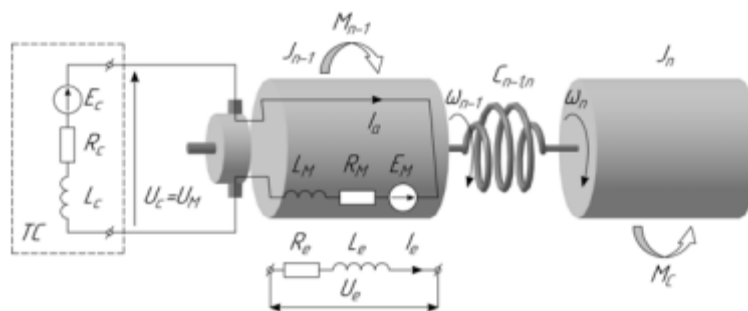


## Конспект (опорний)

### 1. ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНУ СИСТЕМУ

**Електромеханічна система** – це сукупність механічних та електричних компонентів, які взаємодіють для виконання певної функції. Такі системи знаходять широке застосування у різних галузях промисловості, побутової техніки та транспорту. В основі роботи електромеханічних систем лежить перетворення електричної енергії на механічну або навпаки, що досягається за допомогою електромеханічних перетворювачів, таких як двигуни, генератори, електромагнітні приводи та датчики.



По матеріалам [<https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper36.pdf>]

Кожна електромеханічна система складається з кількох ключових елементів:

1. **Електрична частина** – це джерело живлення, керуюча електроніка та електричні ланцюги, які забезпечують подачу та контроль напруги та струму для функціонування системи.

2. **Механічна частина** – це елементи, що рухаються, які перетворюють електричну енергію в механічну роботу. Приклади таких компонентів – вали, підшипники, редуктори та передавальні механізми.

3. **Система керування** – найважливіші елементи, які забезпечують зворотний зв'язок та дозволяють системі працювати точно та ефективно. Датчики вимірюють різні параметри, такі як швидкість обертання, положення або струм, а контролери аналізують ці дані та регулюють роботу

системи.

Принцип дії будь-якої електромеханічної системи полягає у керуванні електричними сигналами для створення руху або іншого типу механічної роботи. Наприклад, у двигуні постійного струму електричний струм подається на обмотки ротора, створюючи магнітне поле, яке взаємодіє з магнітним полем статора, викликаючи обертання ротора. У генераторах відбувається зворотний процес: механічна енергія обертання перетворюється на електричну.

Сучасні електромеханічні системи часто включають елементи автоматичного управління. Це дозволяє значно підвищити їхню точність і швидкість роботи, а також знизити вплив зовнішніх факторів, таких як тертя або інерція. Важливу роль відіграє програмне забезпечення, яке відповідає за обробку даних від датчиків та коригування сигналів, що управляють.

## **2. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ВИДІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

Електромеханічні системи відіграють важливу роль у сучасному світі, будучи ключовим компонентом безлічі пристроїв та технологій, які ми використовуємо у повсякденному житті. Ці системи є комбінацією електричних і механічних компонентів, що взаємодіють один з одним для виконання різних завдань. В залежності від призначення та конструкції електромеханічні системи можна поділити на кілька основних видів.

**Електродвигуни** – один із найпоширеніших видів електромеханічних систем. Їхня основна функція – перетворення електричної енергії в механічну роботу, що дозволяє рухати механізми, машини та пристрої. Існує кілька типів електродвигунів, таких як:

- **Двигуни постійного струму (DC)** – широко використовуються в тих пристроях, де потрібне точне керування швидкістю, наприклад, у робототехніці або електротранспорті.



- **Двигуни змінного струму (АС)** – знаходять застосування у промислових установках, вентиляційних системах та побутовій техніці завдяки своїй високій надійності та енергоефективності.



- **Крокові двигуни** – застосовуються в тих областях, де необхідне точне керування положенням, наприклад, у 3D-принтерах та верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПУ).



Електроприводи є системою, яка включає двигун і керуючу електроніку. Вони забезпечують передачу та контроль руху в механічних

системах, що необхідно для роботи машин та механізмів у різних промислових та побутових додатках.

**Генератори** – це пристрої, які перетворюють механічну енергію на електричну. Цей процес навертений принципом роботи електродвигунів. Генератори використовуються на електростанціях, автомобілях, літаках та інших транспортних засобах, а також у резервних системах енергопостачання.

Основні види генераторів включають:

-**Синхронні генератори**, що використовуються в енергосистемах для вироблення електроенергії.

-**Асинхронні генератори**, що застосовуються у більш простих системах, де не потрібна жорстка синхронізація частоти струму.

### **Електромеханічні датчики та виконавчі механізми**

Датчики – найважливіші елементи сучасних електромеханічних систем. Вони використовуються для вимірювання різних параметрів, таких як швидкість, положення, температура, тиск та інші. Датчики перетворюють фізичні величини на електричні сигнали, які потім обробляються для управління системою.



### **Роботи та роботизовані системи**

Роботи та автоматизовані системи – це високотехнологічні електромеханічні пристрої, які можуть виконувати найскладніші завдання з високою точністю. Сучасні промислові роботи використовують електромеханічні системи для управління своїми рухами, що робить їх незамінними у виробничих процесах, особливо в автомобільній та

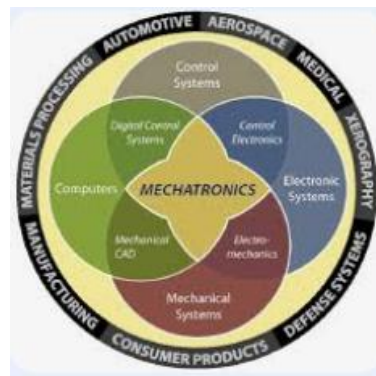
електронній промисловості.

Роботи можуть включати різні види двигунів, датчиків і контролерів для виконання завдань, таких як складання, зварювання, упаковка і транспортування. Ці системи також відіграють важливу роль у медицині, наприклад, у хірургічних роботах, які дозволяють проводити операції з мінімальними розрізами та високою точністю.

## Мехатронні системи

Мехатронні системи являють собою складніший тип електромеханічних систем, що включає в себе механічні, електричні, електронні та комп'ютерні компоненти. Цей міждисциплінарний напрямок поєднує в собі електроніку, механіку та програмне забезпечення для створення високоінтелектуальних систем. Прикладом мехатронних систем є сучасні автомобілі, оснащені автоматичними коробками передач, системами стабілізації, адаптивним круїз-контролем та системами допомоги водієві.

Електромеханічні системи мають широке застосування в різних галузях, від транспорту і промисловості до побутової техніки та медицини. Різні види таких систем виконують найважливіші функції, починаючи від руху механізмів до вироблення електричної енергії та автоматизації складних процесів. Розвиток цих технологій продовжує вдосконалюватись, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності та точності роботи систем.



### 3. Теоретичні підходи до аналізу електромеханічних систем

#### Побудова моделі простої електромеханічної системи

Розглянемо електромеханічну систему на прикладі вентилятору з електроприводом постійної напруги. Схема наведена на рис. 1.

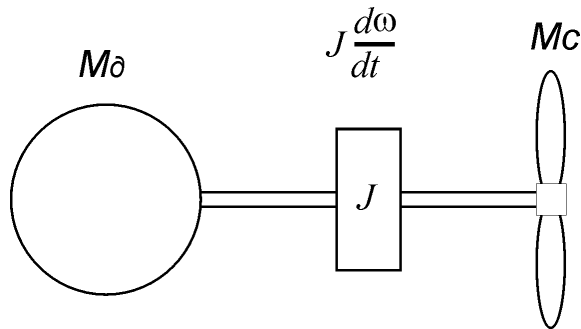


Рисунок 20

Вона складається з двигуна, вентилятору, еквівалентного маховика (маси, що обертається) та валу, що механічно з'єднує всі елементи системи. Двигун, вал та вентилятор не мають маси, та відповідно і момент інерції. Вона зосереджена у еквівалентному маховику.

У системі діють три моменти:

$M_d$  - момент двигуна (електричної машини постійного струму);

$M_c$  - момент вентилятору;

$J \frac{d\omega}{dt}$  - динамічний момент, що створює еквівалентний маховик.

$$J \frac{d\omega}{dt}$$

Система описується рівнянням балансу моментів :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c$$

(1)

З рівняння видно, що динамічний момент виникає у випадку нерівності

моменту джерела механічної енергії (в нашому випадку - це двигун) та споживача механічної енергії (в нашому випадку - це вентилятор):

$$M_d \neq M_c$$

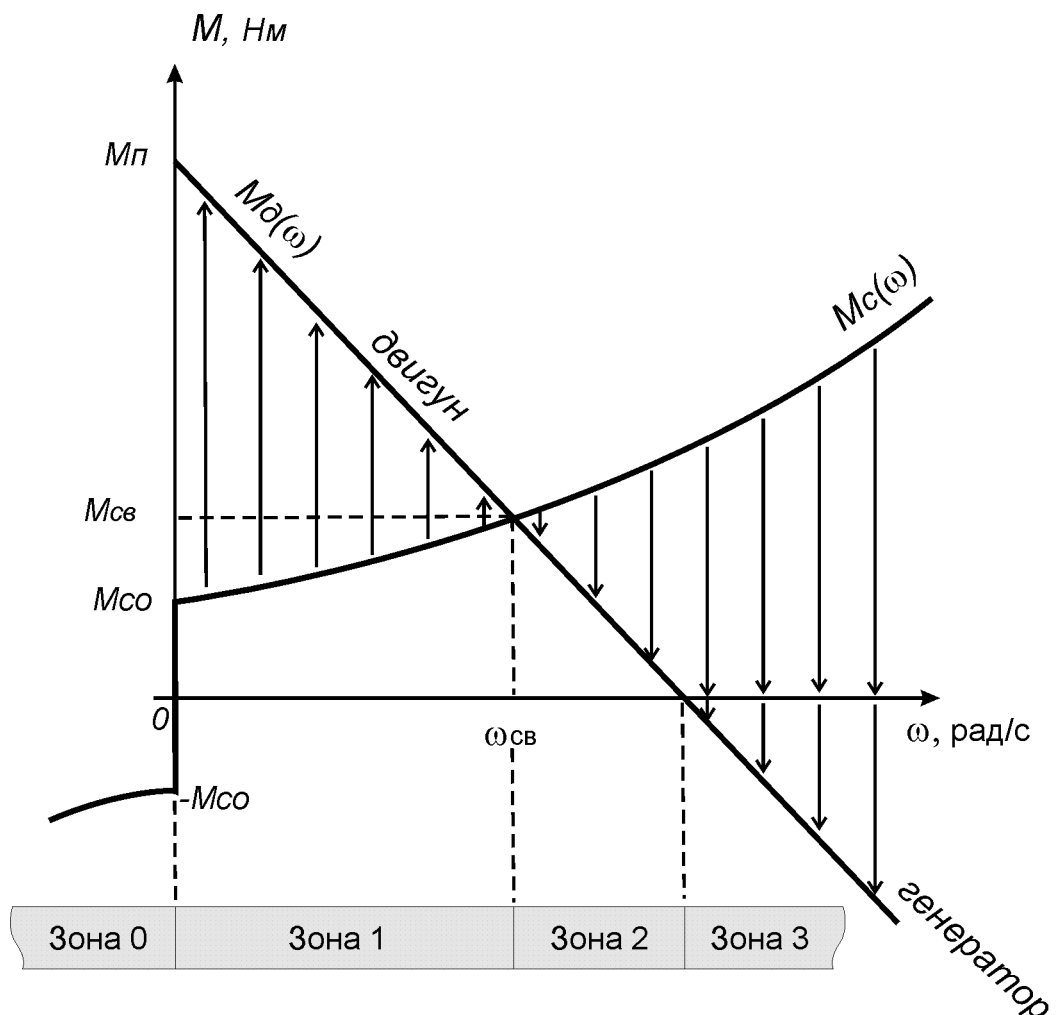
Причому, якщо значення динамічного моменту є позитивним (тобто  $M_d > M_c$ ), то механічна система прискорюється, а якщо його значення

$$\frac{d\omega}{dt} > 0$$

негативне (тобто  $M_d < M_c$ ), то система, відповідно, гальмується.

$$\frac{d\omega}{dt} < 0$$

Більш наочно поведінку електромеханічної системи можна проілюструвати у системі координат механічної характеристики двигуна та вентилятора (рис. 2).



## Рисунок 2

На рисунку показано варіант спрощеної механічної характеристики двигуна постійного струму (ДПС) з незалежним збудженням. Його механічна характеристика має характерні точки:

- точка пускового моменту -  $M_{\text{п}}$ ;
- точка холостого ходу -  $\omega_{\text{хх}}$ .

Розглянемо режими роботи електромеханічної системи у різних зонах, відповідно до кутовій швидкості обертання -  $\omega$  (дивись рис.21).

У зоні 1 момент двигуна -  $M_{\text{д}}$  перевищує момент навантаження -  $M_{\text{с}}$ .

Відповідно, динамічний момент має позитивне значення і система прискорюється.

Динамічний момент зображається на рисунку у вигляді вертикальної стрілки, що починається на механічній характеристиці споживача механічної енергії та закінчується на характеристиці джерела механічної енергії і відповідає певній швидкості обертання. Напрямок - угору відповідає режиму прискорення, а напрям - донизу відповідає гальмуванню електромеханічної системи.

У зоні 2 видно, що система гальмується. На кордоні зон 1 та 2 знаходиться точка рівноваги механічних моментів, точка перетину механічних характеристик двигуна та вентилятора  $M_{\text{д}} = M_{\text{с}}$ .

Наявність напрямів прискорення та гальмування, що направлені на точку рівноваги, вказує на те, що ця точка є точкою стійкої рівноваги (дивись рис. 3).



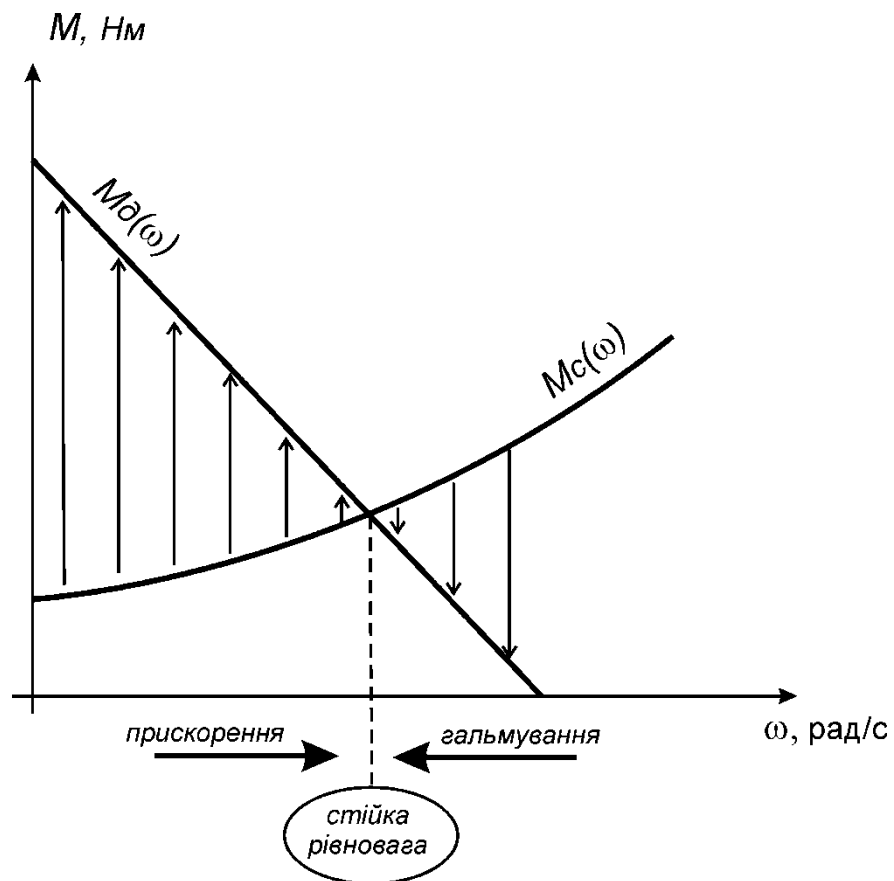


Рисунок 3

Якщо ж напрями прискорення та гальмування направлені від точки рівноваги, та ця точка є точкою нестійкої рівноваги (дивись рис. 4).

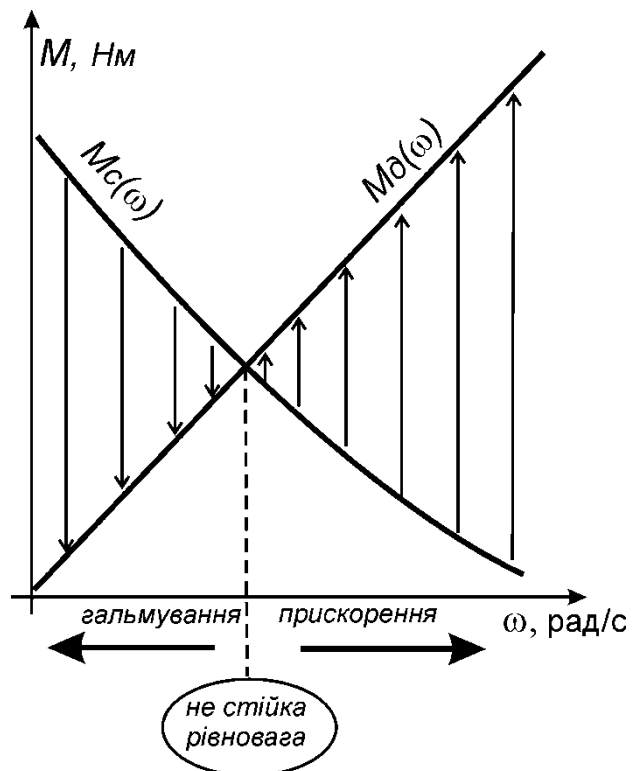


Рисунок 4

У зоні 3 електрична машина перестає бути двигуном і стає генератором, тобто він з джерела механічної енергії перетворюється на споживача механічної енергії. Відповідно у зоні 3 існують два споживача механічної енергії. Єдиним джерелом енергії є у цей момент маховик. Він витрачає кінетичну енергію, що була накопичена у масі, що обертається.

Розібравшись з фізичною стороною поведінки електромеханічної системи повернемося до побудови її математичної моделі. Проінтегруємо рівняння (1):

$$J \cdot d\omega = (M_d - M_c) \cdot dt'$$

$$\int J \cdot d\omega = \int (M_d - M_c) \cdot dt'$$

$$\omega = \frac{1}{J} \int (M_d - M_c) \cdot dt + \omega(0)$$

(2)

Отриманому рівнянню відповідає наступна блок-схема математичної моделі (Рис. 5).

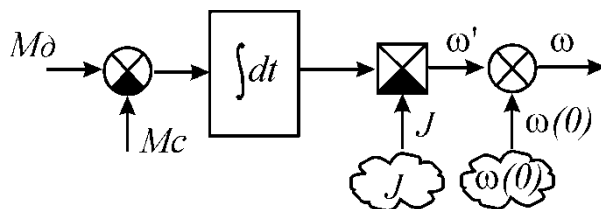


Рисунок 5

Слід звернути увагу на появу константи інтегрування  $\omega(0)$ , що відображає початкове значення кутовий швидкості обертання на початку моделювання.

Вхідними змінними моделі рис. 5 є момент двигуна -  $M_{\delta}$  та момент навантаження -  $M_c$ , а вихідною є кутова швидкість обертання.

Момент навантаження, у даному прикладі, має вентиляторну характеристику

$M_c = M_c(\omega)$ , яка описується наступним загальним рівнянням:

$$M_c(\omega) = K_{вен} \cdot \omega^2 + M_{c0} \quad (3)$$

де:  $K_{вен}$  - коефіцієнт пропорційності, що характеризує вентилятор;

$M_{c0}$  - момент тертя спокою.

Залежність (3) відповідає наступному ескізу (рис. 6).

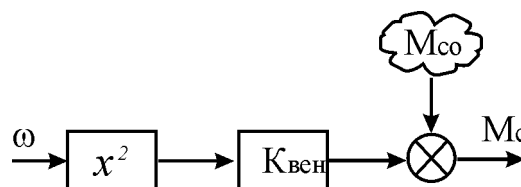


Рисунок 6

Слід відзначити особливу групу точок, що відповідають  $\omega = 0$  на характеристиці навантаження (дивись рис. 21). Використання блок-схеми, що зображена на рисунку 25 можливо тільки в режимах де  $\omega \neq 0$ . При  $\omega = 0$  ця схема буде не адекватною, момент тертя спокою перетвориться у момент прискорення для протилежного напрямку обертання. Тому, якщо моделювання вентиляторної характеристики потрібно проводити у діапазоні -  $(-\infty < \omega < +\infty)$  можна застосувати блок-схему, що зображена на рисунку 7.

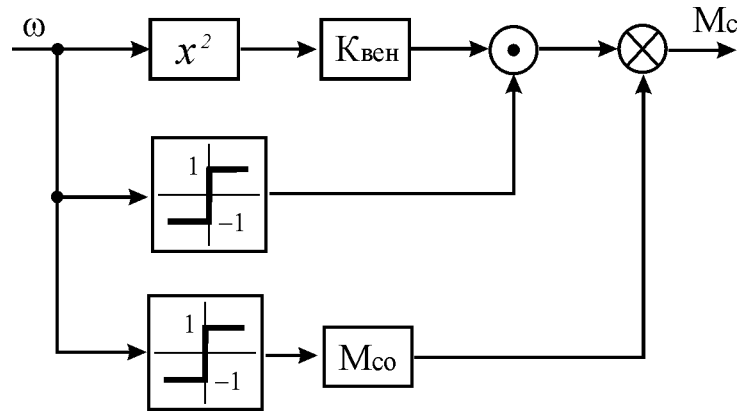


Рисунок 7

Ця блок-схема моделює характеристику вентилятору, що відображена на рисунку 7.

Застосування помножувача та релейного елемента дозволяє враховувати напрям обертання.

Блок схема, що показана на рисунку 7 дозволяє моделювати симетричну вентиляторну характеристику. Якщо вентилятор не є симетричним (з певних аеродинамічних властивостей), то можна запропонувати модель, зображену на рисунку 8.

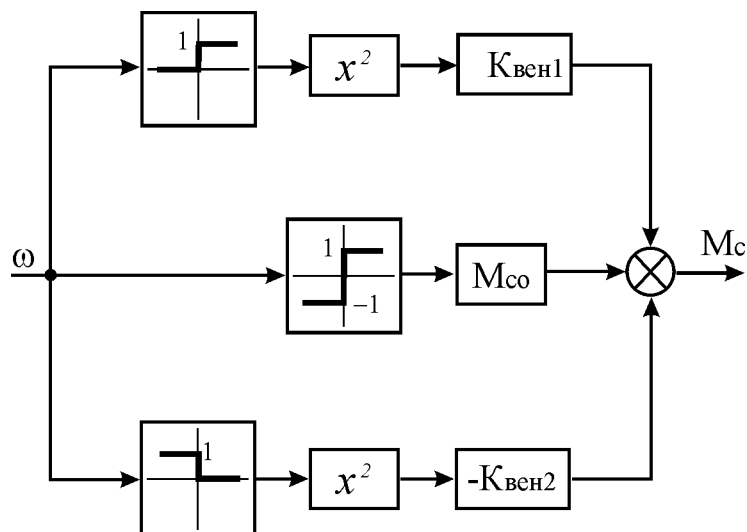


Рисунок 8

Слід звернути увагу, що коефіцієнти вентилятору для різних напрямів обертання можуть бути різними:

$$K_{вен1} \neq K_{вен2}'$$

що узгоджується з реальним фізичним уявленням про аеродинаміку вентилятору.

Модернізуючи блок-схему аеромеханічної системи отримуємо наступну блок-схему (дивись рис. 9).

Електрична машина (двигун) є перетворювачем електричної енергії у механічну. При умовах підтримки постійного магнітного потоку його можна у моделі описати за допомогою рівнянь:

$$E_{Я} = K_E \cdot \omega' \quad (4)$$

$$M_{\partial} = K_M \cdot I_{Я}' \quad (5)$$

де:  $E_{Я}$  - електрорушійна сила (ЕРС) якоря,

$K_E, K_M$  - конструктивні коефіцієнти,

$I_{Я}$  - струм якоря.

