним сигналом і обмеженим керуванням.

Стійкість не випливає автоматично з від’ємного знака. Якщо на частоті, де модуль $L(j\omega)$ близький до одиниці, сумарне фазове відставання наближається до 180 градусів, від’ємний зв’язок фактично діє як додатний. Запаси за фазою й амплітудою кількісно показують віддаленість від цієї умови. У часовій області недостатні запаси проявляються великим перерегулюванням, слабко затухаючими коливаннями та чутливістю до затримок.

У багатоконтурних системах внутрішній контур має бути достатньо швидшим за зовнішній, щоб зовнішній регулятор міг розглядати його як наближену ланку. Наприклад, у мультикоптері контур кутової швидкості вкладений у контур кута, той у контур швидкості, а швидкість у контур положення. Надмірне зближення смуг пропускання спричиняє взаємодію контурів. Аналіз лише кожного контуру окремо може пропустити спільну нестійку моду.

Вплив	**Від’ємний зворотний зв’язок**	**Додатний зворотний зв’язок**
Похибка	Зазвичай зменшується в робочій смузі	Зазвичай збільшується
Чутливість до параметрів	Зменшується за великого $\|L\|$	Зростає поблизу $1-L=0$
Стійкість	Може поліпшуватися, але залежить від фази	Часто погіршується; інколи є метою
Шум сенсора	Може проходити на високих частотах	Може додатково підсилюватися
Типові застосування	Стабілізація, стеження, придушення збурень	Генерація, гістерезис, перемикання

Декомпозиція безпілотної системи

Безпілотна система є багаторівневим кіберфізичним комплексом. Її доцільно декомпозувати не лише за апаратними компонентами, а й за часовими масштабами та функціями. Верхній рівень формує завдання місії, маршрут і обмеження. Рівень навігації оцінює положення, швидкість, орієнтацію та стан

середовища. Рівень керування перетворює бажаний рух на узагальнені сили й моменти. Розподілювач керування визначає команди окремих приводів. Нижній рівень охоплює силову установку, механіку апарата та сенсори.

Планувальник траєкторії працює з картою, перешкодами, запасом енергії та обмеженнями динаміки. Його виходом має бути не абстрактний маршрут, а часова або геометрична траєкторія з допустимими швидкостями, прискореннями й кривизною. Для літального апарата планувальник також ураховує вітер, заборонені зони та мінімальні висоти. У структурній моделі слід відокремлювати планування шляху від генерації локального завдання, оскільки вони мають різні частоти оновлення і джерела даних.

Підсистема оцінювання стану поєднує інерціальні, супутникові, магнітні, барометричні та візуальні вимірювання. Її структурна модель містить моделі сенсорів, синхронізацію, попередню фільтрацію, прогноз стану та корекцію. Важливо показати зворотні інформаційні зв’язки: оцінена орієнтація потрібна для перетворення прискорень між системами координат, а прогнозоване положення використовується для асоціації візуальних ознак. Затримка одного джерела не повинна помилково трактуватися як вимірювання поточного стану.

Система керування часто має каскадну структуру. Зовнішній контур положення формує бажану швидкість або прискорення, контур швидкості – бажані сили, контур орієнтації – потрібні кутові швидкості, а внутрішній контур кутової швидкості – моменти. Для наземного робота декомпозиція може включати контури траєкторії, лінійної та кутової швидкості й струму двигуна. Кожний контур повинен мати чітко визначені входи, обмеження та смугу пропускання.

Розподілення керування перетворює бажаний вектор сил і моментів на команди виконавчих органів. У мультикоптері це тяги роторів, у літаку – відхилення рулів і тяга, у мобільному роботі – моменти коліс. Матриця ефективності залежить від геометрії та стану приводів. За надлишкової кількості приводів задача має багато розв’язків і може оптимізувати енергію або запас до

насичення. За відмови структура реконфігурується, а недосяжні команди мають бути проєктовані на допустиму область.

Модель приводу включає затримку, електричну та механічну динаміку, насичення, швидкісні обмеження, мертву зону і температурні залежності. Якщо ці ефекти виключено зі структурної моделі, регулятор може вимагати фізично нереалізованих команд. Антинасищення є окремим зворотним зв'язком, який запобігає накопиченню інтегральної складової. Для безпечного моделювання обмежувачі слід ставити в тих самих місцях, що й у реальній системі.

Динаміка апарата охоплює кінематику, рівняння поступального й обертального руху, аеродинамічні або контактні сили та модель середовища. Збурення вводять у фізично правильній точці: порив вітру змінює відносну повітряну швидкість і сили, нерівність поверхні діє через контакт колеса, а зміна маси впливає на інерцію та тягові можливості. Просте додавання випадкового сигналу до координати не відтворює цих механізмів.

Структура безпеки існує паралельно до основного контуру. Вона охоплює моніторинг достовірності сенсорів, контроль меж стану, виявлення відмов, аварійні режими й незалежні обмеження команд. Сигнал аварійного припинення не повинен залежати від тієї самої функції, відмову якої він має компенсувати. У моделі перевіряють не лише номінальну траєкторію, а й переходи між режимами, втрату зв'язку, деградацію навігації та насичення приводів.

Декомпозиція для комп'ютерного експерименту повинна підтримувати заміну рівнів точності. На ранньому етапі об'єкт може бути лінійною моделлю, а сенсори ідеальними. Далі додають нелінійну шестиступеневу динаміку, дискретні регулятори, квантування, затримки, мережеві втрати, моделі енергії та відмов. Незмінні інтерфейси між блоками дозволяють порівнювати результати й визначати, яке ускладнення спричинило зміну поведінки.

