

Національна академія наук України  
Інститут електродинаміки

**Гаврилюк Сергій Іванович**



УДК 62-83: 681.587: 681.5.033

**СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗРЕДУКТОРНИМИ  
АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ  
НАВАНТАЖЕННЯМ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ).

Науковий керівник – кандидат технічних наук, с.н.с.  
**Стяжкін Віталій Павлович,**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
старш. наук. співроб. відділу перетворення та стабілізації  
електромагнітних процесів (м. Київ).

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, доц.  
**Ковбаса Сергій Миколайович,**  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України,  
доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та  
електроприводу (м. Київ);

– кандидат технічних наук, доц.  
**Синявський Олександр Юрійович,**  
Національний університет біоресурсів і природокористування  
України МОН України,  
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та  
електромеханіки (м. Київ).

Захист відбудеться “ 27 ” 04 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 26.187.01 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою:  
03680, Київ-57, проспект Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН  
України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий “ 25 ” 03 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ю.М. Гориславець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми досліджень.** З огляду на стрімке зростання світового флоту сучасні судна обладнуються більш якісними та складними радіонавігаційними системами і комплексами, за допомогою яких вирішуються питання безпеки плавання та зв'язку. Навігаційні радіолокаційні станції (РЛС) забезпечують визначення місця судна за орієнтирами, розпізнавання берегової лінії, орієнтування в умовах обмеженого простору, виявлення зустрічних суден та безпечно розходження з ними. Однією із основних вимог до навігаційних суднових РЛС є робота в секторному режимі (робочому секторі, де відбувається радіолокація, та неробочому секторі, де її немає). Цей режим призначений для огляду ближньої надводної обстановки, що обумовлює підвищені вимоги до швидкодії і точності визначення можливих перешкод по курсу судна. Тому система автоматичного керування (САК) електроприводом (ЕП) антенного поста навігаційних суднових РЛС повинна забезпечити: максимальну швидкодію відпрацювання заданої частоти обертання при переході від неробочого до робочого сектора; відхилення від заданого значення частоти обертання в робочому секторі при дії дестабілізуючих факторів – не гірше  $\pm 1\%$ ; необхідний рівень динамічної точності відпрацювання задання частоти обертання, особливо в умовах змінного вітрового навантаження.

До електроприводів антенних постів суднових РЛС пред'являються високі вимоги по надійності та безаварійному строку служби. Цим вимогам відповідають безредукторні електроприводи (БЕП), в тому числі і з використанням дугостаторних асинхронних двигунів (ДАД), які застосовуються в існуючих РЛС.

Значний внесок у вивчення та розвиток безредукторних електроприводів і методів керування ними внесли відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: І.В. Волков, С.М. Пересада, І.П. Кондратенко, В.М. Михальський, В.В. Гребенников, Л.І.Мазуренко, В.Б. Клепиков, В.Б. Павлов, А.П. Ращепкін, В.І. Теряєв, П.А. Фрідкін, Р.Е. Мілько, В.А. Стеклов, W. Leonhard, P. Lawrenson, V. Vose та багато інших.

Використання БЕП для антенних постів суднових навігаційних РЛС дозволяє позбутися люфтів та пружностей, властивих механічним передачам і, завдяки цьому, покращити показники якості регулювання робочого органу РЛС. В той же час відмова від редуктора вимагає збільшення обертового моменту та діапазону регулювання швидкості електроприводу.

На даний час мало уваги приділено розробці систем автоматичного керування БЕП, застосування яких дозволяє позбутися недоліків, притаманних БЕП, а за якістю керування (наприклад, динамічною точністю) наблизитись до класичних регульованих електроприводів з традиційними двигунами. Одним із способів розширення діапазону регулювання швидкості робочого органу антенних постів є застосування принципу електромеханічного диференціалу, а для підвищення динамічної точності відпрацювання керуючої дії – застосування двоканальних систем, замкнених за швидкістю. В комплексі ці питання раніше не вирішувалися.