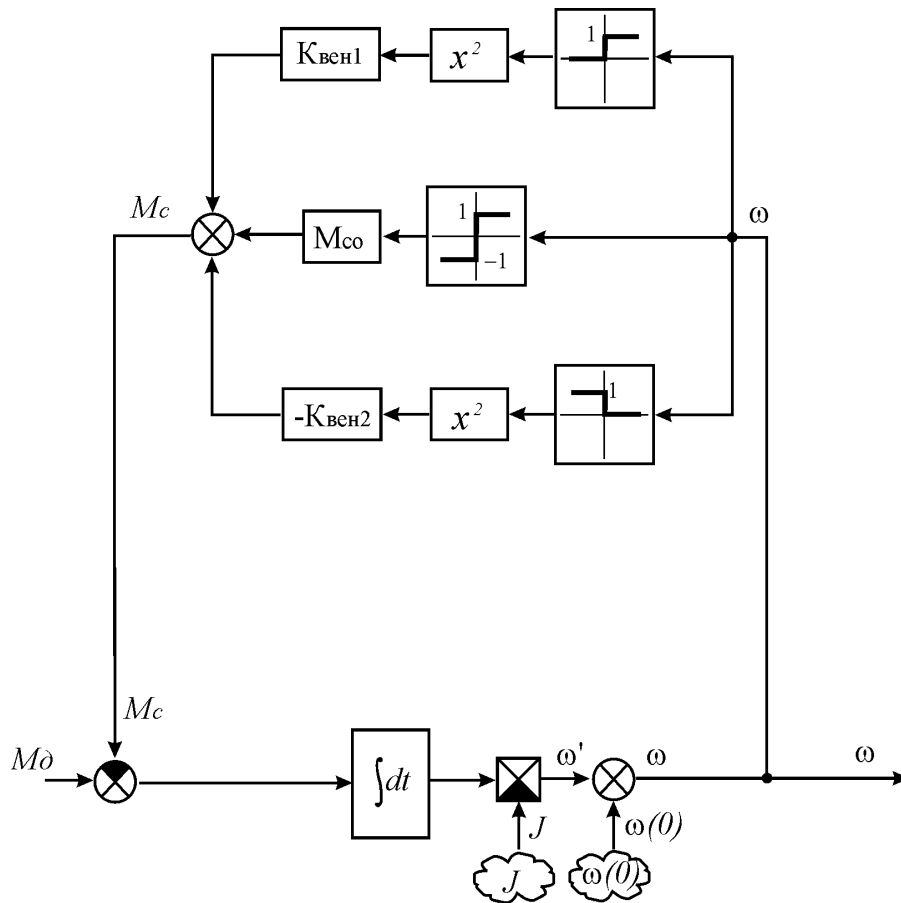


Рисунок 9

Відповідно до (4) та (5) ідеальний електромеханічний перетворювач (електричну машину) можна зобразити у вигляді ескізу, що показаний на рисунку 10.

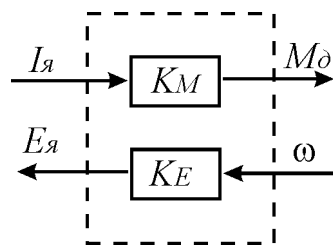


Рисунок 10

Далі розглянемо схему заміщення кола якоря (дивись рис. 11).

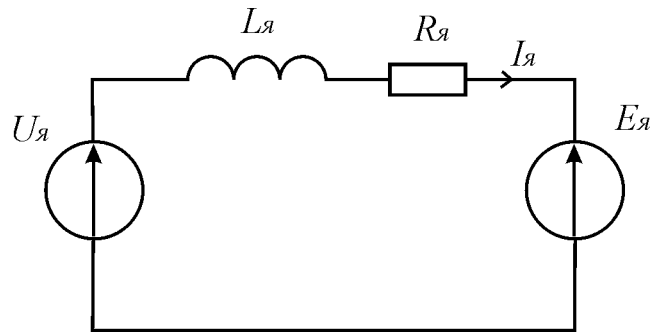


Рисунок 11

На схемі (рис.30) позначено:

$U_{\text{я}}$  - напруга, що підводиться до затисків якоря,

$L_{\text{я}}$  - індуктивність якірного кола (до неї може входити не тільки індуктивність самого якоря, а й індуктивність фільтру джерела живлення),

$R_{\text{я}}$  - активний опір якірного кола (до нього може входити, крім активного опору обмоток якоря та струмозбірних щіток, ще й внутрішній опір джерела живлення).

Рівняння балансу напруги, відповідно до другого закону Кірхгофа, для цієї схеми має наступний вигляд:

$$L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = U_{\text{я}} - E_{\text{я}} - i_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (6)$$

Проінтегруємо вираз (7):

$$L_{\text{я}} \cdot di_{\text{я}} = (U_{\text{я}} - E_{\text{я}} - i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}) \cdot dt'$$

$$\int L_{\text{я}} \cdot di_{\text{я}} = \int (U_{\text{я}} - E_{\text{я}} - i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}) \cdot dt' \quad (7)$$

$$i_{\text{я}} = \frac{1}{L_{\text{я}}} \int (U_{\text{я}} - E_{\text{я}} - i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}) \cdot dt + i_{\text{я}}(0)$$

Йому буде відповідати наступний ескіз (дивись рис. 12).

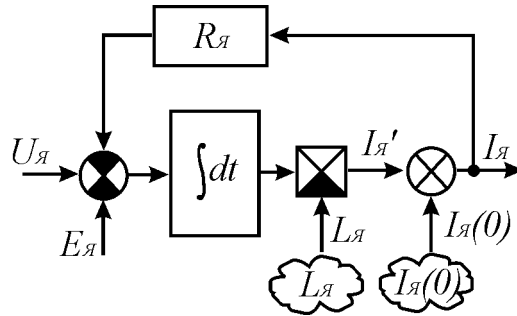


Рисунок 12

Отримавши ескізи окремих компонентів можна побудувати загальну блок-схему електромеханічної системи (дивись рис. 13)

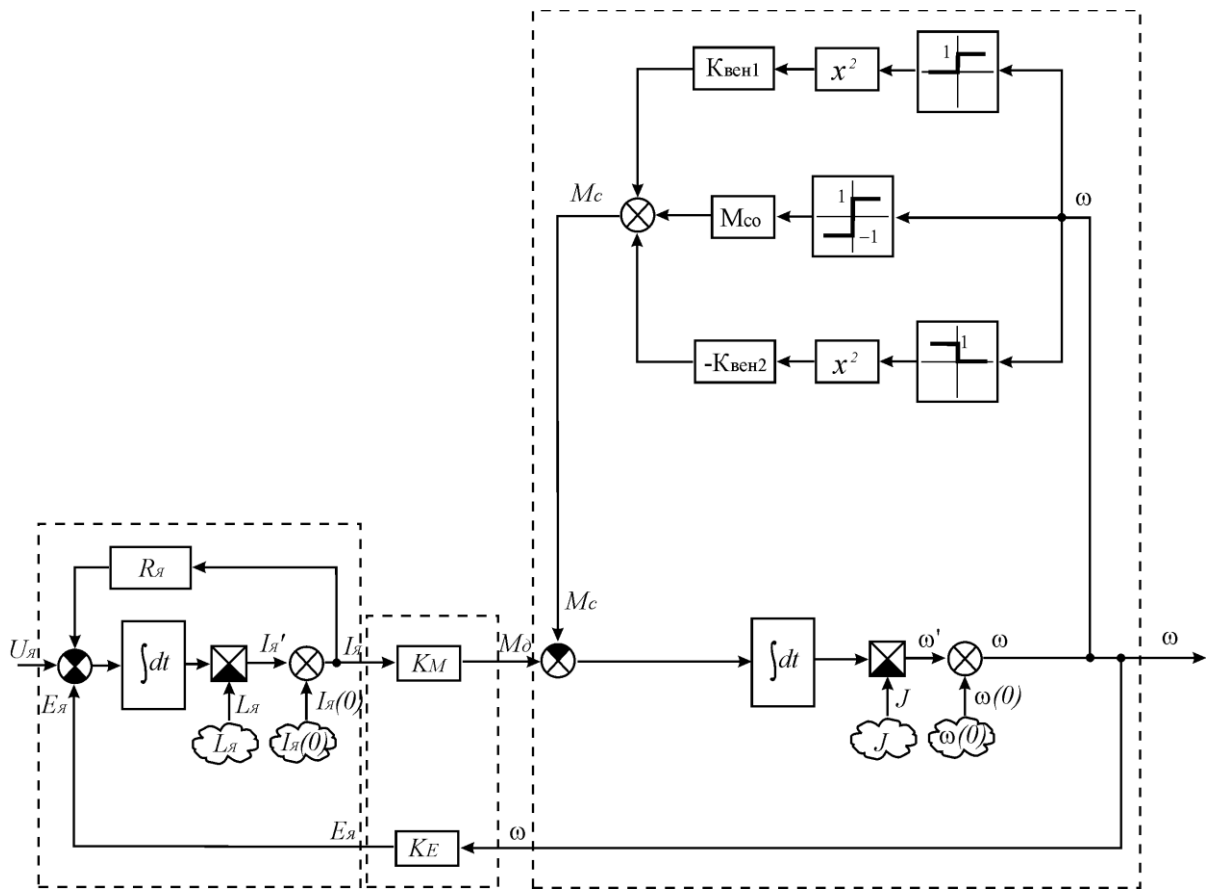


Рисунок 13



## Перетворення потужності у ВЕУ з АДМ

Важливим моментом у використанні схеми з аеродинамічним мультиплікуванням є питання про величину результуючого коефіцієнта перетворення всієї системи. Існує думка про те, що його величина значно нижча за коефіцієнт перетворення для класичної системи перетворення вітрового потоку і застосування цієї схеми економічно недоцільно. Висвітленню цього питання була присвячена робота [27]. На підставі експериментальних даних і аналітичних досліджень, в цій роботі було показано, що при оптимізації параметрів аеромеханічної системи можна отримати ефективність перетворення потужності вітрового потоку в електричну навіть трохи вище, ніж у класичної ВЕУ. Але незважаючи на наявність даної роботи питання ефективності подвійного аеродинамічного перетворення залишається дискусійним. У зв'язку з цим виникає необхідність отримання інтуїтивно-зрозумілого опису перетворення потужності у системі з аеродинамічним мультиплікуванням.

Подвійне аеромеханічне перетворення, яке використовується для аеродинамічного мультиплікування, може бути представлено у вигляді схеми, що показана на рисунку 1.1. Енергія вітрового потоку перетворюється в механічну енергію обертання первинного вітроколеса. При його обертанні виникає вторинний повітряний потік, який сприймається вторинними віротурбінами і потужність якого перетворюється в механічну потужність на валу генераторів.

На даному етапі аналізу кут нахилу вісі обертання генератору відносно площини обертання первинної віротурбіни, що застосовується у сучасних вітроенергетичних установках з аеродинамічним мультиплікуванням ТГ-750 та ТГ-1000 до уваги на береться.

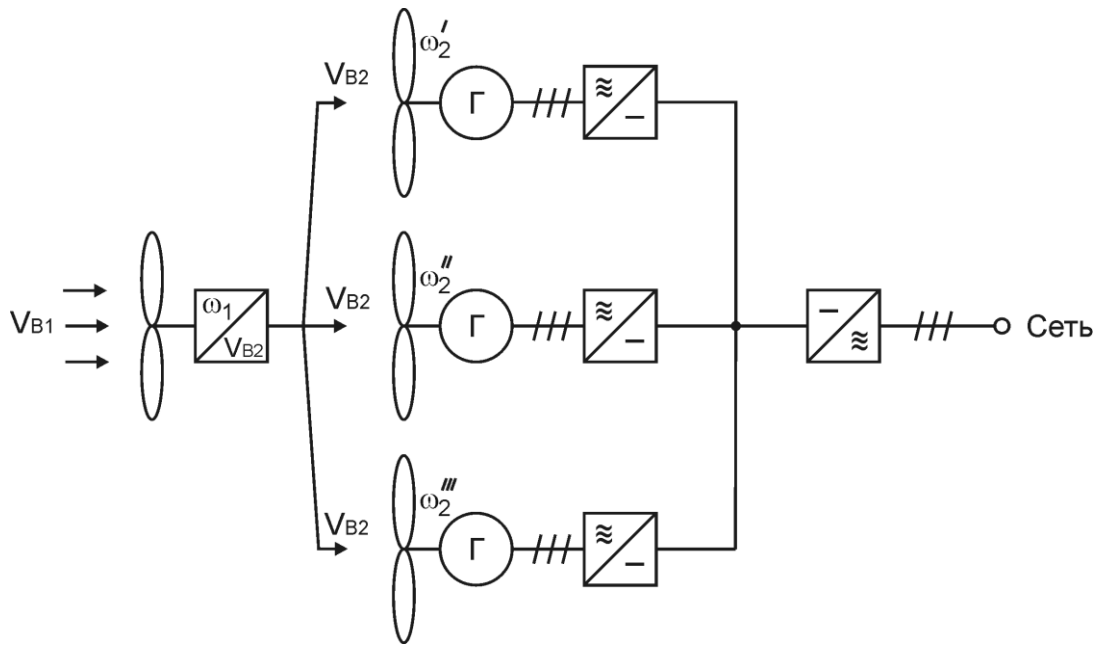


Рисунок 1.1. Структурна схема подвійного аеромеханічного перетворення

Енергетична діаграма системи з аеродинамічним мультиплікування показана на малюнку 1.2.

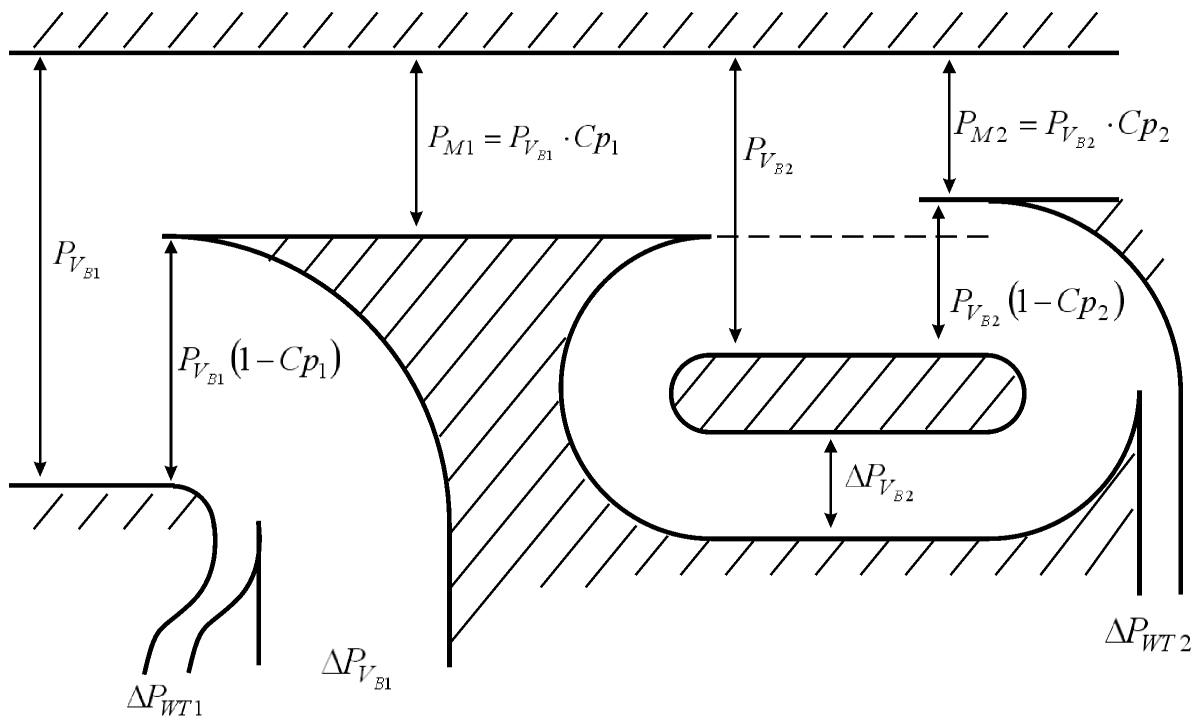


Рисунок 1.2. Енергетична діаграма подвійного аеродинамічного перетворення

Потужність вітрового потоку визначається з виразу:

$$P_{VB1} = \frac{\rho \cdot S_{WT1} \cdot V_{B1}^3}{2}, \quad (1)$$

де:  $\rho$  - щільність повітря;

$S_{WT1}$  - площа, що ометається первинною вітротурбіною;

$V_{B1}$  - швидкість вітрового потоку.

Відповідно, потужність на валу первинної вітротурбіни:

$$P_{M1} = P_{VB1} \cdot Cp_1, \quad (2)$$

де  $Cp_1$  - коефіцієнт перетворення потужності вітрового потоку первинною вітротурбіною.

Інша частина потужності вітрового потоку, пропорційна величині  $(1 - Cp_1)$

уноситься безповоротно. Вона складається з потужності затурбінного потоку

-  $\Delta P_{VB1}$  і потужності втрат -  $\Delta P_{WT1}$ .

Потужність вторинного повітряного потоку, викликаного обертанням вітроколеса, визначається як потік кінетичної енергії повітряної маси в системі координат, що обертається разом з первинною вітротурбіною:

$$P_{VB2} = \frac{\rho \cdot S_{WT2} \cdot V_{B2}^3}{2}, \quad (3)$$

де:  $S_{WT2}$  - площа, що ометається вторинними вітротурбінами;

$V_{B2}$  - швидкість вторинного повітряного потоку.

При цьому швидкість вторинного повітряного потоку визначається кутовою швидкістю обертання валу первинної вітротурбіни -  $\omega_1$  і радіусом закріплення

гондоли -  $R_{gon}$  :

$$V_{B2} = R_{gon} \cdot \omega_1 \quad (4)$$

Сукупна механічна потужність на валу вітротурбін визначається з виразу:

$$P_{M2} = P_{VB2} \cdot Cp_2 \quad (5)$$

де  $Cp_2$  - коефіцієнт перетворення потужності повітряного потоку вторинної турбіною.

Як видно з діаграми (рисунок 1.2), частина потужності вторинного повітряного потоку визначається з виразу:

$$\Delta P_{VB2} = P_{VB2} \cdot (1 - Cp_2) - \Delta P_{WT2} \quad (6)$$

Вона не піддається перетворенню і залишається в системі. Інша частина  $\Delta P_{WT2}$  відноситься до втрат.

Для формального представлення результуючого коефіцієнта перетворення системи введемо коефіцієнт втрат вторинної вітротурбіни, що характеризує втрати як частку потужності вторинного повітряного потоку:

$$K_{WT2} = \frac{\Delta P_{WT2}}{P_{VB2}} \quad (7)$$

Причому з фізичних міркувань повинна виконуватися умова:

$$K_{WT2} + Cp_2 \leq 1 \quad (1.8)$$

Сумарний коефіцієнт передачі потужності визначається як відношення потужності на валу генератора до потужності вітрового потоку:

$$K_{sum} = \frac{P_{M2}}{P_{VB1}} \quad (9)$$

Як видно з діаграми, механічна потужність на валу вторинної вітротурбіни дорівнює різниці механічної потужності на валу вітроколеса і потужності втрат:

$$P_{M2} = P_{M1} - \Delta P_{WT2} \quad (10)$$

Висловивши  $\Delta P_{WT2}$  з (7) і  $P_{VB2}$  з (5), з урахуванням (2) і (10), після перетворення може бути отримано вираз для визначення сумарного коефіцієнта перетворення системи:

$$K_{sum} = \frac{Cp_1}{\left(1 + \frac{K_{WT2}}{\tilde{N}\delta_2}\right)} \quad (11)$$

За допомогою виразу (11) розглянемо вплив коефіцієнта втрат на результуючий коефіцієнт передачі системи при  $Cp_1 = 0,48$  і  $Cp_2 = 0,48$  (рис. 1.3).

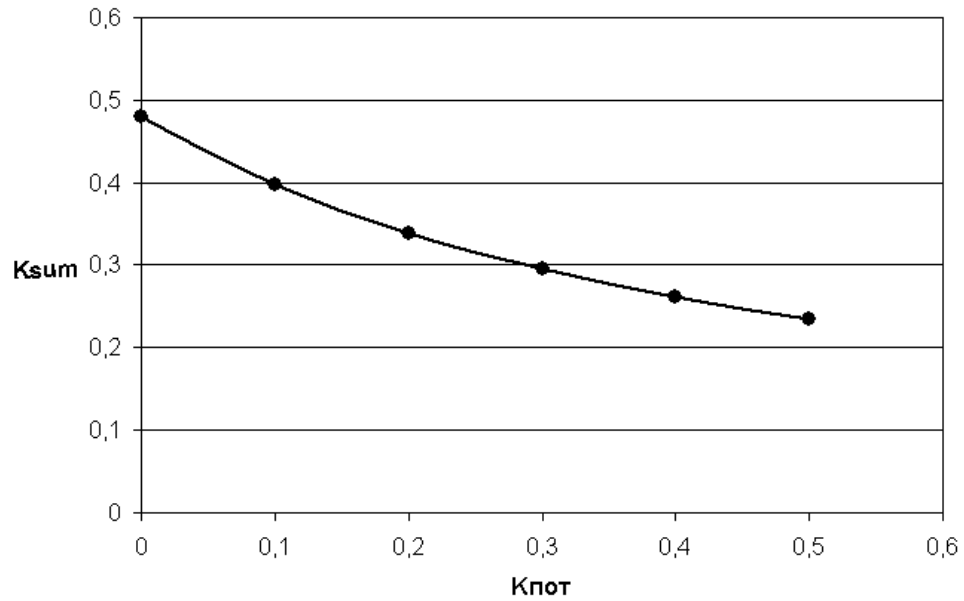


Рис. 3. Залежність результуючого коефіцієнта перетворення потужності системи від коефіцієнта втрат (при  $Cp_1 = 0,48$ ,  $Cp_2 = 0,48$ .)

Як випливає з умови (1.8), коефіцієнт  $K_{WT2}$  може приймати значення від 0 до  $(1 - Cp_1)$ . При досягненні  $K_{WT2}$  свого граничного значення, що відповідає ситуації, коли вся потужність потоку, що не перетворена вторинної вітротурбін, перетворюється у втрати, результуючий коефіцієнт перетворення  $K_{sum}$  розраховується як добуток коефіцієнтів перетворення первинної та вторинної вітротурбін:

$$K_{sum}(K_{WT2}^{max}) = Cp_1 \cdot Cp_2 \quad (12)$$

Для оцінки величини  $K_{WT2}$  при допущенні про ідеальність перетворення вітротурбін потужності повітряного потоку (відсутність втрат на турбулізацію і тертя) можна скористатися виразом коефіцієнта потужності, що уноситься затурбінним повітряним потоком [45]:

$$K_{WT2} \approx K_{zt} = (1 - \sqrt{1 - Cp_2})^2 \quad (13)$$

Для цього підставимо вираз (1.13) в (1.11) для значень,  $Cp_1 = 0,48$ ,  $Cp_2 = 0,48$

:

. (14)

$$K_{sum} \approx \frac{Cp_1}{\left(1 + \frac{(1 - \sqrt{1 - Cp_2})^2}{Cp_2}\right)} = \frac{0,48}{\left(1 + \frac{(1 - \sqrt{1 - 0,48})^2}{0,48}\right)} = 0,41$$

Виходячи з даних наведених у [43] це значення, для розглянутих похідних даних, дорівнює 0,38. Це, враховуючі початкові припущення про відсутність втрат на турбулізацію потоку, дозволяє стверджувати про адекватність отриманих співвідношень.

## Засоби задавання режиму роботи електромеханічної системи ВЕУ з АДМ

Розробка більш досконалих способів та алгоритмів керування системами ВЕУ з АДМ є актуальним завданням. У зв'язку з цим представляється доцільним проведення системного аналізу варіантів побудови структури системи керування ВЕУ з АДМ. Вирішення цього завдання може бути досягнуто за допомогою морфологічного аналізу варіантів побудови вітроелектрогенеруючих системи з аеродинамічним мультиплікуванням.

З точки зору управління, на відміну від класичної ВЕУ, ВЕУ з АДМ має більшу варіативність.

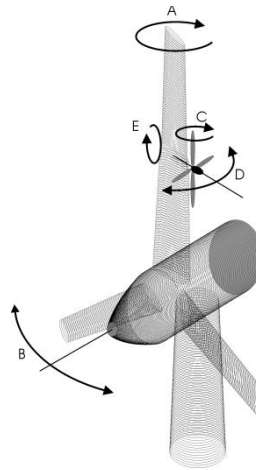


Рис. 1.4. Способи впливу на стан електромеханічної системи ВЕУ з АДМ

Вона має наступні входи для впливу на стан електромеханічної системи (рисунок 1.4):

A - кут встановлення лопатей первинної вітротурбіни,

B - кут відхилення вісі обертання первинної вітротурбіни від вектору первинного повітряного потоку,

C - кут встановлення лопатей вторинної вітротурбіни,

D - кути відхилення вісі обертання вторинних вітротурбін від вектору вторинного повітряного потоку,

E - обертовий момент генераторів.