Верифікація виконується знизу вгору. Спочатку перевіряють окремі блоки на аналітичних випадках і фізичних межах, потім послідовні ланцюги, внутрішні контури та всю систему. Корисними є тести одиниць і знаків, нульового входу, сталого режиму, збереження енергії або імпульсу, граничних значень і

відтворюваності. Після цього проводять сценарні експерименти із збуреннями та варіацією параметрів. Структурна модель полегшує локалізацію розбіжності між очікуваним і фактичним результатом.

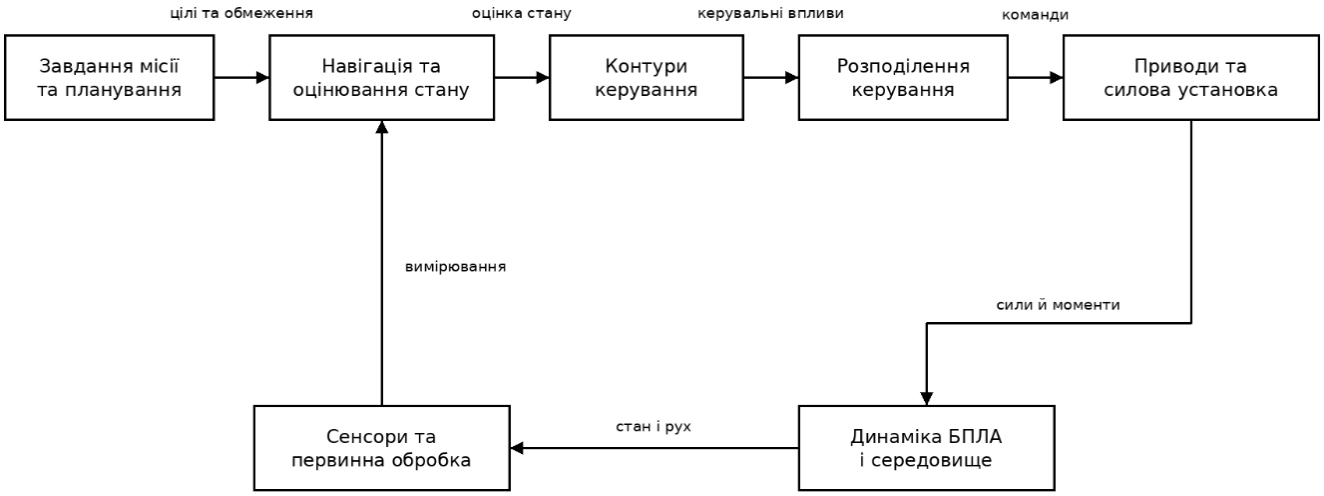


Рисунок 3 – Декомпозиція основних функцій і потоків інформації безпілотної системи

Підсистема	Основні входи	Основні виходи	Критичні ефекти
Планування	Місія, карта, обмеження	Маршрут, траєкторія	Перешкоди, запас енергії
Оцінювання стану	Вимірювання, модель руху	Поза, швидкість, невизначеність	Шум, зміщення, затримка
Керування	Завдання, оцінка стану	Сили, моменти	Стійкість, насичення, запас фази
Розподілення	Бажані сили й моменти	Команди приводів	Геометрія, відмови, обмеження
Приводи	Команди, живлення	Тяга, момент, переміщення	Запізнення, мертва зона, температура
Об’єкт і середовище	Дії приводів, збурення	Рух і фізичні стани	Нелінійність, вітер, контакт

Практичний алгоритм побудови структурної моделі

Побудову починають із формулювання мети моделі та переліку показників, які потрібно обчислити. Далі задають межу системи, зовнішні входи, виходи й збурення. Фізичний процес поділяють на функціональні блоки так, щоб

кожний блок мав однозначне призначення і придатну математичну модель. Для всіх сигналів створюють словник із позначеннями, одиницями, координатами та частотами. Після цього вибирають рівень деталізації, записують рівняння блоків і перевіряють узгодженість інтерфейсів.

На наступному етапі визначають контури зворотного зв’язку та знаки в суматорах, відокремлюють задавальні впливи від збурень і шуму. Лінійну частину за потреби згортають до еквівалентних передавальних функцій, але нелінійності, насичення й перемикання зберігають явно. Структуру реалізують у середовищі моделювання, задають початкові умови й часову організацію дискретних блоків. Кожне спрощення супроводжують припущенням і критерієм, за яким воно може бути визнане неприйнятним.

Завершальний етап включає структурну верифікацію: перевірку замкненості необхідних потоків, відсутності алгебраїчних петель без фізичного змісту, правильності напрямів та розмірностей. Потім виконують чисельні тести від окремих блоків до повної системи. Результатом є не лише схема, а комплект взаємопов’язаних матеріалів: діаграма, словник сигналів, рівняння блоків, перелік параметрів, початкові умови, припущення, сценарії та критерії прийнятності.

Контрольні запитання

1. Яке призначення структурного представлення системи керування?
2. Чим структурна модель відрізняється від повної математичної моделі?
3. Які відомості має містити опис сигналу в інформаційній моделі?
4. Як пов’язані функціональна та інформаційна моделі?
5. Які властивості має аперіодична ланка першого порядку?
6. Чому ідеальне диференціювання непридатне для зашумлених сигналів?
7. Як параметри коливальної ланки впливають на перехідний процес?
8. Як обчислюється еквівалентна функція послідовного з’єднання?
9. За яких умов формальне скорочення полюса і нуля є небезпечним?
10. Як переносити суматор або точку відбору через блок?