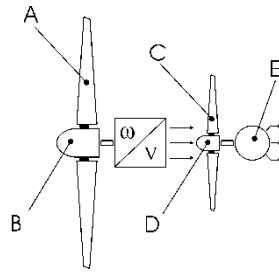


Рис. 1.5. Умовні позначення морфологічних ознак системи ВЕУ з АДМ

Розглянемо застосування кожного з вищезазначених способів впливу на стан системи, як морфологічну ознаку. Для наочного представлення варіантів може бути використана мнемосхема, що зображена на рисунку 1.5.

Наявність відповідної ознаки будемо позначати затемненням відповідного елемента.

Шляхом комбінації морфологічних ознак може бути сформована карта морфологічного аналізу, що зображена на рисунку 1.6. Вона містить 32 альтернативи.

		C+				C-			
		D+		D-		D+		D-	
		E+	E-	E+	E-	E+	E-	E+	E-
A+	B+								
	ABCDE	ABCD	ABCE	ABC	ABDE	ABD	ABE	AB	
A-	B-								
	ACDE	ACD	ACE	AC	ADE	AD	AE	A	
A-	B+								
	BCDE	BCD	BCE	BC	BDE	BD	BE	B	
A-	B-								
	CDE	CD	CE	C	DE	D	E	"0"	

Рис. 1.6. Карта морфологічного аналізу системи ВЕУ з АДМ

При формуванні комплексного критерію якості були розглянуті наступні аспекти та чинники, що визначають оптимальність та працездатність застосування тієї чи іншої альтернативи.

1. Застосування певної морфологічної ознаки має відповідну ціну, що позначається на сумарних відносних капітальних витратах.
2. При застосуванні управління виключно за допомогою зміни моменту гальмування, що створюють вторинні вітротурбіни, розміри вторинних вітротурбін повинні бути збільшені, в порівнянні зі схемами, в яких цей спосіб комбінується з іншими способами управління, чи даний спосіб управління взагалі не використовується. Це необхідно для того, щоб мати можливість створювати достатній момент гальмування при значних швидкостях вітрового потоку. Відповідно цей факт позначається на додаткових капітальних витратах.
3. Система повинна бути керованою. (Це твердження є достатньо тривіальним, але при формальному підході, повинно бути враховане).
4. Недоцільно використовувати дублювання аеродинамічного управління, тобто сумісне використання зміни кута встановлення лопатей і зміни кута орієнтації вітротурбіни.
5. Недоцільно використовувати дублювання управління вторинними вітротурбінами, тобто сумісне використання аеродинамічного та електромагнітного регулювання для вторинних вітротурбін.

Для формування комплексного критерію введемо допоміжну цілочисельну функцію логічної змінної:

$$trl(x) = \begin{cases} 0 & \text{npu } x = false \\ 1 & \text{npu } x = true \end{cases}, \quad (15)$$

де  $x \in \{false, true\}$  - логічна змінна.

Виходячи з вищезазначених чинників та з використанням функції (15) може бути сформульований комплексний критерій якості:

$$\begin{aligned} W(A, B, C, D, E) = & S_A \cdot trl(A) + S_B \cdot trl(B) + S_C \cdot trl(C) + \\ & + S_D \cdot trl(D) + S_E \cdot trl(E) + S_{WT2} \cdot trl(\overline{(A \cup E)} \cap (C \cup D \cup E)) + \\ & + S_{\infty} \cdot trl(\overline{A} \cap \overline{B} \cap \overline{C} \cap \overline{D} \cap \overline{E} \cap ((A \cap B) \cup (C \cap D)) \cap ((C \cap E) \cup (D \cap E))) \end{aligned} \quad (16)$$

де  $S_A$  - відносні витрати при застосуванні механізму зміни кута встановлення лопатей первинної вітротурбіни;

$S_B$  - відносні витрати при застосуванні обертання вісі первинної вітротурбіни відносно напрямку вітру;

$S_C$  - відносні витрати при застосуванні механізму зміни кута встановлення лопатей вторинної вітротурбіни;

$S_D$  - відносні витрати при застосуванні механізму зміни кутів відхилення вісі обертання вторинних вітротурбін від вектору вторинного повітряного потоку;

$S_E$  - відносні витрати при застосуванні електромагнітного управління;

$S_{WT2}$  - відносні додаткові витрати внаслідок збільшення розмірів вторинних вітротурбін;

$S_\infty$  - заздалегідь велика величина для реалізації функції виключення певної альтернативи з розгляду;

A, B, C, D, E - логічні змінні, що позначають наявність чи відсутність відповідної морфологічної ознаки.

Величини відносних витрат були отримані за допомогою експертних оцінок. За базову величину було взято капітальні витрати на реалізацію управління за допомогою кута встановлення лопатей первинної вітротурбіни.

При застосуванні даного критерію до сформованої сукупності альтернатив були отримані наступні значення комплексного критерію (Таблиця 1).

Після ранжування за ознакою мінімального значення критерію можна виділити групу альтернатив - лідерів: B, BC, BD, C, B, D, E, A.

Варіант B - має найменше значення відносних додаткових витрат тому, що використовує вже встановлений механізм орієнтації за вітром. Але при реалізації цього способу (як і інших альтернатив, що мають ознаку B) можуть виникати певні проблеми, пов'язані з наявністю гіроскопічного ефекту при

обертанні первинної вітротурбіни, який може, в умовах швидкозмінного вітру, зробити даний спосіб непрацездатним.

Таблиця 1

Результати розрахунку комплексного критерію ефективності

		C+				C-			
		D+		D-		D+		D-	
		E+	E-	E+	E-	E+	E-	E+	E-
A+	B+	ABCDE	ABCD	ABCE	ABC	ABDE	ABD	ABE	AB
		$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
	B-	ACDE	ACD	ACE	AC	ADE	AD	AE	A
		$\infty$	$\infty$	$\infty$	1.2	$\infty$	1.3	1.4	1.0
A-	B+	BCDE	BCD	BCE	BC	BDE	BD	BE	B
		$\infty$	$\infty$	$\infty$	0.25	$\infty$	0.35	0.45	0.05
	B-	CDE	CD	CE	C	DE	D	E	"0"
		$\infty$	$\infty$	$\infty$	0.4	$\infty$	0.5	0.6	$\infty$

У варіанті BE доцільно було використовувати електромагнітне регулювання в області оптимального відбору потужності, а зміну кута орієнтації за вітром – для обмеження потужності.

Слід зазначити, що створений на сьогодні варіант AE не входить до складу лідерів по мінімізації капітальних витрат, але, при цьому використовує перевірені технічні рішення.

Суттєву відмінність від інших лідерів має варіант E. Відмінність полягає у відсутності будь-якого механічного способу регулювання. Це має свої переваги не тільки з точки зору капітальних витрат, а й з точки зору експлуатаційних витрат та підвищення експлуатаційної надійності системи.

Данні для морфологічного аналізу відображають ситуативну оцінку витрат на теперішній час. Їх значення, безумовно, можуть змінюватися під впливом різноманітних факторів, що обумовлені змінами в рівні розвитку техніки та технології виробництва компонентів ВЕУ з АДМ.

З розглянутих способів управління ВЕУ з АДМ на теперішній час, за допомогою фізичного експерименту та математичного моделювання, досліджені тільки варіанти A, AE та E. Інші перспективні способи потребують подальшого розгляду з точки зору їх працездатності та впливу на

величину видобутку електроенергії.

### **Узагальнена модель ВЕУ**

Даний опис не враховує втрати і нелінійний характер залежностей між параметрами в електричній машині. Модель будується з урахуванням коефіцієнта лобового опору вторинних вітротурбін.

**Базисні величини.** В якості базисних величин приймаються параметри первинної аеромеханічної підсистеми, так як вони визначають процес взаємодії з первинним джерелом енергії - вітровим потоком. До них належать такі параметри електромеханічної системи ВЕУ:

$V_1^{nom}$  - номінальна швидкість первинного повітряного потоку (швидкість вітру);

$\omega_1^{nom}$  - номінальна кутова швидкість обертання первинної аеромеханічної підсистеми;

$M_{BT1}^{nom}$  - номінальний момент створюваний первинної вітротурбіни;

$P_{BT1}^{nom}$  - номінальна механічна потужність первинної вітротурбіни;

$J_1$  - момент інерції обертючих мас первинної аеромеханічної підсистеми;

$C_{P1}^{max}$  - максимальне значення коефіцієнта потужності первинної вітротурбіни;

$t_b$  - базисний час моделі, визначається через номінальну кутову швидкість обертання первинної аеромеханічної підсистеми, номінальний момент первинної вітротурбіни і момент інерції обертючих мас первинної аеромеханічної підсистеми (фізично розуміється як час розгону первинної аеродинамічної підсистеми з моментом інерції  $J_1$ , до номінальної швидкості під впливом номінального моменту):

$$t_b = \frac{\omega_1^{nom} \cdot J_1}{M_{BT}^{nom}} ; \quad (1)$$

$R_b$  - базисний радіус, визначається через номінальну кутову швидкість обертання первинної аеромеханічної підсистеми і номінальну швидкість первинного повітряного потоку:

$$R_b = \frac{V_1^{nom}}{\omega_1^{nom}} ; \quad (2)$$

$Z_b$  - базисна швидкохідні, визначається через номінальну кутову швидкість обертання первинної вітротурбіни, базисний радіус і номінальну швидкість первинного повітряного потоку, і, відповідно, дорівнює одиниці:

$$Z_b = \frac{\omega_1^{nom} \cdot R_b}{V_1^{nom}} = 1 \quad (3)$$

**2.1.2. Відносні величини.** На основі системи базисних величин може бути отримана система відносних величин узагальненої електромеханічної системи. До них належать такі параметри електромеханічної системи ВЕУ.

Відносна швидкість первинного повітряного потоку:

$$V_1^* = \frac{V_1}{V_1^{nom}} , \quad (4)$$

де  $V_1$  - фактична швидкість первинного повітряного потоку.

Відносна кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни:

$$\omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_1^{nom}}, \quad (5)$$

де  $\omega_1$  - фактична кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни.

Відносний момент первинної вітротурбіни:

$$M_{BT1}^* = \frac{M_{BT1}}{M_{BT1}^{nom}}, \quad (6)$$

де  $M_{BT1}$  - фактичний момент первинної вітротурбіни.

Відносна потужність первинної вітротурбіни:

$$P_{BT1}^* = \frac{P_{BT1}}{P_{BT1}^{nom}}, \quad (7)$$

де  $P_{BT1}$  - фактична потужність первинної вітротурбіни.

Відносний момент інерції оберткових мас первинної аеромеханічної підсистеми (дорівнює одиниці):

$$J_1^* = \frac{J_1}{J_1} = 1. \quad (8)$$

Відносний коефіцієнт потужності первинної вітротурбіни:

$$C_{P1}^* = \frac{C_{P1}}{C_{P1}^{max}}, \quad (9)$$

де  $C_{P1}$  - фактичне значення коефіцієнта потужності первинної вітротурбіни.

Відносне модельне час:

$$t^* = \frac{t}{t_b}, \quad (10)$$

де  $t$  - реальний час.

Відносний радіус первинної вітротурбіни:

$$R_{BT1}^* = \frac{R_{BT1}}{R_b}, \quad (11)$$

де  $R_{BT1}$  - реальний радіус первинної вітротурбіни.

Відносна швидкохідність первинної вітротурбіни (відповідно до (3) дорівнює фактичній швидкохідності первинної вітротурбіни -  $Z_1$ ):

$$Z_1^* = \frac{Z_1}{Z_b} = Z_1. \quad (12)$$

Відносний радіус закріплення осі вторинної вітротурбіни:

$$R_z^* = \frac{R_z}{R_b}, \quad (13)$$

де  $R_z$  - фактичний радіус закріплення осі вторинної вітротурбіни.

Відносна швидкість вторинного повітряного потоку:

$$V_2^* = \frac{V_2}{V_1^{nom}}, \quad (14)$$

де  $V_2$  - фактична швидкість вторинного повітряного потоку.

Відносна кутова швидкість обертання вторинної вітротурбіни:



$$\omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_1^{nom}}, \quad (15)$$

де  $\omega_2$  - фактична кутова швидкість обертання вторинної вітротурбіни.

Відносний момент вторинної вітротурбіни:

$$M_{BT2}^* = \frac{M_{BT2}}{M_{BT1}^{nom}}, \quad (16)$$

де  $M_{BT2}$  - фактичний момент вторинної вітротурбіни.

Відносна потужність вторинної вітротурбіни:

$$P_{BT2}^* = \frac{P_{BT2}}{P_{BT1}^{nom}}, \quad (17)$$

де  $P_{BT2}$  - фактична потужність вторинної вітротурбіни.

Відносний момент інерції обертових мас вторинної аеромеханічної підсистеми:

$$J_2^* = \frac{J_2}{J_1}, \quad (18)$$

де  $J_2$  - фактичний момент інерції обертових мас вторинної аеромеханічної підсистеми.

Відносний коефіцієнт потужності вторинної вітротурбіни:

$$C_{P2}^* = \frac{C_{P2}}{C_{P1}^{max}}, \quad (19)$$

де  $C_{P2}$  - фактичне значення коефіцієнта потужності вторинної вітротурбіни.

Відносний радіус вторинної вітротурбіни:

$$R_{BT2}^* = \frac{R_{BT2}}{R_b}, \quad (20)$$

де  $R_{BT2}$  - реальний радіус вторинної вітротурбіни.

Відносна швидкохідність вторинної вітротурбіни (відповідно до .3) дорівнює фактичній швидкохідності вторинної вітротурбіни -  $Z_2$ ):

$$Z_2^* = \frac{Z_2}{Z_b} = Z_2. \quad (21)$$

Відносний динамічний момент первинної аеромеханічної підсистеми:

$$M_{d1}^* = \frac{M_{d1}}{M_{BT1}^{nom}}, \quad (22)$$

де  $M_{d1}$  - фактичний момент вторинної вітротурбіни.

Відносний динамічний момент вторинної аеромеханічної підсистеми:

$$M_{d2}^* = \frac{M_{d2}}{M_{BT1}^{nom}}, \quad (23)$$

де  $M_{d2}$  - фактичний момент вторинної вітротурбіни.

Відносний коефіцієнт лобового опору вторинної вітротурбіни:

(24)

$$C_{t2}^* = \frac{C_{t2}}{C_{P1}^{\max}}$$

де  $C_{t2}$  - фактичний коефіцієнт лобового опору вторинної вітротурбіни.

Відносний коефіцієнт аеродинамічних втрат вторинної вітротурбіни:

(25)

$$C_{\Delta}^* = \frac{C_{\Delta}}{C_{P1}^{\max}}$$

де  $C_{\Delta}$  - фактичний коефіцієнт аеродинамічних втрат вторинної вітротурбіни.

Відносний коефіцієнт корисної дії вторинної вітротурбіни:

(26)

$$\eta_{WT2}^* = \frac{C_{P2}^*}{C_{t2}^*} = \frac{C_{P2}}{C_{P1}^{\max}} \cdot \frac{C_{P1}^{\max}}{C_{t2}^*} = \eta_{WT2}$$

де  $\eta_{WT2}$  - фактичний коефіцієнт корисної дії вторинної вітротурбіни.

**Основні співвідношення.** Далі наведені математичні вирази, що описують систему, які при використанні системи відносних величин значно спрощуються в порівнянні з аналогічними виразами для фактичних величин. Максимальне значення коефіцієнта потужності первинної вітротурбіни в відносних одиницях:

(27)

$$C_{P1}^{\max*} = \frac{C_{P1}^{\max}}{C_{P1}^{\max}} = 1$$

Оптимальне значення швидкості первинної вітротурбіни в відносних одиницях (відповідно до (12)) визначається з оптимального значення швидкості первинної вітротурбіни -  $Z_{1,opt}$ :

$$Z_{1,opt}^* = Z_{1,opt} \quad (28)$$

Оптимальне значення швидкохідності вторинної вітротурбіни в відносних одиницях (відповідно до (21)) визначається з оптимального значення швидкохідності вторинної вітротурбіни -  $Z_{2,opt}$  :

$$Z_{2,opt}^* = Z_{2,opt} \quad (29)$$

Значення швидкохідності холостого ходу первинної і вторинної вітротурбін в відносних одиницях визначається аналогічно з значень швидкохідності холостого ходу первинної і вторинної вітротурбін -  $Z_{1,xx}$  і  $Z_{2,xx}$ , відповідно:

$$Z_{1,xx}^* = Z_{1,xx} \quad (30)$$

$$Z_{2,xx}^* = Z_{2,xx} \quad (31)$$

Відносна потужність первинної вітротурбіни відповідно до (7) і виразом для потужності може бути представлена у вигляді:

$$P_{BT1}^* = \frac{\rho \cdot S_{BT1} \cdot V_1^3 \cdot C_{P1}}{2} \cdot \frac{2}{\rho \cdot S_{BT1} \cdot V_1^{nom3} \cdot C_{P1}^{max}} \quad (32)$$

де:  $S_{BT1}$  - площа, що ометається первинною вітротурбіною,

$\rho$  - щільність повітря.

Після скорочення, з урахуванням (4) і (9) вираз (32) може бути записано в наступному вигляді:

$$P_{BT1}^* = V_1^{*3} \cdot C_{P1}^* \quad (33)$$

Використовуючи уявлення механічного моменту як відношення механічної потужності до кутової швидкості (5) і (7) вираз (6) може бути представлено в наступному вигляді:

$$M_{BT1}^* = \frac{P_{BT1}}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_1^{nom}}{P_{BT1}^{nom}} = \frac{P_{BT1}^*}{\omega_1^*} \quad (34)$$

Після підстановки в (32) вирази (33) може бути отримано вираз для моменту первинної вітротурбіни в відносних одиницях:

$$M_{BT1}^* = \frac{V_1^{*3} \cdot C_{Pl}^*}{\omega_1^*} \quad (35)$$

Швидкість вторинного повітряного потоку визначається кутової швидкості обертання первинної вітротурбіни:

$$V_2 = R_z \cdot \omega_1 \quad (36)$$

З урахуванням (2), (13), (15), (36) може бути отримано такий вираз для вторинного повітряного потоку в відносних одиницях:

$$V_2^* = \frac{R_z \cdot \omega_1}{V_1^{nom}} = \frac{R_z^* \cdot \omega_1^* \cdot R_b \cdot \omega_1^{nom}}{V_1^{nom}} = R_z^* \cdot \omega_1^* \cdot \frac{V_1^{nom}}{V_1^{nom}} = R_z^* \cdot \omega_1^* \quad (37)$$

Очевидно, що оптимальної швидкості вітрового потоку відповідає певна швидкість обертання вітротурбіни:

$$\omega_{1,opt} = \frac{Z_{1,opt} \cdot V_1}{R_1} \quad (38)$$

Також, для номінального режиму:

$$Z_{1,opt} = \frac{\omega_1^{nom} \cdot R_1}{V_1^{nom}} \quad (39)$$

Після підстановки (39) в (38) урахуванням (4) і (5) може бути отримано вираз для оптимальної кутової швидкості первинної вітротурбіни:

$$\omega_{1,opt}^* = V_1^{*2} \quad (40)$$

Оптимальний момент вітротурбіни:

$$M_{BT1}^{opt} = \frac{V_1^{*3} \cdot C_{P1}^*}{\omega_1^*} \Bigg|_{\substack{C_{P1}^* = C_P^{\max} = 1 \\ \omega_1^* = \omega_{1,opt}^*}} = \frac{V_1^{*3}}{\omega_{1,opt}^*} = V_1^{*2} \cdot \frac{V_1^*}{\omega_{1,opt}^*} \Bigg|_{\omega_{1,opt}^* = V_1^{*2}} = V_1^{*2} \quad (41)$$

Динамічний момент первинної аеромеханічної підсистеми у відносних одиницях з урахуванням виразу (8):

$$M_{d1}^* = J_1^* \frac{d\omega_1^*}{dt^*} \Bigg|_{J_1^* = 1} = \frac{d\omega_1^*}{dt^*} \quad (42)$$

Динамічний момент вторинної аеромеханічної підсистеми з урахуванням виразів (1), (10) і (15) може бути представлений у вигляді:

$$M_{d2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 \cdot \frac{d(\omega_2^* \cdot \omega_1^{nom})}{d(t^* \cdot t_b)} = J_2 \cdot \frac{\omega_1^{nom}}{t_b} \cdot \frac{d\omega_2^*}{dt^*} = J_2 \cdot \frac{\omega_1^{nom} \cdot M_{BT1}^{nom}}{\omega_1^{nom} \cdot J_1} \cdot \frac{d\omega_2^*}{dt^*} = J_2 \frac{M_{BT1}^{nom}}{J_1} \cdot \frac{d\omega_2^*}{dt^*} \quad (43)$$

З виразу (43) після підстановки (18) і (23) може бути отримано вираз для динамічного моменту аеромеханічної підсистеми у відносних одиницях:

(44)

$$M_{d2}^* = J_2^* \frac{d\omega_2^*}{dt^*}$$

Вираз для механічної характеристики вторинної вітротурбіни в відносних одиницях може бути отримано з (16) після підстановки (11), (14), (15), (19) і (20):

$$M_{BT2}^* = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_{BT2}^2 \cdot V_2^3 \cdot C_{P2}}{2\omega_2} \cdot \frac{2 \cdot \omega_1^{nom}}{\rho \cdot \pi \cdot R_{BT1}^2 \cdot V_1^{nom3} \cdot C_{P1}^{max}} = \frac{R_{BT2}^{*2} \cdot V_2^{*3} \cdot C_{P2}^*}{R_{BT1}^{*2} \cdot \omega_2^*} \quad (45)$$

Для апроксимації  $C_P^*(Z^*)$  характеристики використовуємо вираз,

запропоноване в [46] з відповідними індексами, що відображають приналежність характеристики первинної і вторинної вітротурбін.

Для лівої частини характеристики:

$$C_P^*(Z^*) = C_P^{*max} \cdot \left( \frac{Z^*}{Z_{opt}^*} \right)^{a_1} \cdot \left[ -2 \left( \frac{Z^*}{Z_{opt}^*} \right)^{a_2} + 3 \right] \quad (46)$$

де:  $a_1 = 2.5$ ,  $a_2 = 1.3$ .

Для правої частини характеристики:

$$C_P^*(Z^*) = C_P^{*max} - \frac{C_P^{*max}}{(Z_{xx}^* - Z_{opt}^*)^{a_3}} \cdot (Z^* - Z_{opt}^*)^{a_4} \quad (47)$$

де:  $a_3 = 1.6$ ,  $a_4 = 1.6$ .

Для вентиляторної частини характеристики використовуємо вираз (47) але з іншими значеннями коефіцієнтів апроксимації:

$$C_P^*(Z^*) = C_P^{*max} - \frac{C_P^{*max}}{(Z_{xx}^* - Z_{opt}^*)^{a_5}} \cdot (Z^* - Z_{opt}^*)^{a_6} \quad (48)$$

де:  $a_5 = 2.5$ ,  $a_6 = 2.5$ .

Зв'язок коефіцієнта моменту виражається через відношення, з відповідними індексами (прийнято без доведення, перевірено моделюванням):

$$C_M^* = \frac{C_P^* \cdot R_{BT}^*}{Z^*} \quad (49)$$

У наведених виразах швидкохідність визначається з наступних виразів:

$$Z_1^* = \frac{\omega_1^* \cdot R_{BT1}^*}{V_1^*} \quad (50)$$

$$Z_2^* = \frac{\omega_2^* \cdot R_{BT2}^*}{V_2^*} \quad (51)$$

Вираз, який апроксимує, для ККД вторинної віротурбіни (отримано шляхом апроксимації характеристик наведених в [27]):

$$\eta_2^* = \eta_2^{*nom} \cdot \left( 1 - \left( \frac{Z_2^*}{Z_{2.xx}^*} \right)^a \right) \quad (52)$$

де  $a$  - коефіцієнт визначає крутизну характеристики ( $a \approx 8$ ),

$\eta_2^{*nom}$  - номінальне значення ККД вторинної віротурбіни.

### **Передавальна функція ідеалізованої ланки аеромеханічного перетворення ВЕУ**

Передавальна функція ланки аеродинамічного мультиплицирования є першим наближенням в його математичному описі, вона необхідна при процедурі синтезу методами теорії автоматичного управління електромеханічної системи ВЕУ. Вихідна математична модель даного ланки має суттєві нелінійності, тому вимагає проведення лінеаризації з попереднім визначенням значень координат робочих точок.



При побудові вихідної моделі ланки аеродинамічного мультиплицирования були прийняті такі припущення.

1. Моменти механічних втрат включені в механічні характеристики вітротурбін.
2. В даному наближенні всі обертові підсистеми вважаються жорсткими.
3. Вторинна аеромеханіка система складається з трьох ідентичних підсистем.
4. Потоки потужності рівномірно розподіляються між трьома елементами вторинної аеромеханічної підсистеми.
5. Всі залежності представляються в відносних одиницях.

На рисунку 2.1 зображена блок-схема підсистеми аеродинамічного мультипликування. Вона містить структурні елементи, які визначають її нелінійність: механічна характеристика первинної вітротурбіни (NB1), механічна характеристика вторинної вітротурбіни (NB2), операція множення (NB3), операція ділення (NB4).

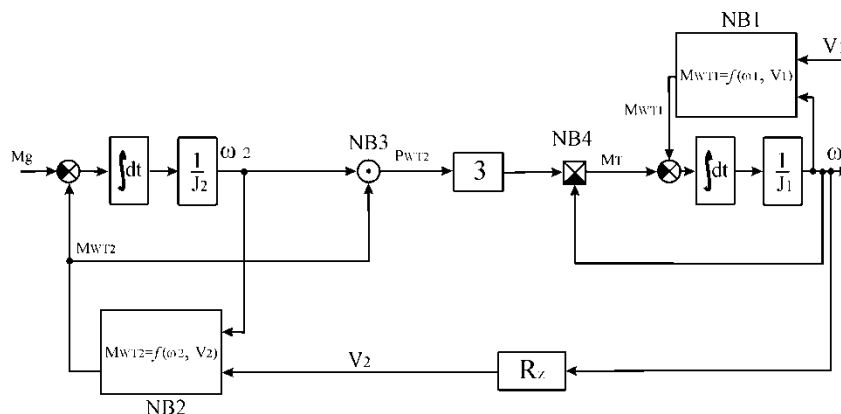


Рис. 2.1 Вихідна блок схема моделі ланки аеродинамічного перетворення

Як видно зі схеми, всі ці елементи мають два входи і один вихід. Отже, в графічній інтерпретації вони являють собою тривимірну поверхню. Їх лінеаризуючі вирази є рівняння площин в тривимірному просторі дотичні до вихідних поверхонь в робочій точці. Загальна форма лінеаризуючого вираження має вигляд:

$$y(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

де:  $a_0, a_1, a_2$  - коефіцієнти лінеаризуючого вираження,

$x_1, x_2$  - вхідні змінні.

Отримана таким чином, блок-схема приведена на малюнку 2.2.

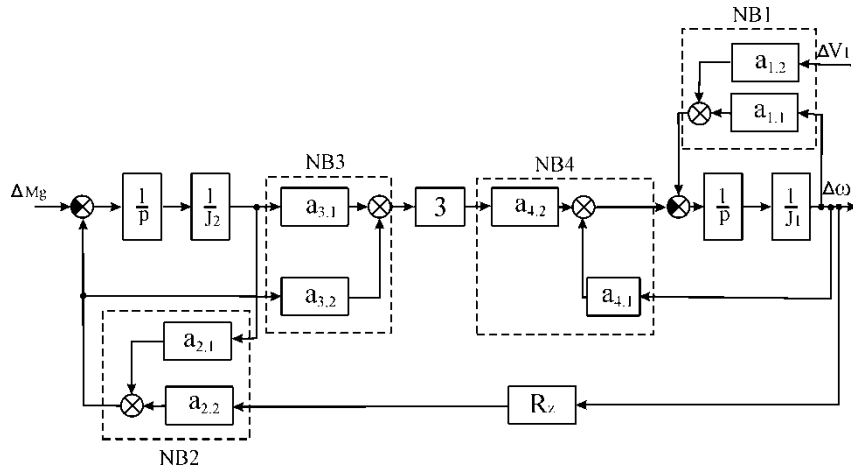


Рис. 2.2 Блок-схема моделі ланки аеродинамічного перетворення після лінеаризації.

Нумерація коефіцієнтів включає в себе номер нелінійного блоку і номер елемента в нелінійному блоці.

**Визначення координат робочої точки.** Першим етапом визначення коефіцієнтів є визначення координат робочої точки. Значення змінних в робочій точці відповідають сталому режиму при фіксованих значеннях вхідних змінних всієї підсистеми. Він характеризується нульовими значеннями входів інтеграторів (див. Рис. 2.1).

Виходячи з цієї ознаки, можуть бути отримані наступні вирази:

$$M_{WT1}^{*0} = M_T^{*0}, \quad (53)$$

$$M_{WT2}^{*0} = M_g^{*0}, \quad (54)$$

де:  $M_{WT1}^{*0}$  - момент первинної вітротурбіни в сталому режимі,

$M_T^{*0}$  - момент гальмування первинної аеромеханічної підсистеми в сталому режимі,

$M_{WT2}^{*0}$  - момент вторинної вітротурбіни в сталому режимі,

$M_g^{*0}$  - момент на валу генератора в сталому режимі.

Крім того, слід, при складанні системи рівнянь, врахувати залежність:

$$V_2^{*0} = R_Z^* \cdot \omega_1^{*0}, \quad (55)$$

де:  $R_Z^*$  - радіус закріплення вторинної вітротурбіни,

$\omega_1^{*0}$  - кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни в робочій точці,

$V_2^{*0}$  - швидкість вторинного повітряного потоку в робочій точці.

Для проведення лінеаризації нелінійних блоків необхідно визначити значення наступного набору параметрів робочої точки ланки аеродинамічного перетворення:  $\omega_1^{*0}, \omega_2^{*0}, M_T^{*0}, P_{WT2}^{*0}, V_2^{*0}, M_{WT1}^{*0}, M_{WT2}^{*0}$ , де:  $\omega_2^{*0}$  - кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни в робочій точці,  $P_{WT2}^{*0}$  - потужність вторинної вітротурбіни.

Значення перших чотирьох з них можуть бути визначені в результаті рішення наступної системи трансцендентних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) - M_T^{*0} = 0 \\ f_{WT2}(\omega_2^{*0}, V_2^{*0}) - M_g^{*0} = 0 \\ P_{WT2}^{*0} - \omega_2^{*0} \cdot M_g^{*0} = 0 \\ M_T^{*0} - \frac{3 \cdot P_{WT2}^{*0}}{\omega_1^{*0}} = 0 \end{array} \right. \quad (56)$$

Решта три можуть бути визначені за допомогою виразів (53), (54), (55).

В системі рівнянь функції  $f_{WT1}$  і  $f_{WT2}$  представляють собою вираження сімейства механічних характеристик первинної і вторинної вітротурбін відповідно, і визначаються наступними виразами :

$$f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) = \frac{(V_1^{*0})^3}{\omega_1^{*0}} \cdot Cp_1^{*0}, \quad (57)$$

$$f_{WT2}(\omega_2^{*0}, V_2^{*0}) = \left( \frac{R_2^*}{R_1^*} \right)^2 \cdot \frac{(V_2^{*0})^3}{\omega_2^{*0}} \cdot Cp_2^{*0}, \quad (58)$$

Значення коефіцієнтів потужності  $Cp_1^{*0}$  і  $Cp_2^{*0}$  визначаються з виразів:

, (59)

$$Cp_1^{*0}(Z_1^{*0}) = \begin{cases} Cp_1^{*max} \cdot \left(\frac{Z_1^{*0}}{Z_1^{*pot}}\right)^{b1} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_1^{*0}}{Z_1^{*opt}}\right)^{b2} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_1^{*0} \leq Z_1^{*opt} \\ Cp_1^{*max} - \frac{Cp_1^{*max}}{(Z_1^{*xx} - Z_1^{*opt})^{b3}} \cdot (Z_1^{*0} - Z_1^{*opt})^{b4} & \text{при } Z_1^{*opt} < Z_1^{*0} < Z_1^{*xx} \\ Cp_1^{*max} - \frac{Cp_1^{*max}}{(Z_1^{*xx} - Z_1^{*opt})^{b5}} \cdot (Z_1^{*0} - Z_1^{*opt})^{b6} & \text{при } Z_1^{*xx} \leq Z_1^{*0} < +\infty \end{cases}$$

, (60)

$$Cp_2^{*0}(Z_2^{*0}) = \begin{cases} Cp_2^{*max} \cdot \left(\frac{Z_2^{*0}}{Z_2^{*pot}}\right)^{b7} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_2^{*0}}{Z_2^{*opt}}\right)^{b8} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_2^{*0} \leq Z_2^{*opt} \\ Cp_2^{*max} - \frac{Cp_2^{*max}}{(Z_2^{*xx} - Z_2^{*opt})^{b9}} \cdot (Z_2^{*0} - Z_2^{*opt})^{b10} & \text{при } Z_2^{*opt} < Z_2^{*0} < Z_2^{*xx} \\ Cp_2^{*max} - \frac{Cp_2^{*max}}{(Z_2^{*xx} - Z_2^{*opt})^{b11}} \cdot (Z_2^{*0} - Z_2^{*opt})^{b12} & \text{при } Z_2^{*xx} \leq Z_2^{*0} < +\infty \end{cases}$$

де:  $C_1^{*max}$ ,  $C_2^{*max}$  - максимальні значення коефіцієнтів потужності у відносних одиницях первинної і вторинної вітротурбін відповідно,

$Z_1^{*opt}$ ,  $Z_2^{*opt}$  - оптимальні значення швидкохідності в системі відносних одиниць первинної і вторинної вітротурбін відповідно,

$Z_1^{*xx}$ ,  $Z_2^{*xx}$  - значення швидкохідності при холостому ході в системі відносних одиниць первинної і вторинної вітротурбін відповідно,

$Z_1^{*0}$ ,  $Z_2^{*0}$  - значення швидкохідності для сталого режиму в системі відносних одиниць первинної і вторинної вітротурбін відповідно,

$b_1, \dots, b_{12}$  - коефіцієнти апроксимації.

З урахуванням (55) система (56) може бути записана у вигляді:

(61)

$$\begin{cases} f_{WT1}(\omega_1^{*0}, V_1^{*0}) - M_T^{*0} = 0 \\ f_{WT2}(\omega_1^{*0}, \omega_2^{*0}) - M_g^{*0} = 0 \\ P_{WT2}^{*0} - \omega_2^{*0} \cdot M_g^{*0} = 0 \\ M_T^{*0} - \frac{3 \cdot P_{WT2}^{*0}}{\omega_1^{*0}} = 0 \end{cases}$$

Значення швидкохідності первинної і вторинної вітротурбін визначаються за допомогою таких висловів:

$$Z_1^{*0} = \frac{\omega_1^{*0} \cdot R_1^*}{V_2^{*0}}, \quad (62)$$

$$Z_2^{*0} = \frac{\omega_2^{*0} \cdot R_2^*}{\omega_1^{*0} \cdot R_z^*}. \quad (63)$$

де:  $R_1^*$ ,  $R_2^*$  - значення радіусів первинної і вторинної вітротурбін в відносних одиницях.

Визначення коефіцієнтів лінеаризації. Коефіцієнти  $a_{1.1}$  і  $a_{1.2}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.1} \\ a_{1.2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB1}} f_{WT1}(X_{NB1}) \quad (64)$$

де  $X_{NB1} = \begin{pmatrix} \omega_1^{*0} \\ V_1^{*0} \end{pmatrix}$  та  $f_{NB1}(X_{NB1}) = f_{WT1}(\omega_1^*, V_1^*)$

Коефіцієнти  $a_{2.1}$  і  $a_{2.2}$  визначаються їх вираження:

$$\begin{pmatrix} a_{2.1} \\ a_{2.2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2}} f_{WT2}(X_{NB2}) \quad (65)$$

де  $X_{NB2} = \begin{pmatrix} \omega_2^{*0} \\ V_2^{*0} \end{pmatrix}$  і  $f_{NB2}(X_{NB2}) = f_{WT2}(\omega_2^*, V_2^*)$

Коефіцієнти  $a_{3.1}$  і  $a_{3.2}$  визначаються їх вираження:

(66)

$$\begin{pmatrix} a_{3,1} \\ a_{3,2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3}} f_{NB3}(X_{NB3})$$

де

$$X_{NB3} = \begin{pmatrix} \omega_2^{*0} \\ M_{WT2}^{*0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad f_{NB3}(X_{NB3}) = \omega_2^* \cdot M_{WT2}^*$$

Коефіцієнти  $a_{4,1}$  і  $a_{4,2}$  визначаються їх вираження:

(67)

$$\begin{pmatrix} a_{4,1} \\ a_{4,2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB4}} f_{NB4}(X_{NB4})$$

де

$$X_{NB4} = \begin{pmatrix} \omega_1^{*0} \\ 3 \cdot P_{WT2}^{*0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad f_{NB4}(X_{NB4}) = \frac{3 \cdot P_{WT2}^*}{\omega_1^*}$$

Визначення передавальної функції ланки аеродинамічного мультиплицирования. На підставі лінеаризованної моделі ланки аеродинамічного мультиплицирования (див. Рис.2.2) може бути складена модель в змінних стану в матричній формі (прохідна матриця відсутня) :

(68)

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases}$$

Системі (18) відповідають такі матриці:

(69)

$$A = \begin{pmatrix} \frac{a_{1,1} - a_{4,1} - 3 \cdot a_{4,2} \cdot a_{3,2} \cdot a_{2,2} \cdot R_Z^*}{J_1^*} & \frac{-3 \cdot a_{4,2} \cdot (a_{3,1} + a_{3,2} \cdot a_{2,1})}{J_1^*} \\ \frac{a_{2,2} \cdot R_Z^*}{J_2^*} & \frac{a_{2,1}}{J_2^*} \end{pmatrix}$$

$$, C = (1 \quad 0),$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ J_2^* \end{pmatrix} \quad , \quad x = \begin{pmatrix} \omega_1^* \\ \omega_2^* \end{pmatrix}$$

де:  $J_1^*$ ,  $J_2^*$  - моменти інерції первинної і вторинної аеромеханічної підсистем в

відносних одиницях.

Передавальна функція визначається за допомогою матричного виразу [47]:

$$W(p) = C \cdot (p \cdot I - A)^{-1} \cdot B, \quad (70)$$

де  $I$  - одинична матриця.

Після відповідних перетворень отримуємо передавальну функцію ланки:

$$W(p) = \frac{K_y}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}, \quad (71)$$

де:

$$K_y = \frac{(a_{3.1} \cdot a_{4.2} + a_{2.1} \cdot a_{3.2} \cdot a_{4.2})}{\left( \frac{1}{3} \cdot a_{1.1} \cdot a_{2.1} - \frac{1}{3} \cdot a_{2.1} \cdot a_{4.1} + R_z^* \cdot a_{2.2} \cdot a_{3.1} \cdot a_{4.2} \right)}, \quad (72)$$

$$T = \sqrt{\frac{\left( \frac{1}{3} \cdot J_1^* \cdot J_2^* \right)}{\left( \frac{1}{3} \cdot a_{1.1} \cdot a_{2.1} - \frac{1}{3} \cdot a_{2.1} \cdot a_{4.1} + R_z^* \cdot a_{2.2} \cdot a_{3.1} \cdot a_{4.2} \right)}}. \quad (73)$$

$$\xi = \frac{\left( \frac{1}{3} \cdot J_2^* \cdot a_{1.1} - \frac{1}{3} \cdot J_2^* \cdot a_{2.1} + \frac{1}{3} \cdot J_2^* \cdot a_{4.1} + J_2^* \cdot R_z^* \cdot a_{2.2} \cdot a_{3.2} \cdot a_{4.2} \right)}{2 \cdot T \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot a_{1.1} \cdot a_{2.1} - \frac{1}{3} \cdot a_{2.1} \cdot a_{4.1} + R_z^* \cdot a_{2.2} \cdot a_{3.1} \cdot a_{4.2} \right)}$$

В результаті лінеаризації нелінійної моделі ланки аеродинамічного перетворення була отримана передавальна функція даного ланки та запропонована методика розрахунку її параметрів.

Значення параметрів передавальної функції залежать від положення робочої точки на статичній траєкторії регулювання. Відповідно до цього їх значення є функціями швидкості первинного повітряного потоку.

Параметри регулятора, що визначаються за допомогою отриманої передавальної функції, можуть коригуватися в залежності від інформації від датчика швидкості первинного повітряного потоку, відповідно до вказаної

робочої точки.

## **Передавальна матриця аеромеханічного перетворення багатоканальної ВЕУ**

Вище було розглянуто питання визначення передавальної функції ланки аеродинамічного мультиплікування, було отримано вираз для передавальної функції та запропонована методика визначення її коефіцієнтів. При побудові вихідної моделі було прийнято припущення про ідентичність параметрів і поведінки всіх трьох вторинних аеромеханічних підсистем. Таке припущення дозволило отримати адекватний інструмент для аналізу основних процесів в цій системі при досить компактній формі запису результатів. Однак, при проектуванні системи управління даної ВЕУ, існує ряд питань, які не можуть бути вирішені з використанням отриманої передавальної функції і вимагають виходу за рамки прийнятих припущень. Зокрема це стосується аналізу процесів взаємодії вторинних підсистем між собою. У цьому випадку всі вторинні підсистеми повинні розглядатися окремо. При цьому система має декілька входів і декілька виходів. А її математичний опис являє собою передавальну матрицю. Її визначенню і присвячена дана робота.

Метою даної роботи є визначення, в результаті аналітичного дослідження, передавальної матриці ланки аеромеханічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Передавальна матриця ланки аеродинамічного перетворення необхідна для процедури синтезу системи управління електромеханічною системою ВЕУ методами теорії автоматичного керування [48]. В даному випадку ланка аеродинамічного перетворення виступає в якості складової частини об'єкта управління.

**Модель ланки аеродинамічного перетворення.** При побудові вихідної моделі ланки аеродинамічного мультиплікування були прийняті наступні припущення.



1. Моменти механічних втрат включені в механічні характеристики вітротурбін.

2. В даному наближенні всі обертові підсистеми вважаються жорсткими.

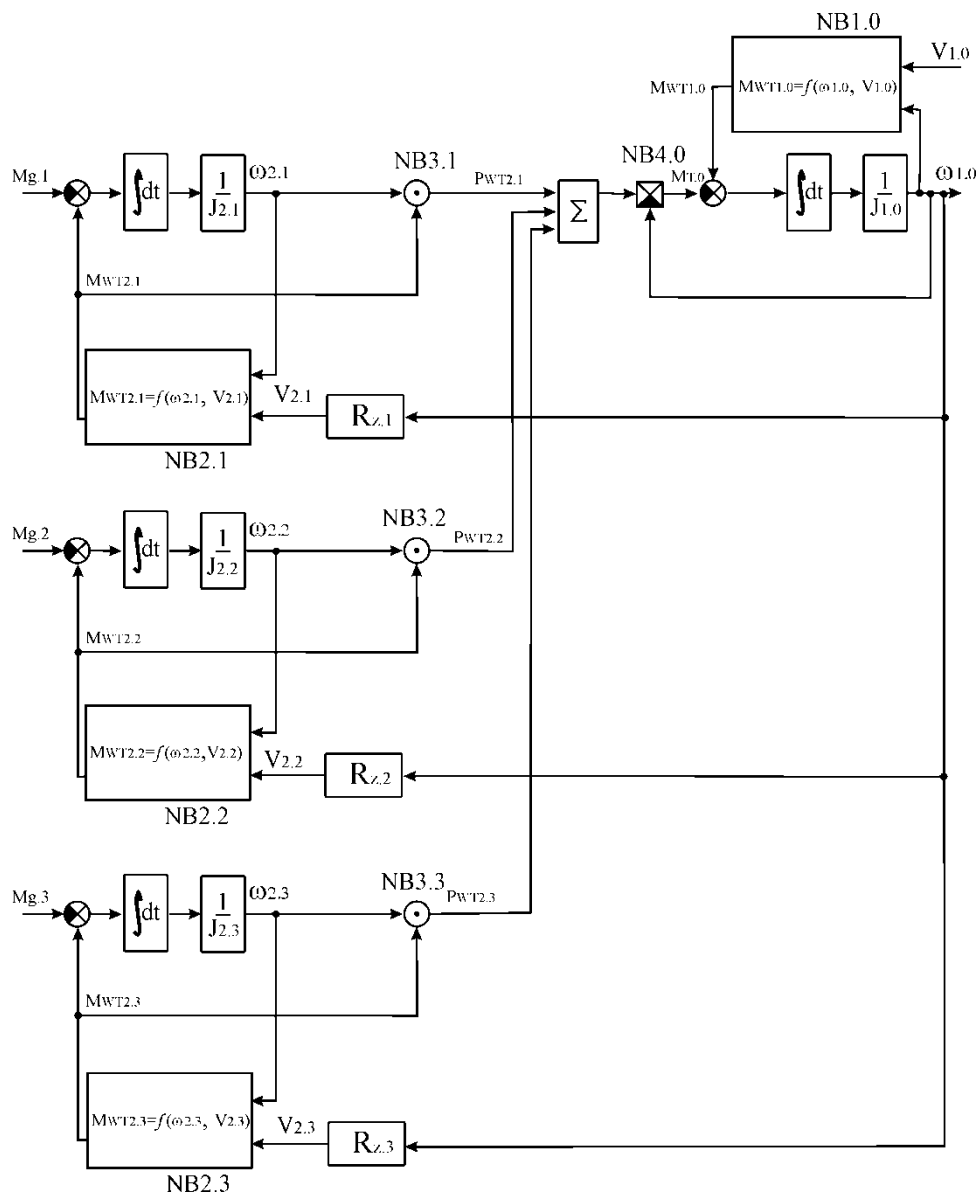
На **рисунку 5** зображена блок-схема підсистеми аеромеханічного перетворення. Вона містить структурні елементи, які визначають її нелінійність: механічна характеристика первинної вітротурбіни (NB1.0), механічні характеристики вторинних вітротурбін (NB2.1, NB2.2, NB2.3), операції множення (NB3.1, NB3.2, NB3.3), операція ділення (NB4.0).

Для виконання умови гомогенності [49] система розглядається в координатах приросту відповідних змінних. Після лінеаризації нелінійний елемент було описано рівнянням поверхні, що проходить через початок координат, типу:

$$y(x_1, x_2) = a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (75)$$

Отримана таким чином, блок-схема наведена на **рисунку 2.4**.

**Визначення координат робочої точки.** Першим етапом розрахунку коефіцієнтів моделі є визначення координат робочої точки. Значення змінних в робочій точці відповідають сталому режиму. Він характеризується нульовими значеннями входів інтеграторів (див. **рис. 2.5**).



**Рис. 5 Вихідна блок схема моделі ланки аеродинамічного перетворення**

Виходячи з даної властивості, можуть бути отримані наступні вирази:

$$M_{WT1.0}^{*0} = M_{T.0}^{*0}, \quad (76)$$

$$M_{WT2.1}^{*0} = M_{g.1}^{*0}, \quad (77)$$

$$M_{WT2.2}^{*0} = M_{g.2}^{*0}, \quad (78)$$

$$M_{WT2.3}^{*0} = M_{g.3}^{*0}, \quad (79)$$

де  $M_{WT1.0}^{*0}$  - момент первинної вітротурбіни в сталому режимі,

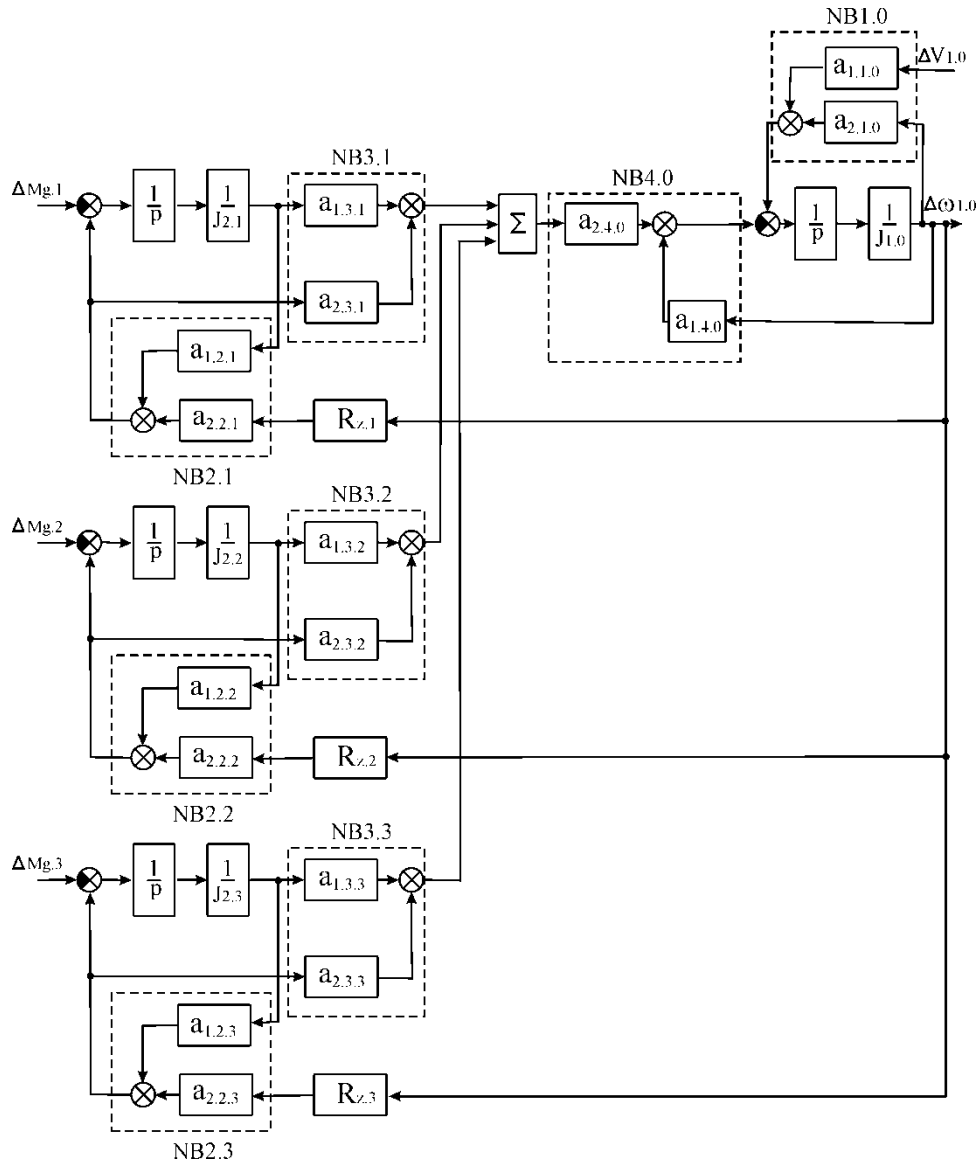
$M_{T.0}^{*0}$  - момент гальмування первинної аеромеханічної підсистеми в

сталому режимі,

$$M_{WT2.1}^{*0} \quad M_{WT2.2}^{*0} \quad M_{WT2.3}^{*0} \quad - \text{ момент вторинних вітротурбін в}$$

сталому режимі,

$$M_{g.1}^{*0}, \quad M_{g.2}^{*0}, \quad M_{g.3}^{*0} \quad - \text{ моменти на валу генераторів в сталому режимі.}$$



**Рис. 2.6** Блок-схема моделі ланки аеродинамічного перетворення після лінеаризації

Швидкості вторинних повітряних потоків визначаються кутовою швидкістю первинної вітротурбіни:

$$V_{2.1}^{*0} = R_{z.1}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0}, \quad V_{2.2}^{*0} = R_{z.2}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0}, \quad V_{2.3}^{*0} = R_{z.3}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0}, \quad (80)$$

де  $R_{z.1}^*$ ,  $R_{z.2}^*$ ,  $R_{z.3}^*$  - радіуси закріплення вторинних вітротурбін,

$\omega_{1.0}^{*0}$  - кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни в сталому

режимі.

Для проведення лінеаризації нелінійних блоків необхідно визначити значення наступного набору параметрів робочої точки ланки аеродинамічного перетворення:  $\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}, M_{T.0}^{*0}, P_{WT2.1}^{*0}, P_{WT2.2}^{*0}, P_{WT2.3}^{*0}, V_{2.1}^{*0}, V_{2.2}^{*0}, V_{2.3}^{*0}, M_{WT1.0}^{*0}, M_{WT2.1}^{*0}, M_{WT2.2}^{*0}, M_{WT2.3}^{*0}$ . Значення перших восьми з них можуть бути визначені в результаті розв'язання наступної системи трансцендентних рівнянь:

$$, \quad (81)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{WT1.0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - M_{T.0}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.1}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) - M_{g.1}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.2}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) - M_{g.2}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.3}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) - M_{g.3}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.1}^{*0} - \omega_{2.1}^{*0} \cdot M_{g.1}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.2}^{*0} - \omega_{2.2}^{*0} \cdot M_{g.2}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.3}^{*0} - \omega_{2.3}^{*0} \cdot M_{g.3}^{*0} = 0 \\ M_{T.0}^{*0} - \frac{P_{WT2.1}^{*0} + P_{WT2.2}^{*0} + P_{WT2.3}^{*0}}{\omega_{1.0}^{*0}} = 0 \end{array} \right.$$

де  $\omega_{2.1}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}$  - кутові швидкості вторинних вітротурбін.

Решта визначається за допомогою виразів (76), (77), (78), (79), (80).

В системі рівнянь (81) функції  $f_{WT1.0}, f_{WT2.1}, f_{WT2.2}, f_{WT2.3}$  являють собою вирази для сімейства механічних характеристик первинної і вторинних вітротурбін, і визначаються з наступних виразів:

$$, \quad (82)$$

$$f_{WT1.0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) = \frac{(V_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{1.0}^{*0}} \cdot C_{p1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})$$

$$f_{WT2.1}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) = \left( \frac{R_{2.1}^*}{R_{1.0}^*} \right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.1}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.1}^{*0}} \cdot Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) \quad (83)$$

$$f_{WT2.2}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) = \left( \frac{R_{2.2}^*}{R_{1.0}^*} \right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.2}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.2}^{*0}} \cdot Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) \quad (84)$$

$$f_{WT2.3}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) = \left( \frac{R_{2.3}^*}{R_{1.0}^*} \right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.3}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.3}^{*0}} \cdot Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) \quad (85)$$

Значення коефіцієнтів потужності вітротурбін  $Cp_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})$ ,  $Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0})$ ,  $Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0})$  та  $Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0})$  визначаються за допомогою наступних виразів (використовуючи [46]):

$$Cp_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{1.0}^{*max} \cdot \left( \frac{Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})}{Z_{1.0}^{*opt}} \right)^{b_1} \cdot \left[ -2 \cdot \left( \frac{Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})}{Z_{1.0}^{*opt}} \right)^{b_2} + 3 \right] & \text{при } 0 < Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) \leq Z_{1.0}^{*opt} \\ Cp_{1.0}^{*max} - \frac{Cp_{1.0}^{*max}}{(Z_{1.0}^{*xx} - Z_{1.0}^{*opt})^{b_3}} \cdot (Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - Z_{1.0}^{*opt})^{b_4} & \text{при } Z_{1.0}^{*opt} < Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) < Z_{1.0}^{*xx} \\ Cp_{1.0}^{*max} - \frac{Cp_{1.0}^{*max}}{(Z_{1.0}^{*xx} - Z_{1.0}^{*opt})^{b_5}} \cdot (Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - Z_{1.0}^{*opt})^{b_6} & \text{при } Z_{1.0}^{*xx} \leq Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) < +\infty \end{cases}$$

$$Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.1}^{*max} \cdot \left( \frac{Z_{2.1}^{*0}}{Z_{2.1}^{*opt}} \right)^{b_7} \cdot \left[ -2 \cdot \left( \frac{Z_{2.1}^{*0}}{Z_{2.1}^{*opt}} \right)^{b_8} + 3 \right] & \text{при } 0 < Z_{2.1}^{*0} \leq Z_{2.1}^{*opt} \\ Cp_{2.1}^{*max} - \frac{Cp_{2.1}^{*max}}{(Z_{2.1}^{*xx} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_9}} \cdot (Z_{2.1}^{*0} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{10}} & \text{при } Z_{2.1}^{*opt} < Z_{2.1}^{*0} < Z_{2.1}^{*xx} \\ Cp_{2.1}^{*max} - \frac{Cp_{2.1}^{*max}}{(Z_{2.1}^{*xx} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{11}}} \cdot (Z_{2.1}^{*0} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{12}} & \text{при } Z_{2.1}^{*xx} \leq Z_{2.1}^{*0} < +\infty \end{cases}$$

$$Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.2}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{2.2}^{*0}}{Z_{2.2}^{*opt}}\right)^{b_{13}} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{2.2}^{*0}}{Z_{2.2}^{*opt}}\right)^{b_{14}} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{2.2}^{*0} \leq Z_{2.2}^{*opt} \\ Cp_{2.2}^{*max} - \frac{Cp_{2.2}^{*max}}{(Z_{2.2}^{*xx} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{15}}} \cdot (Z_{2.2}^{*0} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{16}} & \text{при } Z_{2.2}^{*opt} < Z_{2.2}^{*0} < Z_{2.2}^{*xx} \\ Cp_{2.2}^{*max} - \frac{Cp_{2.2}^{*max}}{(Z_{2.2}^{*xx} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{17}}} \cdot (Z_{2.2}^{*0} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{18}} & \text{при } Z_{2.2}^{*xx} \leq Z_{2.2}^{*0} < +\infty \end{cases} \quad (86)$$

$$Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.3}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{2.3}^{*0}}{Z_{2.3}^{*opt}}\right)^{b_{19}} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{2.3}^{*0}}{Z_{2.3}^{*opt}}\right)^{b_{20}} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{2.3}^{*0} \leq Z_{2.3}^{*opt} \\ Cp_{2.3}^{*max} - \frac{Cp_{2.3}^{*max}}{(Z_{2.3}^{*xx} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{21}}} \cdot (Z_{2.3}^{*0} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{22}} & \text{при } Z_{2.3}^{*opt} < Z_{2.3}^{*0} < Z_{2.3}^{*xx} \\ Cp_{2.3}^{*max} - \frac{Cp_{2.3}^{*max}}{(Z_{2.3}^{*xx} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{23}}} \cdot (Z_{2.3}^{*0} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{24}} & \text{при } Z_{2.3}^{*xx} \leq Z_{2.3}^{*0} < +\infty \end{cases}$$

Де  $Cp_{1.0}^{*max}$ ,  $Cp_{2.1}^{*max}$ ,  $Cp_{2.2}^{*max}$ ,  $Cp_{2.3}^{*max}$  - максимальні значення коефіцієнтів потужності у відносних одиницях первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*opt}$ ,  $Z_{2.1}^{*opt}$ ,  $Z_{2.2}^{*opt}$ ,  $Z_{2.3}^{*opt}$  - оптимальні значення швидкохідності в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*xx}$ ,  $Z_{2.1}^{*xx}$ ,  $Z_{2.2}^{*xx}$ ,  $Z_{2.3}^{*xx}$  - значення швидкохідності при холостому ході в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*0}$ ,  $Z_{2.1}^{*0}$ ,  $Z_{2.2}^{*0}$ ,  $Z_{2.3}^{*0}$  - значення швидкохідності для сталого режиму в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$b_1, \dots, b_{24}$  - коефіцієнти апроксимації.

Значення швидкохідності первинної і вторинних вітротурбін в робочій точці визначаються за допомогою наступних виразів:

$$Z_{1.0}^{*0} = \frac{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{1.0}^*}{V_{1.0}^{*0}}, \quad Z_{2.1}^{*0} = \frac{\omega_{2.1}^{*0} \cdot R_{2.1}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.1}^*}, \quad Z_{2.2}^{*0} = \frac{\omega_{2.2}^{*0} \cdot R_{2.2}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.2}^*}, \quad Z_{2.3}^{*0} = \frac{\omega_{2.3}^{*0} \cdot R_{2.3}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.3}^*}, \quad (87)$$

де  $R_{1.0}^*$ ,  $R_{2.1}^*$ ,  $R_{2.2}^*$ ,  $R_{2.3}^*$  - значення радіусів первинної і вторинних вітротурбін у відносних одиницях, відповідно.

### Визначення коефіцієнтів лінеаризації.

Коефіцієнти  $a_{1.1.0}$  та  $a_{2.1.0}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.1.0} \\ a_{2.1.0} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB1.0}} f_{NB1.0}(X_{NB1.0}), \quad X_{NB1.0} = \begin{pmatrix} \omega_{1.0}^{*0} \\ V_{1.0}^{*0} \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad f_{NB1.0}(X_{NB1.0}) = f_{WT1}(\omega_{1.0}^*, V_{1.0}^*). \quad (88)$$

Коефіцієнти  $a_{1.2.1}$  та  $a_{2.2.1}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.2.1} \\ a_{2.2.1} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2.1}} f_{NB2.1}(X_{NB2.1}), \quad X_{NB2.1} = \begin{pmatrix} \omega_{2.1}^{*0} \\ V_{2.1}^{*0} \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad f_{NB2.1}(X_{NB2.1}) = f_{WT2.1}(\omega_{2.1}^*, V_{2.1}^*). \quad (89)$$

Коефіцієнти  $a_{1.2.2}$  та  $a_{2.2.2}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.2.2} \\ a_{2.2.2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2.2}} f_{NB2.2}(X_{NB2.2}), \quad X_{NB2.2} = \begin{pmatrix} \omega_{2.2}^{*0} \\ V_{2.2}^{*0} \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad f_{NB2.2}(X_{NB2.2}) = f_{WT2.2}(\omega_{2.2}^*, V_{2.2}^*). \quad (90)$$

Коефіцієнти  $a_{1.2.3}$  та  $a_{2.2.3}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.2.3} \\ a_{2.2.3} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2.3}} f_{NB2.3}(X_{NB2.3}), \quad X_{NB2.3} = \begin{pmatrix} \omega_{2.3}^{*0} \\ V_{2.3}^{*0} \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad f_{NB2.3}(X_{NB2.3}) = f_{WT2.3}(\omega_{2.3}^*, V_{2.3}^*). \quad (91)$$

Коефіцієнти  $a_{1.3.1}$  та  $a_{2.3.1}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.3.1} \\ a_{2.3.1} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3.1}} f_{NB3.1}(X_{NB3.1}), \quad X_{NB3.1} = \begin{pmatrix} \omega_{2.1}^{*0} \\ M_{WT2.1}^{*0} \end{pmatrix}, \quad \text{де} \quad f_{NB3.1}(X_{NB3.1}) = \omega_{2.1}^* \cdot M_{WT2.1}^*. \quad (92)$$

Коефіцієнти  $a_{1.3.2}$  та  $a_{2.3.2}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.3.2} \\ a_{2.3.2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3.2}} f_{NB3.2}(X_{NB3.2}) \quad , \text{де} \quad X_{NB3.2} = \begin{pmatrix} \omega_{2.2}^{*0} \\ M_{WT2.2}^{*0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad f_{NB3.2}(X_{NB3.2}) = \omega_{2.2}^* \cdot M_{WT2.2}^* . \quad (93)$$

Коефіцієнти  $a_{1.3.3}$  та  $a_{2.3.3}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.3.3} \\ a_{2.3.3} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3.3}} f_{NB3.3}(X_{NB3.3}) \quad , \text{де} \quad X_{NB3.3} = \begin{pmatrix} \omega_{2.3}^{*0} \\ M_{WT2.3}^{*0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad f_{NB3.3}(X_{NB3.3}) = \omega_{2.3}^* \cdot M_{WT2.3}^* . \quad (94)$$

Коефіцієнти  $a_{1.4.0}$  та  $a_{2.4.0}$  визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.4.0} \\ a_{2.4.0} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB4.0}} f_{NB4.0}(X_{NB4.0}) \quad , \text{де} \quad X_{NB4.0} = \begin{pmatrix} \omega_{1.0}^{*0} \\ P_{WT2.1}^{*0} + P_{WT2.2}^{*0} + P_{WT2.3}^{*0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad (95)$$

$$f_{NB4.0}(X_{NB4.0}) = \frac{P_{WT2.1}^* + P_{WT2.2}^* + P_{WT2.3}^*}{\omega_{1.0}^*} .$$

**Визначення передавальної матриці ланки електромеханічного перетворення.** На підставі лінеаризованої моделі ланки аеродинамічного мультиплікування (див. рис.2.6) може бути складена модель в змінних стану (прохідна матриця відсутня) [47]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases} . \quad (96)$$

Системі (22) відповідають такі матриці:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a_{2.1.0} - a_{1.4.0} - a_{2.4.0} \cdot (a_{2.3.1} a_{2.2.1} R_{Z1} + a_{2.3.2} a_{2.2.2} R_{Z2} + a_{2.3.3} a_{2.2.3} R_{Z3})}{J_{1.0}} & \frac{-a_{2.4.0} (a_{1.3.1} a_{2.3.1} a_{1.2.1})}{J_{1.0}} & \frac{-a_{2.4.0} (a_{1.3.2} a_{2.3.2} a_{1.2.2})}{J_{1.0}} & \frac{-a_{2.4.0} (a_{1.3.3} a_{2.3.3} a_{1.2.3})}{J_{1.0}} \\ \frac{a_{2.2.1} R_{Z1}}{J_{2.1}} & \frac{a_{1.2.1}}{J_{2.1}} & 0 & 0 \\ \frac{a_{2.2.2} R_{Z2}}{J_{2.2}} & 0 & \frac{a_{1.2.2}}{J_{2.2}} & 0 \\ \frac{a_{2.2.3} R_{Z3}}{J_{2.3}} & 0 & 0 & \frac{a_{1.2.3}}{J_{2.3}} \end{bmatrix}$$



$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{(-1)}{J_{2.1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(-1)}{J_{2.2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(-1)}{J_{2.3}} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \Delta\omega_{1.0}^* \\ \Delta\omega_{2.1}^* \\ \Delta\omega_{2.2}^* \\ \Delta\omega_{2.3}^* \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta M_{g.1}^* \\ \Delta M_{g.2}^* \\ \Delta M_{g.3}^* \end{bmatrix}$$

де  $J_{1.0}^*$ ,  $J_{2.1}^*$ ,  $J_{2.2}^*$ ,  $J_{2.3}^*$  - моменти інерції аеромеханічних підсистем,

$\Delta M_{g.1}^{*0}$ ,  $\Delta M_{g.2}^{*0}$ ,  $\Delta M_{g.3}^{*0}$  - приріст моментів генераторів,

$\Delta\omega_{1.0}^{*0}$ ,  $\Delta\omega_{2.1}^{*0}$ ,  $\Delta\omega_{2.2}^{*0}$ ,  $\Delta\omega_{2.3}^{*0}$  - приріст кутових швидкостей аеромеханічної підсистеми.

Передавальна матриця визначається за допомогою матричного виразу [47]:

$$W(p) = C \cdot (p \cdot I - A)^{-1} \cdot B, \quad (98)$$

де  $I$  - одинична матриця.

Отримана передавальна матриця має великі розміри, внаслідок цього не може бути наведена, в рамках даної роботи в розгорнутому вигляді, проте може бути використана в подальших обчисленнях при процедурі синтезу регулятора.

### Режим автооптимізації електромеханічної системи ВЕУ

Ефект автооптимізації ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням був виявлений при дослідженні поведінки цієї системи в режимі стабілізації кутової швидкості вторинних вітротурбін на номінальному значенні [50]. Він полягає в тому, що при абсолютно жорсткої механічної характеристиці генераторів система автоматично вибирає стану, оптимальні з точки зору максимального відбору потужності.

Даний ефект був описаний тільки як феномен. З цього, виникла необхідність його пояснення і створення теорії виникнення цього явища з метою його

використання в практиці проектування подібних систем.

### 2.2.1. Обґрунтування залежності кутової швидкості первинної вітротурбіни від швидкості первинного вітрового потоку забезпечує оптимальний відбір потужності

**Положення 1.** У режимі оптимального відбору потужності залежність оптимальної кутової швидкості обертання вітротурбіни від швидкості первинного вітрового потоку являє собою лінійну функцію, графік якої проходить через номінальну робочу точку.

Дане твердження є очевидним. Дійсно, за визначенням швидкохідності стосовно первинної вітротурбіни:

$$Z_1 = \frac{\omega_1 \cdot R_{BT1}}{V_1}, \quad (99)$$

де: -  $\omega_1$  кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни,

-  $R_{BT1}$  радіус первинної вітротурбіни,

-  $V_1$  швидкість первинного вітрового потоку.

Для оптимального режиму, з урахуванням (99) справедливо співвідношення:

$$\omega_{1opt} = \frac{Z_{1opt} \cdot V_1}{R_{BT1}}, \quad (100)$$

де:  $\omega_{1opt}$  - оптимальна кутова швидкість обертання вітротурбіни,

$Z_{1opt}$  - оптимальна швидкохідність вітротурбіни, що відповідає

максимальному значенню коефіцієнта потужності -  $C_{P1}^{\max}$

Так як значення  $Z_{1opt}$  і  $R_{BT1}$  є константами, то залежність:

$$\omega_{1opt} = f_{opt}(V_1) \quad (101)$$

є прямою пропорційністю. Що і підтверджує наведені вище положення.

## 2.2. Система базисних і відносних величин

З метою наочного представлення результатів аналізу ефекту автооптимізації введемо систему відносних величин. При цьому в якості базисних вибираються наступні величини:

$V_1^{nom}$  - номінальна швидкість первинного повітряного потоку (швидкість вітру);

$\omega_1^{nom}$  - номінальна кутова швидкість обертання первинної аеромеханічної підсистеми;

$M_{BT1}^{nom}$  - номінальний момент створюваний первинної вітротурбін;

$P_{BT1}^{nom}$  - номінальна механічна потужність первинної вітротурбіни;

$V_2^{nom}$  - номінальна швидкість вторинного повітряного потоку;

$\omega_2^{nom}$  - номінальна кутова швидкість обертання вторинної аеромеханічної підсистеми;

$M_{BT2}^{nom}$  - номінальний момент створюваний вторинної вітротурбін;

$P_{BT2}^{nom}$  - номінальна механічна потужність вторинної вітротурбіни.

У першому наближенні розглянемо ідеальну систему без втрат. Даний ефект проявляється тільки в сталому режимі, тому динамічні властивості системи в

даному аналізі не розглядаються.

Відносна швидкість первинного повітряного потоку:

$$V_1^* = \frac{V_1}{V_1^{nom}}, \quad (102)$$

де  $V_1$  - фактична швидкість первинного повітряного потоку.

Відносна кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни:

$$\omega_1^* = \frac{\omega_1}{\omega_1^{nom}}, \quad (103)$$

де  $\omega_1$  - фактична кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни.

Відносна потужність первинної вітротурбіни:

$$P_{BT1}^* = \frac{P_{BT1}}{P_{BT1}^{nom}}, \quad (104)$$

де  $P_{BT1}$  - фактична потужність первинної вітротурбіни.

Відносна швидкість вторинного повітряного потоку:

$$V_2^* = \frac{V_2}{V_2^{nom}}, \quad (105)$$

де  $V_2$  - фактична швидкість вторинного повітряного потоку.

Відносна кутова швидкість обертання вторинної вітротурбіни:

$$\omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_2^{nom}}, \quad (106)$$

де  $\omega_2$  - фактична кутова швидкість обертання вторинної вітротурбіни.

Відносна потужність вторинної вітротурбіни:

$$P_{BT2}^* = \frac{P_{BT2}}{P_{BT2}^{nom}}, \quad (107)$$

де  $P_{BT2}$  - фактична потужність вторинної вітротурбіни.

**Гіпотеза про квазіоптимальний режим.** На початку розгляду була прийнята гіпотеза про те, що спостережуваний режим є насправді Квазіоптимальний. В рамках даної гіпотези передбачається, що існує деякий ідеальний режим автооптимізації системи. Знаходження і опис цього режиму були б "ключем" до розуміння спостережуваного явища.

Дійсно, на практиці ефект спостерігався тільки в околицях номінальної робочої точки. При віддаленні від неї ефект поступово зникав, що виражалось у збільшенні відхилення від оптимального значення кутової швидкості обертання первинної вітротурбіни [50].

Потрібно відзначити, що для ідеального режиму властивість, викладене в положенні 1, повинно виконуватися на всьому робочому діапазоні швидкостей вітрового потоку, а не тільки в околицях робочої точки.

**Опис системи з аеродинамічним мультиплікуванням в просторі**

$$P^*(\omega_1^*, V_1^*)$$

Відповідно до п.п. 2.2. розглянемо функцію первинної потужності у відносних одиницях:

$$P_1^* = f_1(\omega_1^*, V_1^*) = (V_1^*)^3 \cdot C_{P1}^*(Z_1^*), \quad (108)$$

де:  $C_{P1}^*(Z_1^*)$  - залежність коефіцієнта потужності від швидкохідності первинної вітротурбіни.

Швидкохідність в (108) визначається з виразу:

$$Z_1^* = \frac{\omega_1^* \cdot R_{BT1}^*}{V_1^*}, \quad (109)$$

У просторі  $P^*(\omega_1^*, V_1^*)$  вираз (108) буде описувати конічну поверхню зображену на рисунку 2.7.

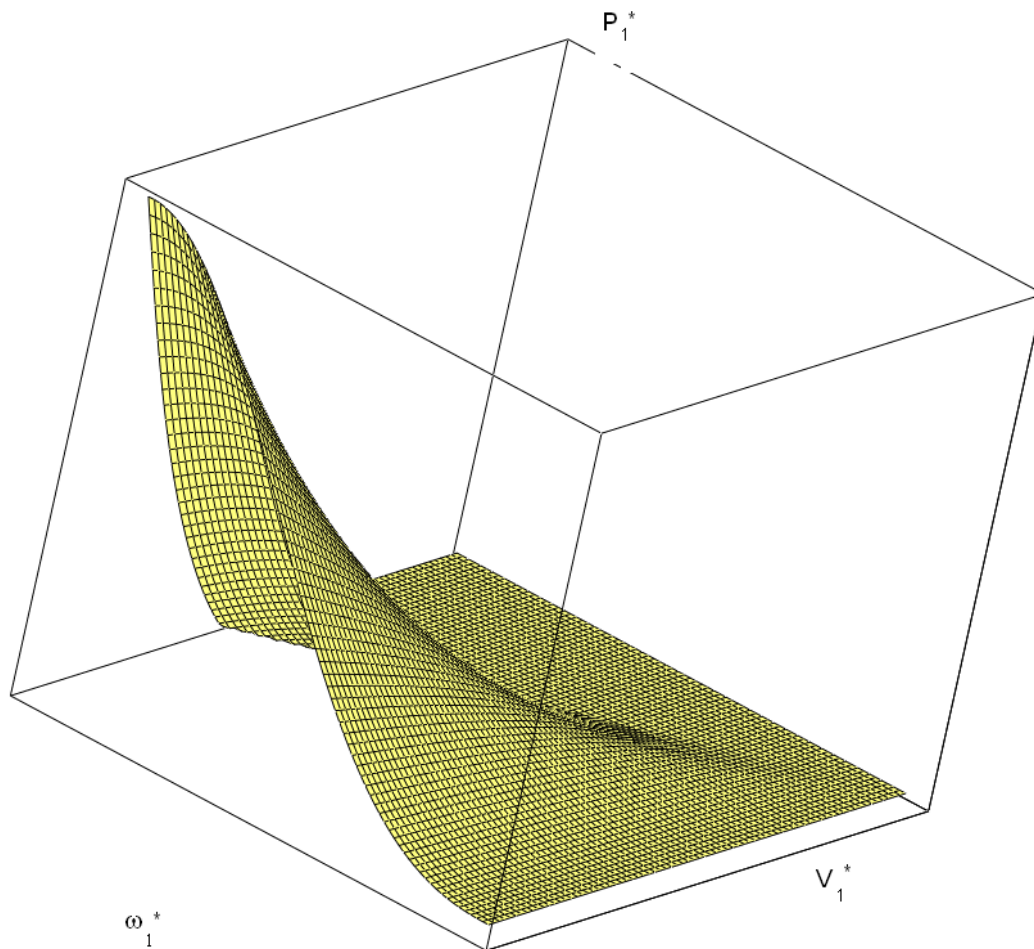


Рис. 2.7. Поверхня стану первинної аеромеханічної

## підсистеми

Розглянемо також аналогічну функцію потужності вторинної аеромеханічної підсистеми:

$$P_2^* = f_2(\omega_2^*, V_2^*) = (V_2^*)^3 \cdot C_{P_2}^*(Z_2^*) \quad (110)$$

де:  $C_{P_2}^*(Z_2^*)$  - залежність коефіцієнта потужності від швидкохідності вторинної віротурбіни.

Швидкохідність в (110) визначається з виразу:

$$Z_2^* = \frac{\omega_2^* \cdot R_{BT2}^*}{V_2^*} \quad (111)$$

Швидкість вторинного повітряного потоку пропорційна кутовий швидкості первинної віротурбіни, тому в системі відносних одиниць:

$$V_2^* = \omega_1^* \quad (112)$$

З цього функція (110) може бути записана в наступному вигляді:

$$P_2^* = f_2(\omega_2^*, \omega_1^*) = (\omega_1^*)^3 \cdot C_{P_2}^*(Z_2^*) \quad (113)$$

Нагадаємо, що даний ефект розглядається в сталому режимі. З цього повинен виконуватися баланс механічної потужності:

$$P_1^* = P_2^* = P^{**} \quad (114)$$

Завдяки виразами (112) і (114) поверхні (108) і (113) можуть бути побудовані в одному просторі. Робочі точки системи знаходяться на лінії перетину цих двох поверхонь.

Шукана залежність  $\omega_1^* = f(V_1^*)$  буде являти собою проекцію лінії робочих точок на площину  $(\omega_1^*, V_1^*)$ .

Таким чином може бути сформульована геометрична інтерпретація ефекту автооптимізації:

**Положення 2.** *Ефект автооптимізації виникає за умови, що проекція лінії перетину поверхонь  $f_1$  і  $f_2$  на площину  $(\omega_1^*, V_1^*)$  буде являти собою пряму лінію, що проходить через проекцію точки номінального режиму.*

Положення 2 дозволяє пояснити ефект автооптимізації і сформулювати умови його виникнення.

Виникнення даного ефекту обумовлено геометричними властивостями розглянутих поверхонь. Зокрема, умова в Положенні 1 може наступити, в разі якщо дві поверхні являють собою ідентичні поверхні, повернені одна відносно іншої на кут  $90^\circ$ .

Це можливо при ідентичності характеристик  $C_{P2}^*(Z_2^*)$  і  $C_{P1}^*(Z_1^*)$  і при регулюванні швидкості генератора по закону:

$$\omega_2^* = V_1^* \quad (15)$$

Описана ситуація зображена на рисунку 2.8.

Даний режим можна вважати ідеальним з точки зору того, що він існує на всьому діапазоні зміни швидкості первинного повітряного потоку.



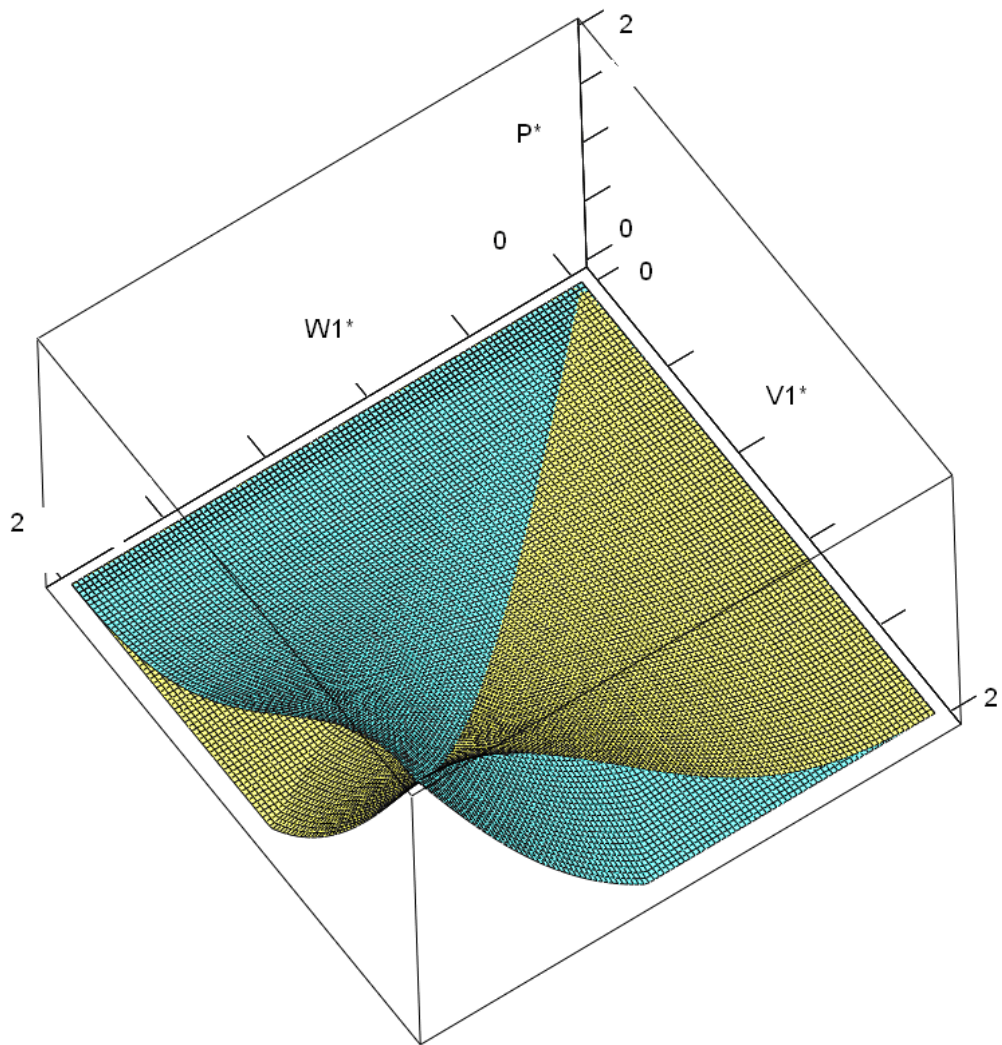


Рис. 2.8. Графічна інтерпретація ідеального режиму автооптимізації

В реально спостерігається ефект квазіавтооптимізації значення кутової швидкості генератора було фіксовано на рівні номінальної в наслідок абсолютної жорсткості характеристики генератора. Графічна інтерпретація даної ситуації розглянута на рисунку 2.9.

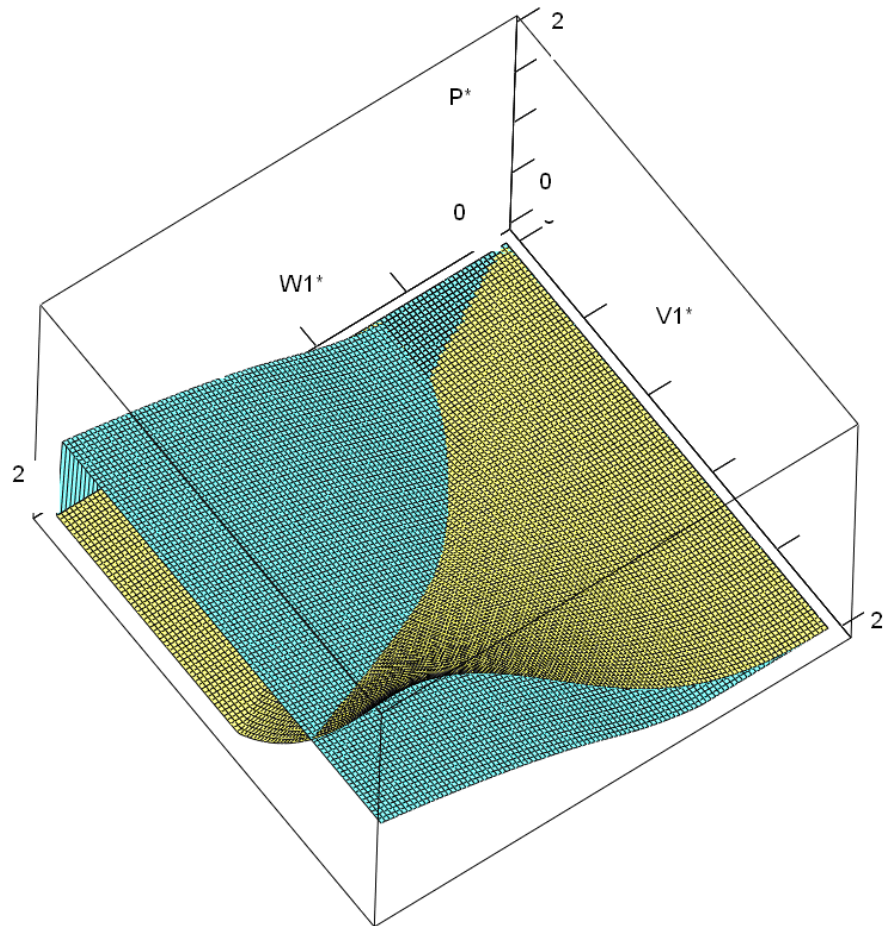


Рис. 9. Графічна інтерпретація режиму квазіавтооптимізації

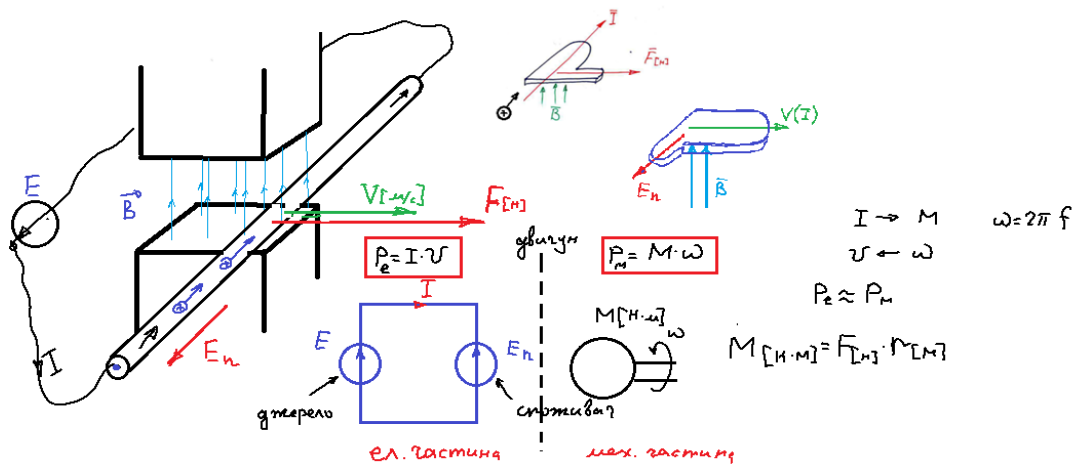
З рисунка видно, що умова Положення 2 виконується тільки на окремій ділянці в околицях номінальної точки (на рисунку вона розташована в центрі нижньої площині).

Квазілінійний характер характеристики спостерігається вище і нижче номінальної точки. При цьому, верхня частина характеристики не використовується, тому що зверху починається режим обмеження потужності. З цього, для розширення діапазону використання даного ефекту за швидкістю первинного вітрового потоку за доцільне розрахунок номінального режиму не на номінальну швидкість первинного вітрового потоку, а на кінець квазіоптимального режиму

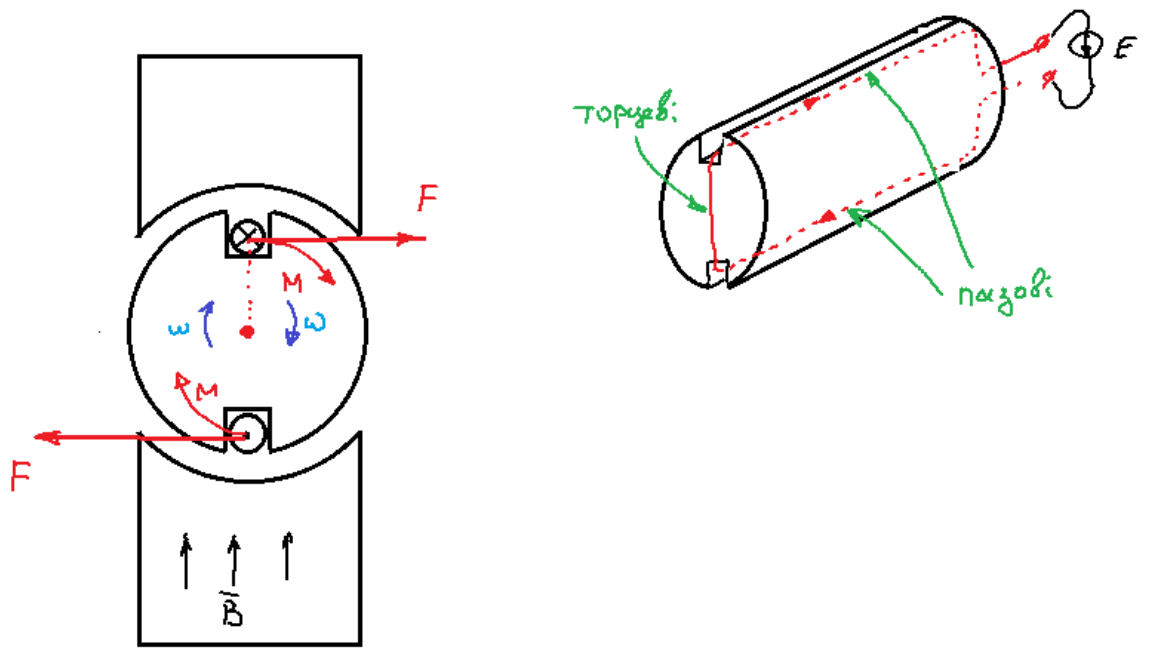
## ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Електромеханічне перетворення - це процес, при якому енергія перетворюється з електричної форми на механічну або навпаки. Цей процес лежить в основі роботи електродвигуни, генератори, трансформатори та різні датчики.

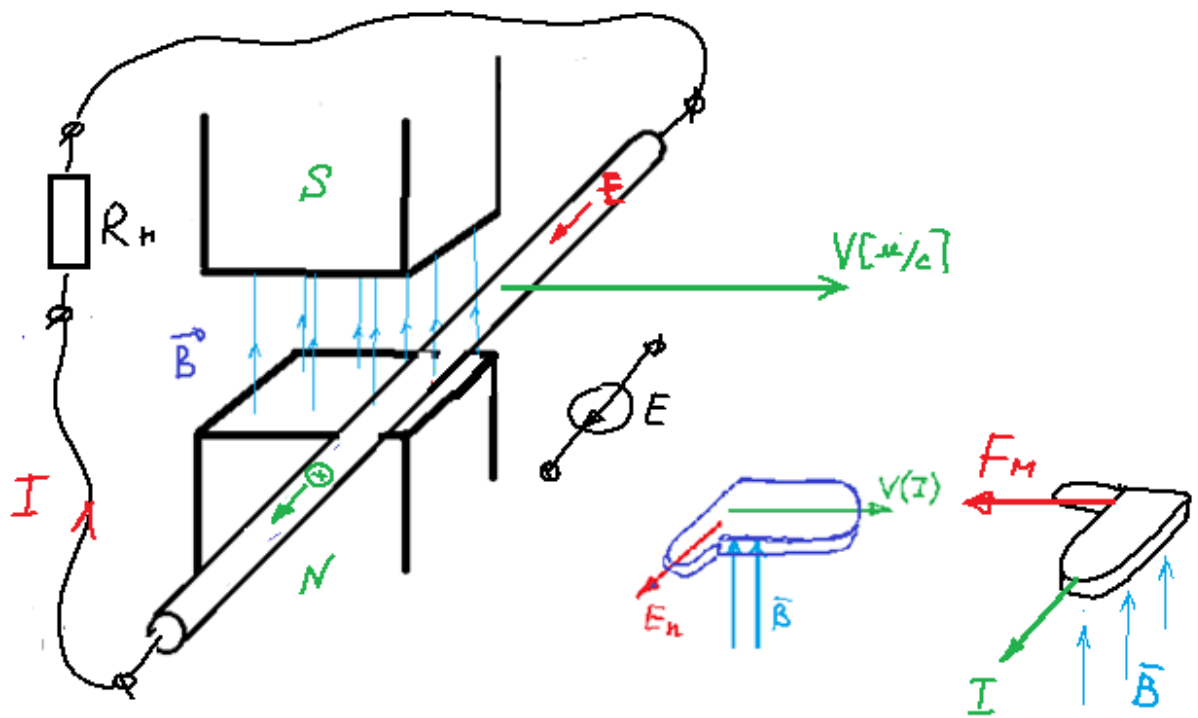
Електромеханічне перетворення ґрунтується на законах електромагнітної індукції та взаємодії електричних та магнітних полів з механічними елементами. Залежно від напрямку перетворення, пристрої можуть бути поділені на два основні типи:



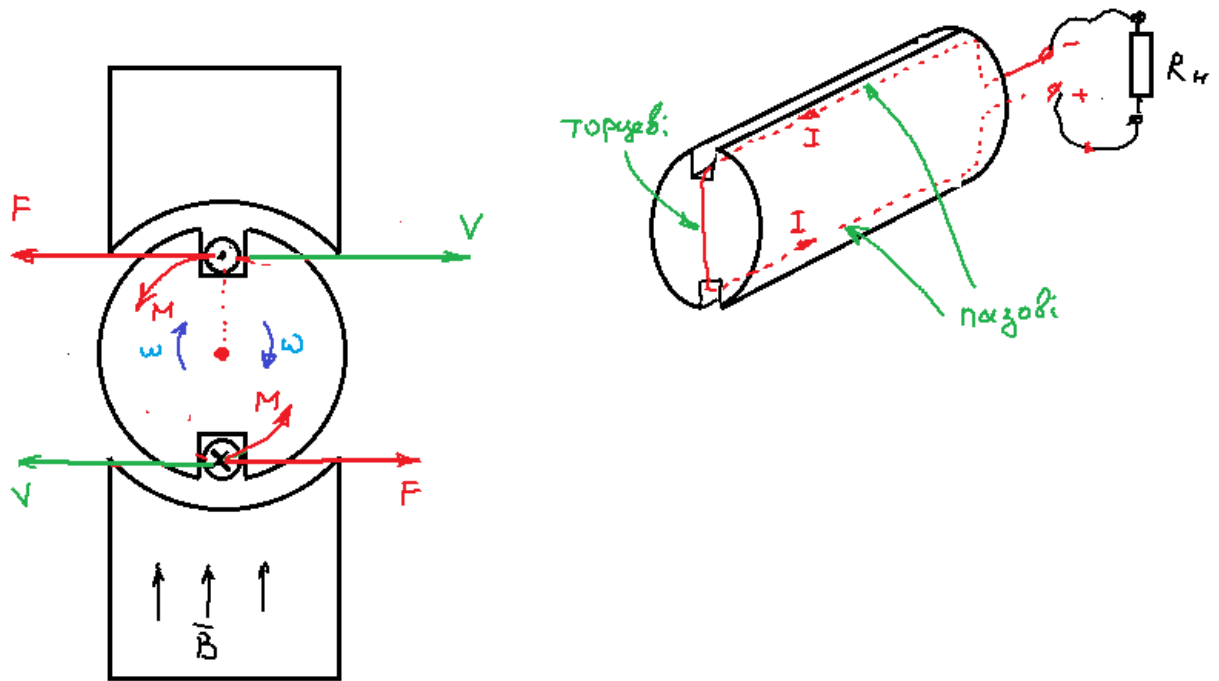
Електродвигуни перетворюють електричну енергію в механічну. Це досягається за рахунок магнітного поля, створюваного струмом, який взаємодіє з елементами статора та ротора, викликаючи їхнє обертання.



Генератори працюють навпаки: вони перетворюють механічну енергію в електричну.

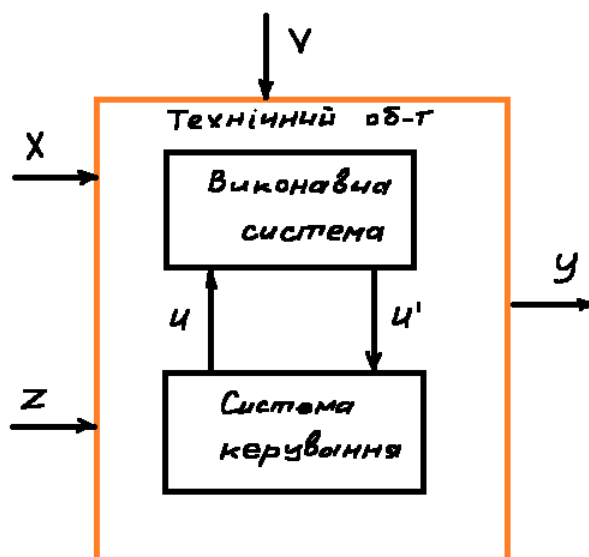


При обертанні ротора у магнітному полі створюється електричний струм завдяки закону Фарадея.



## СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Система керування електромеханічною системою - це сукупність пристроїв та алгоритмів, призначених для керування рухом, становищем або режимом роботи електромеханічних компонентів. Управління такими системами необхідне ефективного виконання завдань, потребують високої точності, надійності і стабільності роботи, що особливо важливо у робототехніці, транспорті, промисловості та побутової техніці.



Типова система керування електромеханічною системою включає декілька ключових елементів:

**Контролер** – мозок системи управління. Він отримує та обробляє дані від датчиків та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Сучасні контролери можуть бути засновані на мікроконтролерах, програмованих логічних контролерах (ПЛК) або складніших вбудованих системах.

**Датчики** - відстежують параметри роботи електромеханічної системи, такі як швидкість, кут повороту, сила та положення. Приклади таких датчиків включають датчики положення (енкодери), датчики швидкості, сили та інші.

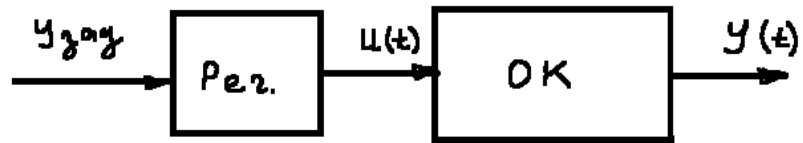
**Виконавчі механізми** - це компоненти, що перетворюють керуючі сигнали на фізичну дію, наприклад, електродвигуни, клапани, реле та інші механізми.

**Алгоритми управління** - задають логіку роботи всієї системи та забезпечують виконання конкретних завдань. До основних алгоритмів належать ПІД-регулятори (пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори), адаптивні та предиктивні алгоритми, а також алгоритми на основі штучного інтелекту.

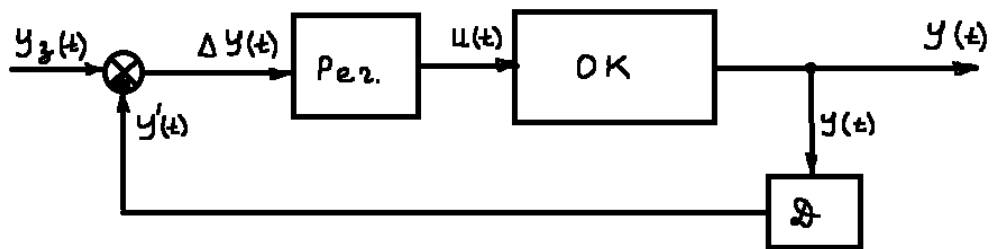
### **Принцип роботи системи керування**

Робота системи керування електромеханічною системою заснована на наступному циклі. Збір даних - Контролер зчитує дані з датчиків. Аналіз та розрахунок - дані аналізуються та використовуються для розрахунку керуючих сигналів. Керуюча дія - контролер відправляє сигнал на виконавчі механізми. Зворотній зв'язок — датчики знову відстежують зміни, фіксуючи результат впливу, що управляє, і цикл повторюється. Системи керування електромеханічними системами поділяються на такі основні типи:

*Системи із розімкненим контуром керування* — система без зворотного зв'язку, в якій сигнал керування залежить лише від поточного вхідного сигналу. Вони простіші, але менш точні, тому що не враховують відхилення.

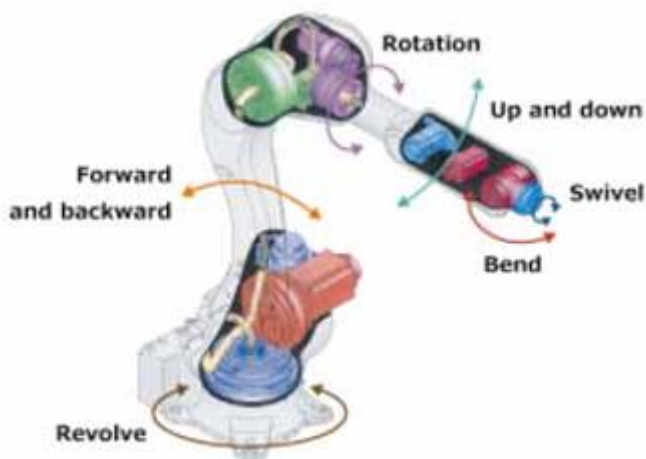


Системи із замкнутим контуром управління - система із зворотним зв'язком, де контролер отримує дані про фактичний стан системи. Це дозволяє враховувати відхилення та забезпечує високу точність та стабільність роботи.



Адаптивні системи керування — складні системи, які можуть змінювати параметри керування залежно від поточних умов роботи та характеристик системи.

## ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРОВ



Джерело: Kawasaki

## Маніпуляційні системи роботів

[<https://naurok.com.ua/manipulyaciyini-sistemi-robotiv-292614.html>]

На рис. 1-3 показані конструкції маніпуляторів з трьома переносними ступенями рухливості у різних системах координат та їх робочі зони. Маніпулятори, що працюють у прямокутній системі координат (рис.1), мають робочу зону у вигляді паралелепіпеда. Тут здійснюються лише поступальні переміщення, і тому така система координат є найбільш зручною для виконання прямолінійних рухів. Крім того, вона максимально спрощує програмування робота, так як воно зазвичай виконується саме в прямокутній системі координат, і, отже, у цьому випадку не потрібно перерахувати програми з однієї системи координат до іншої.

У маніпуляторах, що працюють у циліндричній системі координат (рис.2), поруч із поступальними переміщеннями виробляється одне кутове переміщення (по колу). Відповідно, робоча зона обмежена циліндричними поверхнями.

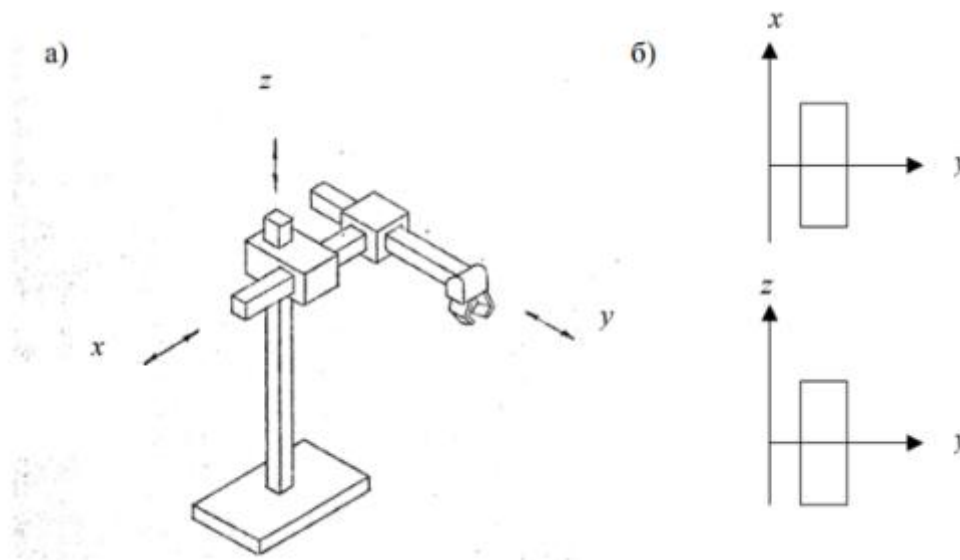


Рис.1. Маніпулятор із прямокутною системою координат (а) та його робоча зона (б).



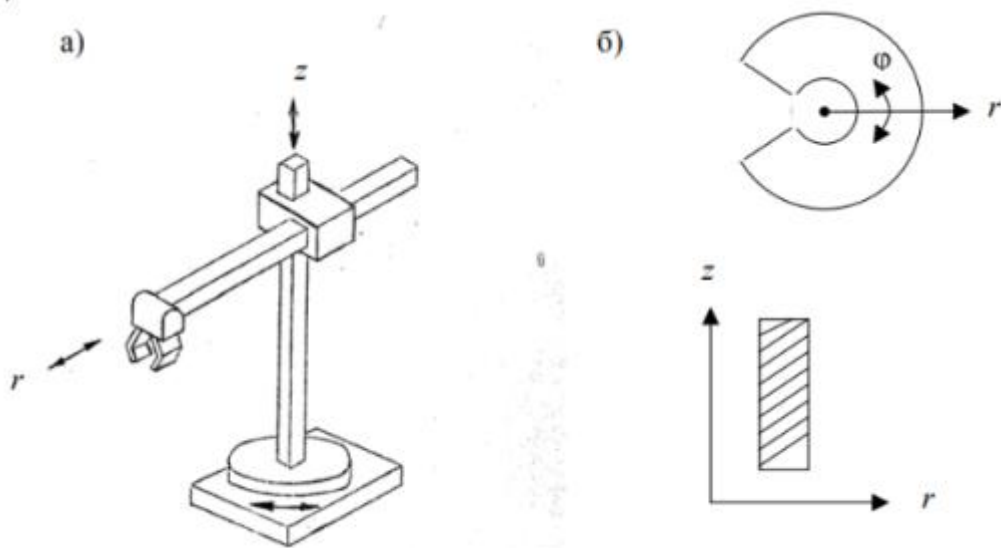


Рис.2. Маніпулятор з циліндричною системою координат (а) та його робоча зона (б).

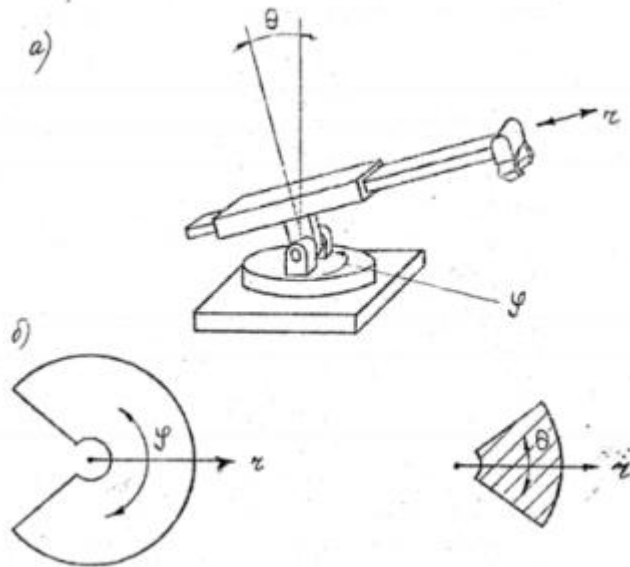


Рис.3. Маніпулятор із сферичною системою координат (а) та його робоча зона (б)

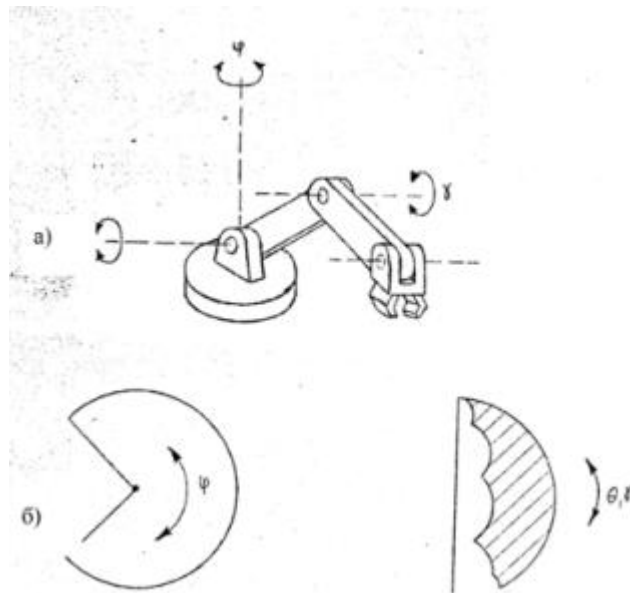


Рис.4. Маніпулятор з кутовою системою координат (а) та його робоча зона (б).

У сферичній системі координат (рис..3) здійснюються вже два кутові переміщення та робоча зона обмежена сферичними поверхнями. Таку систему координат має, наприклад, маніпулятор промислового робота, показаного на рис.5. Маніпулятори з такою системою координат, як правило, складніші, ніж з циліндричною системою, проте компактніші.

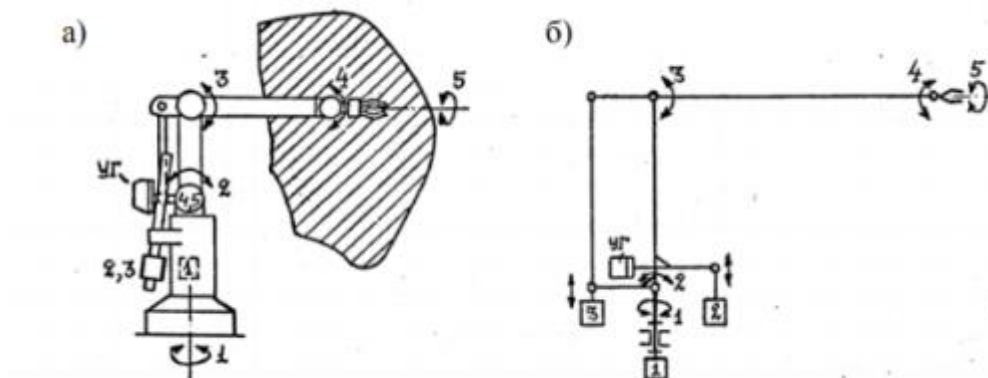


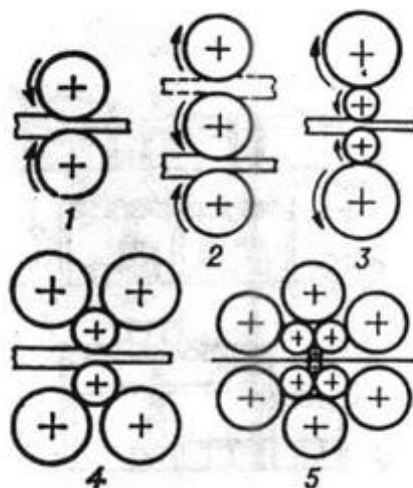
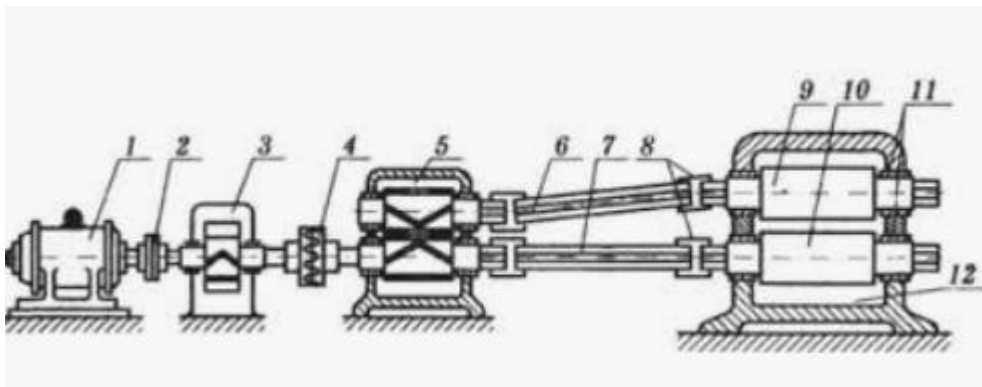
Рис.5 .Загальний вигляд маніпулятора робота ІРб-6 фірми АСЕА (а) та його кінематична схема (б).

Показаний на рис.4 маніпулятор із кутовою системою координат виробляє лише кутові переміщення, тобто. всі його ланки є шарніри. (У зв'язку з цим

часто такі маніпулятори називають ще шарнірними та антропоморфними.)  
Роботи з такого типу маніпуляторами завдяки можливості останніх складатися, практично не виступаючи за габарит основи робота, мають найбільшу компактність, хоча і найбільш складні в управлінні.

### ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ПРОКАТНОГО СТАНУ.

Прокатний стан - це система машин (агрегат) для обробки тиском металів між валками, що обертаються (тобто для прокатки), а також для виконання допоміж. операцій (транспортування вихідної продукції зі складу до нагрівальних печей і до валків стану, пересування металу, що прокочується в процесі прокатки, кантівка смуг металу, правка, різання їх на частини, маркування або таврування, змотування в бунти або рулони



### Пример синтеза математической модели.

Для иллюстрации метода рассмотрим пример построения относительно несложной математической модели электрообладания электропривода валка для проката листового профиля, функциональная схема якого представлена на рисунке 1. Валок приводится в вращение с помощью двух двигателей постоянного тока M1, M2, жестко закрепленных на торцах валка. Двигатели подключены к источнику энергии через импульсные преобразователи постоянного напряжения, коэффициент заполнения которых формируется схемой управления "Controller" через драйверы "Dr". Схема управления формирует сигналы управления на основе сигналов обратной связи от датчиков тока якоря CS1, CS2, датчика угловой скорости вращения SpS валка и сигнала задания скорости вращения  $\omega_{\text{target}}$ .

Управление приводом осуществляется с помощью подчиненного регулирования, организованного по двухканальной схеме.

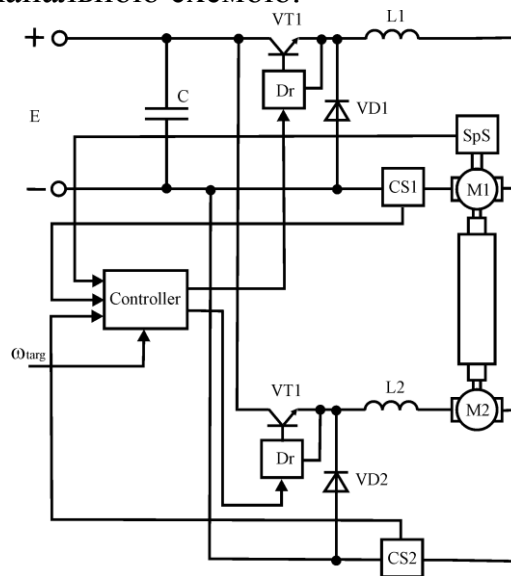


Рис.1. Функциональная схема привода

Схема энергетического тракта, соответствующая функциональной схеме, представлена на рисунке 2. Энергетический тракт является двухканальной структурой. Источником энергии является сеть постоянного тока, а приемником непосредственно механизм валка.

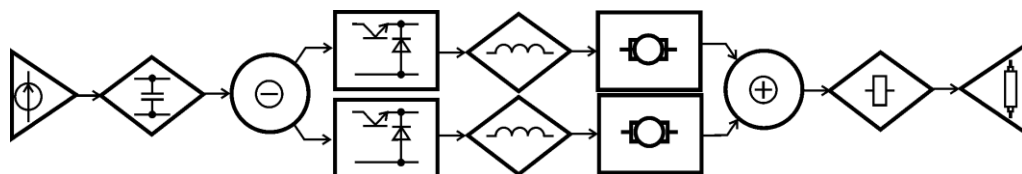


Рис.2. Схема энергетического тракта

Схема содержит два общих накопителя энергии: входную емкость для сглаживания пульсаций входного напряжения преобразователей постоянного напряжения и маховые массы исполнительного механизма и двигателей. Разгалужения потоков

енергії описується за допомогою розподільника та консолідатора, відповідно. На наступному етапі елементи схеми енергетичного тракту замінюються відповідними елементами бібліотеки елементів візуально-блокової моделі (ВБМ) (див. рис 3). Елементи ВБМ розміщуються у тих самих позиціях, як і елементи СЕТ. Після розміщення елементів ВБМ проводиться їхнє з'єднання, показане на малюнку 3, у вигляді спрямованих відрізків. Спочатку вводяться прямі причинно-наслідкові зв'язки, та був замикаються зворотні зв'язку. Завершеність моделі формально визначається відсутністю "незакритих" входів всіх елементів ВБМ. Крім того, у структурі ВБМ присутні входні величини, у розглянутому випадку – це коефіцієнти заповнення імпульсних перетворювачів постійної напруги.

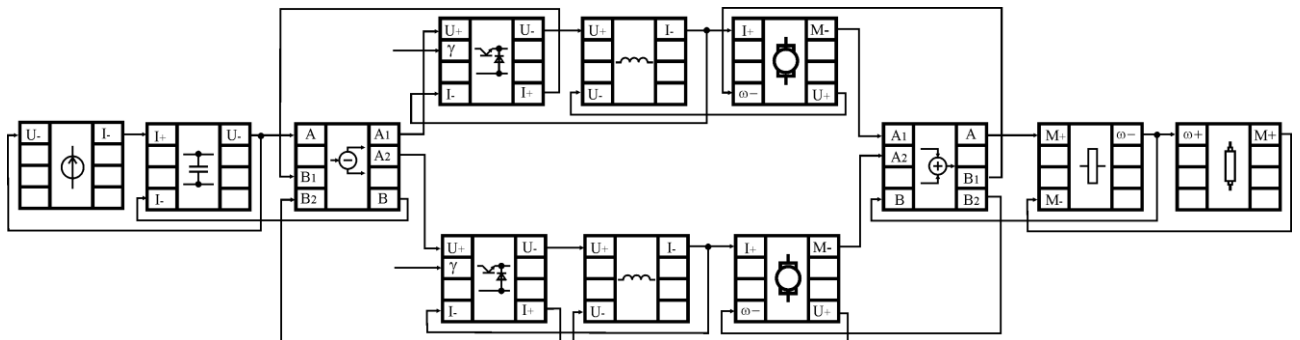


Рис.3. Схема візуально-блокової моделі

Бібліотека елементів ВБМ.

Далі розглянемо фрагмент бібліотеки для побудови розглянутої ВБМ. Джерело постійної напруги розглянуто малюнку 4. Схема випрямлення, у цьому поданні, не розглядається. Причому параметр визначає нахил вольтамперної характеристики джерела постійної напруги.

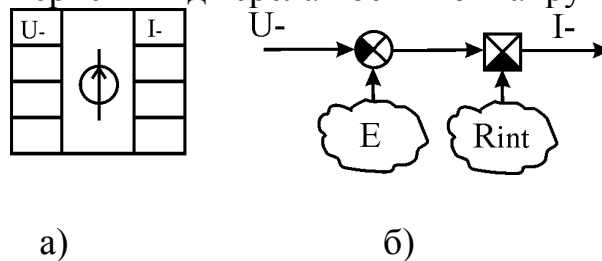


Рис.4. Джерело постійної напруги: а – позначення; б – візуальна модель

Ємнісний накопичувач розглянутий малюнку 5. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням початкової напруги на ємності. У цьому припущенні не враховуються втрати ємності. Входними величинами є струм заряду та струм розряду ємності відповідно. Вихідною величиною є напруга на ємності.

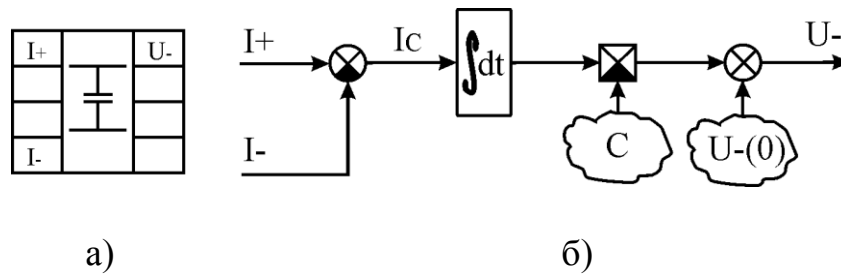


Рис.5. Ємнісний накопичувач: а – позначення; б – візуальна модель

Двоканальний розподільник розглянуто малюнку 6. При напрямі енергії зліва праворуч пряма причинно-наслідковий зв'язок "А" зображується простим вузлом. Зворотного зв'язку "В", що проходить через розподільник енергії, відповідає сумирний вузол (як було сказано вище).

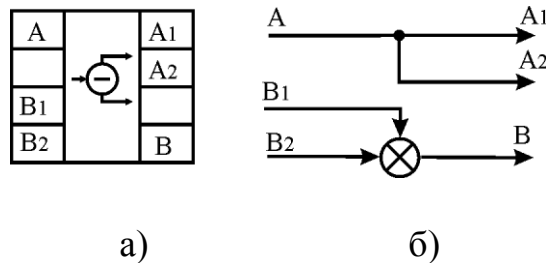


Рис.6. Простой двухканальный распределительный узел: а – обозначение; б – визуальная модель

Імпульсний перетворювач постійної напруги понижуючого типу розглянутий малюнку 7. Дана модель визначає імпульсний джерело в середніх, період роботи ключа, величинах. Такий опис значно скорочує час моделювання електротехнічного комплексу, до складу якого входить імпульсне джерело постійної напруги.

Слід зазначити, що з прийнятому способі декомпозиції та підході до формування бібліотеки елементів ВБМ, цей елемент не описує весь пристрій, лише частина схеми - з ключовими елементами. Вхідними величинами, з погляду системи причинно-наслідкових зв'язків, є напруга на вході джерела струм на виході джерела і коефіцієнт заповнення транзисторного ключа. Вихідними параметрами моделі є напруга на виході та струм на вході джерела. У цьому припущенні модель не визначає режим переривчастого струму. Модель враховує втрати у напівпровідникових ключах схеми у вигляді прямих падінь напруг на транзисторі та діоді з урахуванням диференціальних опорів на ключах відповідно.

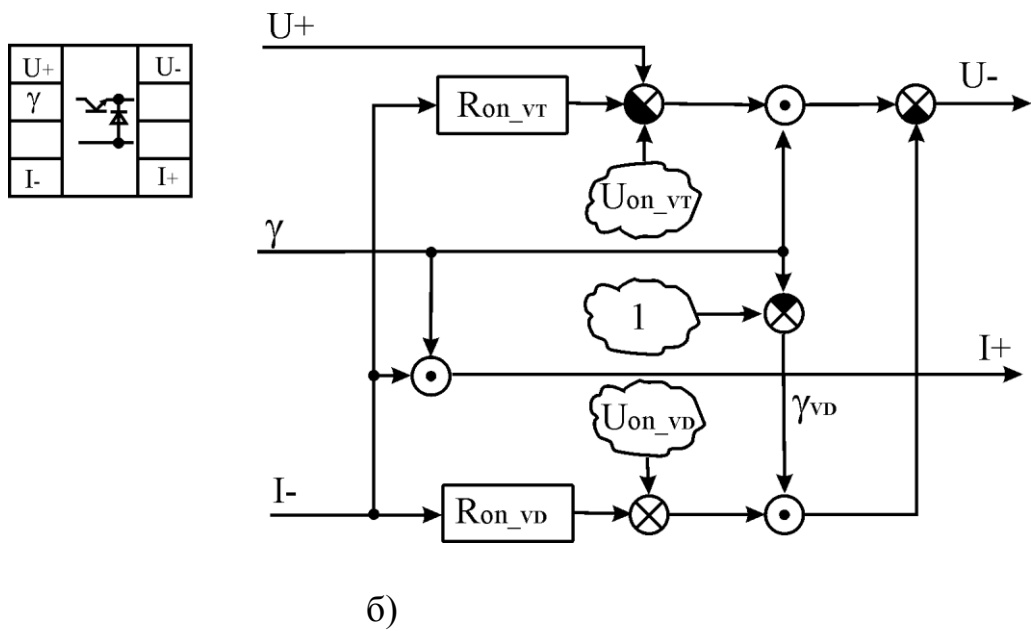


Рис.7. Імпульсне джерело постійної напруги понижуючого типу: а – позначення; б – візуальна модель

Індуктивний накопичувач розглянуто малюнку 8. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням початкового струму через індуктивність і втрат, які враховуються за допомогою параметра  $R_L$ . Вхідними величинами є напруга на вході напруга на виході відповідно. Вихідною величиною є струм через індуктивність.

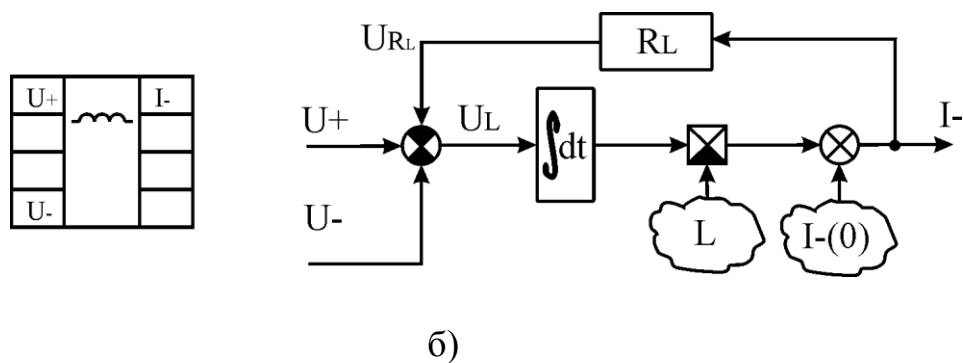


Рис.8. Індуктивний накопичувач енергії: а – позначення; б – візуальна модель

Двигун постійного струму розглянуто малюнку 9. Модель не враховує нелінійні зв'язку в електричній машині. Магнітний потік у магнітній системі двигуна приймається постійним. Тому, між струмом якоря та електромагнітним моментом, а також між ЕРС двигуна та кутовою швидкістю обертання валу існує пряма пропорційність з коефіцієнтами  $k_t$  і  $k_e$  відповідно. Електричні та механічні втрати в машині враховуються за допомогою опору та коефіцієнта відповідно.

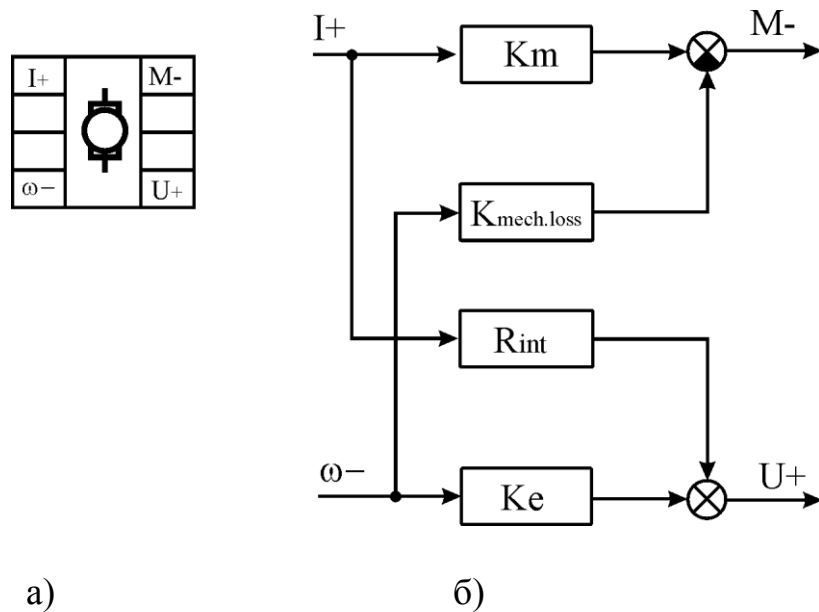


Рис.9. Двигун постійного струму: а – позначення; б – візуальна модель

Двоканальний консолідатор розглянуто малюнку 10. При напрямі енергії зліва праворуч пряма причинно-наслідковий зв'язок "А" зображується суматором. Зворотний зв'язок "В", що проходить через консолідатор енергії, відповідає простий вузол.

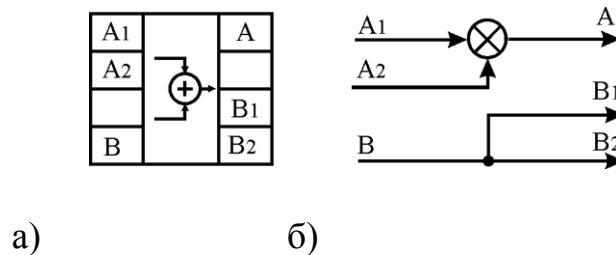


Рис.10. Простий двоканальний консолідуючий вузол: а – позначення; б – візуальна модель

Інерційний елемент, з моментом інерції, розглянутий малюнку 11. Модель представлена в інтегральній формі з урахуванням початкової кутової швидкості обертання. Вхідними величинами є момент джерела механічної потужності та момент приймача механічної потужності. Вихідною величиною є кутова швидкість обертання системи.

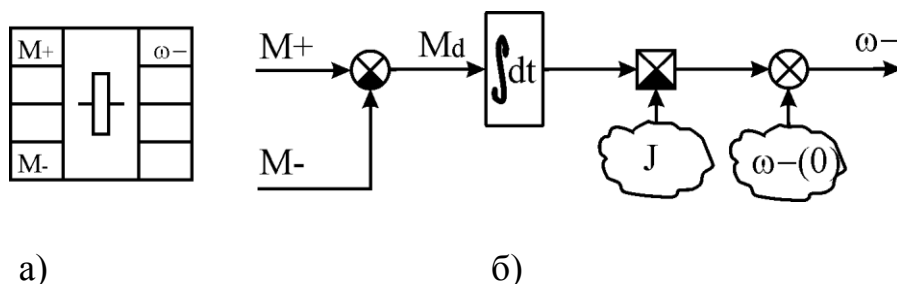








Рисунок14

Електромеханічні системи НБА складаються з таких ключових елементів:

- **Привідні системи:** Основним компонентом, що відповідає за рух, є електродвигуни.

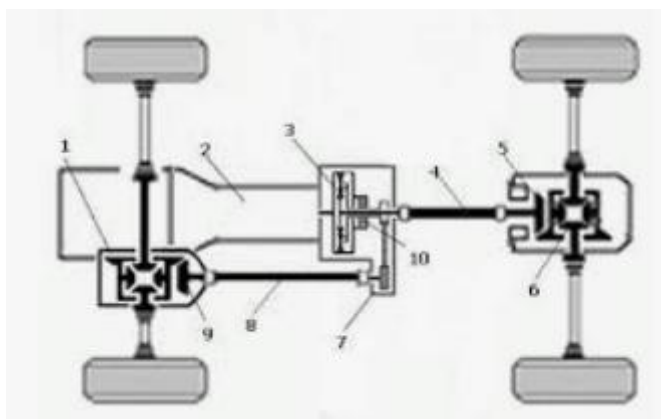


Рисунок15

У НБА застосовуються як двигуни постійного струму (DC), так і безщіткові двигуни (BLDC), які мають високу ефективність, тривалий термін служби та компактні розміри. Залежно від типу апарату можуть застосовуватися як колісні двигуни, так і гусеничні системи приводу.



- **Трансмiсія:** Трансмiсія передає крутний момент від електродвигунів на колеса або гусениці. У більш складних системах можуть використовуватися редуктори для регулювання швидкості та моменту, що крутить.



- **Система управління рухом:** Ця система включає електронні контролери, які забезпечують управління швидкістю і напрямком руху апарата. Контролери отримують команди від центрального комп'ютера чи оператора і керують потужністю, що подається на електродвигуни.

- **Акумуляторні батареї.** Джерело живлення всіх електричних компонентів НБА. Сучасні безпілотні апарати використовують літій-іонні, літій-фосфатні та інші високоенергетичні акумулятори, які забезпечують тривалий час автономної роботи.



Важливим елементом тут є системи керування батареями (BMS), які стежать за станом акумуляторів та запобігають їх перевантаженню або глибокому розрядженню.

- **Сервоприводи.** Сервоприводи використовуються для керування механічними елементами апарата, такими як керма, підвіски, маніпулятори та інші рухомі частини.



Вони дозволяють точно виконувати команди з переміщення та маніпуляцій з об'єктами.



## Системи управління та автоматизація

Електромеханічні системи НБА працюють у тісній інтеграції із

системами управління та програмним забезпеченням, що забезпечують автономну або віддалену роботу апарату. Ключові компоненти:

- **Контролери та процесори:** Центральний обчислювальний блок, який обробляє дані від датчиків та керує роботою всіх систем НБА.

Контролери можуть бути як простими мікроконтролерами для базового управління двигунами, так і потужними процесорами для обробки даних із систем навігації та прийняття рішень на основі штучного інтелекту.

- **Датчики та сенсори:** Включають лідари, камери, ультразвукові сенсори та інерційні вимірювальні пристрої (IMU). Ці системи збирають інформацію про положення апарату, швидкість, перешкоди та навколишнє середовище. Датчики забезпечують автономію НБА, дозволяючи йому адаптуватися до умов, що змінюються на дорозі або місцевості.

- **Навігаційні системи:** Глобальні системи позиціонування (GPS) та інерційні системи (INS) допомагають безпілотнику орієнтуватися на місцевості. В умовах поганого GPS-сигналу використовуються додаткові методи, такі як одометрія та візуальна навігація на основі комп'ютерного зору.

### **Особливості експлуатації в наземних умовах.**

Наземні безпілотні апарати часто експлуатуються в умовах, відмінних від морських або повітряних, тому їх електромеханічні системи проектується з урахуванням специфічних факторів:

- **"Нерівна місцевість".** Наземні апарати повинні долати різні типи поверхні - від асфальту до ґрунтових доріг або піску.



Електромеханічні системи повинні бути достатньо міцними, щоб

справлятися з ударами, вібрацією та навантаженнями, що виникають на нерівній місцевості.

- **Погодні умови.** НБА працюють у різних кліматичних умовах, від екстремальної спеки до холоду. Це вимагає використання матеріалів та компонентів, стійких до перепадів температур, вологи та пилу.

- **Енергоефективність.** Для тривалої роботи в автономному режимі важливо мінімізувати енергоспоживання, особливо тих апаратів, які працюють у важкодоступних місцях і не можуть часто поповнювати заряд батарей.

**Енергоефективність та автономність.** Одним із головних критеріїв успішності НБА є його здатність працювати тривалий час без підзарядки. Для цього вживаються такі заходи:

- **Оптимізація двигунів.** Використання електродвигунів з високим ККД, а також регенеративних систем, які дозволяють відновлювати частину енергії під час гальмування або руху за інерцією.

- **Розумні алгоритми управління.** Програмне забезпечення оптимізує маршрути, рухи та використання енергії на основі даних з датчиків та моделі навколишнього середовища. Це дозволяє мінімізувати втрати та збільшити час автономної роботи.

### **Приклади застосування.**

Наземні безпілотні апарати застосовуються в різних областях:

- **Сільське господарство.** Безпілотники використовуються для автоматичного посіву, збирання врожаю, внесення добрив та моніторингу полів. Електромеханічні системи забезпечують високу точність та автономність операцій.



- **Логістика.** Використовуються для доставки товарів на короткі та середні відстані, а також для виконання завдань на великих складських об'єктах. Безпілотні апарати можуть самостійно переміщати вантажі, що значно збільшує ефективність складських процесів.



- **Військові завдання.** Наземні безпілотники з електромеханічними системами застосовуються для розвідки, розмінування, транспортування спорядження та виконання інших небезпечних завдань у бойових умовах.

- **Міське середовище.** Безпілотні автомобілі та роботи для доставки товарів використовують складні електромеханічні системи, що забезпечують безпечний рух в умовах міського трафіку та взаємодію з навколишньою інфраструктурою.

## **5. Електромеханічні системи морського безпілотного апарату**

Електромеханічні системи є ключовими компонентами морських безпілотних апаратів (МБА), які забезпечують їх функціональність, керуваність та здатність до виконання завдань у морських умовах. Ці апарати

використовуються в різних областях, таких як розвідка, спостереження, дослідження морського дна, пошуково-рятувальні операції, а також у військових і цивільних додатках.



Електромеханічні системи морських безпілотних апаратів включають:

- Електродвигуни. Основний елемент приводу, що забезпечує рух апарату. Найчастіше використовуються двигуни постійного струму або безщіткові двигуни, що відрізняються високою ефективністю та низьким енергоспоживанням.

- Пропульсивна система. Включає гвинтові рушії (гвинти, гребні колеса), які забезпечують рух у воді. Пропульсивна система тісно пов'язана з електродвигуном і відповідає за маневреність та швидкість апарату.

- Акумуляторні батареї. Джерело живлення для всіх електромеханічних та електронних систем апарату. Сучасні безпілотні апарати оснащуються літій-іонними акумуляторами, які забезпечують високу щільність енергії та тривалий час роботи.

- Рулеві механізми. Системи керування курсом та глибиною занурення, що часто складаються з кермів, що приводяться в дію електродвигунами або сервоприводами. Ці механізми необхідні підтримки стабільності апарату у питній воді та виконання маневрів.

- Сервоприводи. Використовуються для точного керування механічними частинами апарата, наприклад, закрилками, кермами та маніпуляторами. Сервоприводи забезпечують високу точність управління, що є особливо важливим для виконання складних завдань, таких як захоплення об'єктів на морському дні.



## **Автоматизація та управління**

Електромеханічні системи працюють у тісному зв'язку з системами управління, які контролюють їхню роботу. Програмне забезпечення та датчики відіграють важливу роль в автоматизації рухів апарату та забезпеченні його автономності:

-Контролери. Мікроконтролери та процесори, які керують електродвигунами, акумуляторами та іншими системами. Вони відповідають за координацію всіх компонентів апарату.

-Сенсорні системи. Включають в себе сонари, камери, гідролокатори та інші датчики, які збирають інформацію про положення апарату, його оточення та перешкоди. Дані від датчиків обробляються в реальному часі та використовуються для коригування курсу або виконання інших дій.

## **Особливості експлуатації в морських умовах.**

Морське середовище пред'являє особливі вимоги до електромеханічних систем через високу корозійну активність, тиск на великих глибинах і мінливі погодні умови. Тому електромеханічні системи повинні мати низку специфічних характеристик:

-Корозійна стійкість. Використання матеріалів, стійких до дії солоної води, таких як нержавіюча сталь, титан та спеціальні покриття.

-Герметичність. Усі компоненти повинні бути захищені від проникнення води, що потребує використання високоякісних ущільнювачів та корпусів.

-Термостійкість. Системи повинні зберігати працездатність при значних коливаннях температури, від холодних глибин океану до тепліших поверхневих шарів.

## **Енергоефективність та автономність**

Для безпілотних морських апаратів ключовим фактором є їхня

здатність працювати тривалий час без підзарядки. Це досягається за рахунок таких рішень:

- Оптимізація двигунів. Застосування електродвигунів із високим ККД, які мінімізують втрати енергії.

- Енергоефективні маршрути. Автономні системи управління можуть розраховувати оптимальні маршрути, які мінімізують витрати енергії на рух.

- Енергозберігаючі режими роботи. Важливі системи можуть перемикатися в режим очікування, коли не потрібне активне використання.

### **Приклади застосування.**

Морські безпілотні апарати з електромеханічними системами знаходять застосування в різних областях:

- Дослідження морського дна. Обладнані потужними електромеханічними системами, апарати можуть проводити детальні дослідження глибоководних районів, забезпечуючи важливі дані для геологів та океанологів.

- Пошково-рятувальні операції. Безпілотні апарати можуть бути використані для пошуку затонулих об'єктів, рятувальних місій та інших екстрених ситуацій.

- Військові завдання. Морські дрони з електромеханічними системами застосовуються у розвідувальних місіях, протимінній боротьбі та патрулюванні.

## **6. Електромеханічні системи літального безпілотного апарату**



Безпілотні літальні апарати (БПЛА), відомі також як дрони, стають все більш важливою частиною авіаційної індустрії та знаходять застосування у різних сферах – від військових та цивільних місій до комерційних та дослідницьких проєктів. Основний фактор, що забезпечує їх функціональність та надійність, – це електромеханічні системи, які відіграють ключову роль в управлінні, русі та виконанні багатьох інших завдань, необхідних для польоту та навігації.



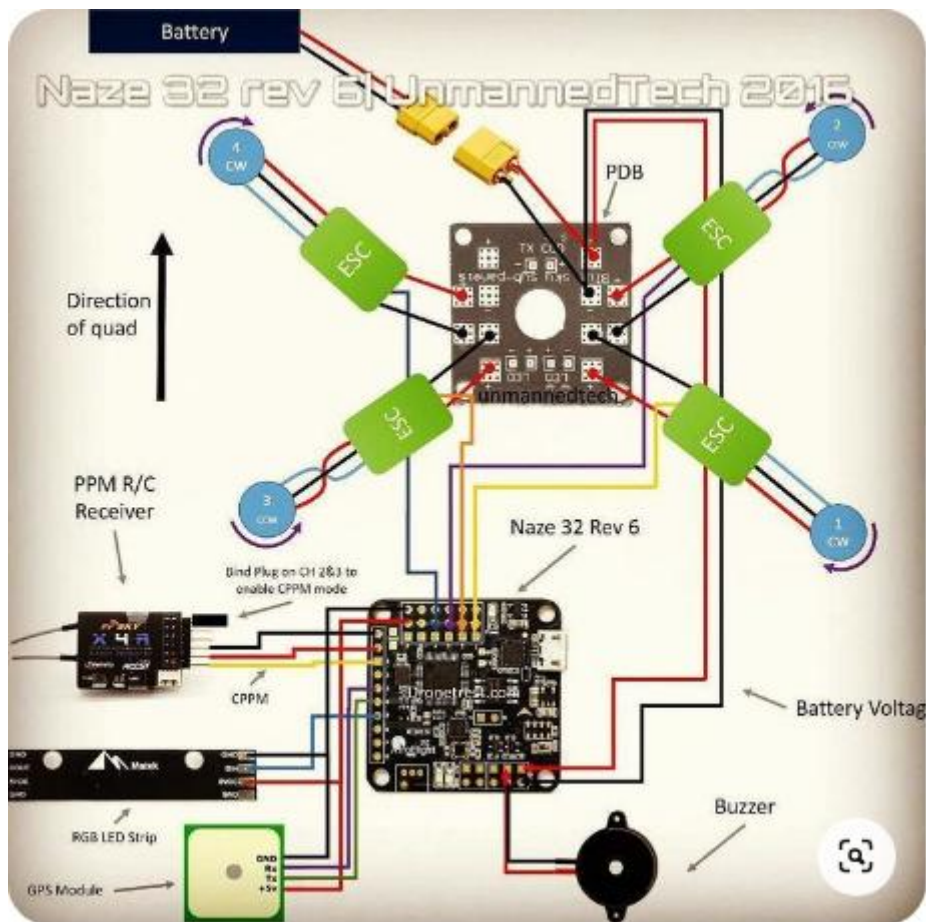
[<https://slate.com/business/2014/02/diagram-different-types-of-drones.html>]

Електромеханічна система безпілотного літального апарату – це сукупність пристроїв та механізмів, які забезпечують керування, рух, стабілізацію та контроль за польотом. Розглянемо основні компоненти таких систем.

Привідна система БПЛА включає двигуни і елементи передачі, які забезпечують створення підйомної сили і маневри в повітрі. Основні види двигунів, що використовуються в сучасних дронах:

-Електричні двигуни постійного струму (DC), які часто використовуються в невеликих та середніх дронах завдяки своїй надійності,

компактності та високій енергоефективності.



[<https://www.pinterest.com/pin/650277633673527570/>]

- Безщіткові двигуни – більш потужні та довговічні, вони є найбільш популярними у сучасних дронах завдяки своїй високій ефективності, довговічності та здатності працювати на високих швидкостях без перегріву.

Один із найважливіших аспектів польоту БПЛА – це підтримання стабільності та правильного курсу. Для цього в електромеханічні системи безпілотного літального апарату вбудовані такі елементи:

- Гіроскопи та акселерометри – ці датчики вимірюють кутову швидкість та прискорення апарату, що дозволяє системі контролювати його нахил, поворот та інші параметри руху.

- Електронні регулятори швидкості (ESC) – пристрої, що контролюють подачу енергії на двигуни, регулюючи швидкість обертання гвинтів. Це дозволяє дрону коригувати свій політ у реальному часі, забезпечуючи стійкість та маневреність.

Автопілот – це один із ключових елементів, який керує всіма аспектами

польоту безпілотного апарату, забезпечуючи його стабілізацію та коригування маршруту залежно від команд оператора чи запрограмованої місії. Він включає в себе контролери і датчики, які обробляють дані про положення апарату, швидкість і напрямок.

Багато сучасних БПЛА оснащені просунутими системами управління, які дозволяють їм виконувати складні маневри, обходити перешкоди і навіть автоматично повертатися на стартову точку при втраті сигналу або низькому заряді батареї. Контролери системи керування польотом взаємодіють з двигунами, датчиками та передавачами, забезпечуючи плавне та стабільне керування апаратом.

Акумулятори є ключовим компонентом системи живлення БПЛА. Вони забезпечують енергією всі системи апарату, починаючи від двигунів та закінчуючи бортовими електронними системами та датчиками. У сучасних дронах використовуються переважно літій-полімерні (LiPo) батареї, які мають високу енергоємність і невелику вагу, що робить їх ідеальними для польотних пристроїв. Для збільшення часу польоту БПЛА може бути оснащений системою керування енергоспоживанням, яка стежить за станом акумулятора, розподіляє потужність між різними системами та повідомляє оператора про необхідність посадки для підзарядки.

Датчики та камери є невід'ємною частиною більшості БПЛА. Вони забезпечують збирання інформації про довкілля та виконують такі функції, як навігація, розвідка або картографування. Ці елементи допомагають дрону орієнтуватися у просторі, уникати зіткнень та виконувати завдання з високою точністю.

- . Важливі типи датчиків включають:
- GPS-датчики для навігації та відстеження розташування дрона.
  - Камери та оптичні сенсори для отримання візуальної інформації.
  - Лідари та ультразвукові датчики для вимірювання відстаней до перешкод та автоматичного керування висотою польоту.

Для контролю польоту та передачі на наземну станцію

використовуються різні системи зв'язку. Це можуть бути радіосигнали, Wi-Fi, мобільні мережі та інші способи передачі інформації, що забезпечують взаємодію між оператором та апаратом. Багато сучасних БПЛА оснащені системами передачі відеопотоку в реальному часі, що особливо важливо для завдань моніторингу та розвідки.