Тому створення систем автоматичного керування безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням, що змінюється стохастично, з розширеним діапазоном регулювання швидкості та з покращеними динамічними показниками якості керування є актуальним науковим завданням. Для цього у

роботі сформовано дві стратегії: комбіноване керування ЕП ДАД та двоканальне керування БЕП з електромеханічним диференціалом.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів досліджень НАН України в рамках наступних науково-дослідних робіт: «Визначити принципи побудови гібридних систем керування з нечіткою логікою та створити засоби і алгоритми керування регуляторами напруги, струму, частоти з покращеними характеристиками для систем електротехнологічної обробки матеріалів» («База-П7» 6541030, 1.01.2016 – 31.12.2018); «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» ("ІНТЕХЕН-2", 0120U002125, 1.01.2020 – 30.12.2020); «Розробити засоби регулювання напруги, струму і частоти для електротехнологій та систем безредукторних електроприводів із застосуванням методів інтелектуального керування» («База-П8», 6541030 1.01.2019 – 31.12.2021).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є підвищення швидкодії та точності регулювання безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням, що змінюється стохастично, шляхом створення систем автоматичного комбінованого керування на основі непрямого вимірювання моменту навантаження та систем двоканального керування з електромеханічним диференціалом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих систем автоматичного керування електроприводами з аеродинамічним навантаженням та обґрунтувати актуальність вдосконалення методів комбінованого і двоканального керування для безредукторних електроприводів з аеродинамічним навантаженням.

2. Провести дослідження енергетичних характеристик торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з двошаровим масивним дисковим ротором. Визначити доцільність його використання в якості виконавчого двигуна в безредукторних електроприводах з аеродинамічним навантаженням.

3. Провести аналіз аеродинамічних навантажень на прикладі антени РЛС типу «МІУС». Визначити аналітичну залежність моменту вітрового навантаження від швидкості вітрового потоку, кута повороту і швидкості обертання антени.

4. Синтезувати комбіновану систему автоматичного керування електроприводом антени РЛС та визначити статичні і динамічні характеристики синтезованої системи.

5. Розробити математичну модель безредукторного електромеханічного диференціалу з урахуванням електромеханічних і електромагнітних взаємозв'язків, провести аналіз усталених і динамічних режимів його роботи. Здійснити синтез системи керування безредукторним електроприводом з електромеханічним диференціалом.

6. Провести аналіз усталених та динамічних режимів роботи в замкненій за швидкістю двоканальній системі керування безредукторним електроприводом з електромеханічним диференціалом.

7. Розробити практичну схему автоматизованої системи керування безредукторними дугостаторними електроприводами антенного поста суднової навігаційної РЛС.

*Об'єкт дослідження* – процеси електромеханічного перетворення енергії в безредукторних електроприводах.

*Предмет дослідження* – методи керування безредукторними електроприводами, які підвищують динамічну точність відпрацювання задання швидкості.

**Методи дослідження.** Вирішення сформульованих у дисертаційній роботі задач досягнуто на основі використання фундаментальних положень електродинаміки та теоретичної електротехніки, теорії електричних машин, теорії електроприводу, теорії автоматичного керування, теоретичної механіки, засобів математичного моделювання в середовищі Matlab.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Запропоновано новий метод керування електроприводом з аеродинамічним навантаженням та компенсуючим зв'язком за збуренням шляхом непрямого визначення навантаження з використанням нової встановленої залежності моменту навантаження на валу електропривода антенного поста РЛС від швидкості повітряного потоку, кута повороту та швидкості обертання антени.

2. Удосконалено метод підвищення стабільності і рівномірності руху робочих органів РЛС шляхом використання безредукторного електроприводу з двоканальним керуванням, який забезпечує розширення діапазону регулювання швидкості.

3. Вперше встановлено співвідношення швидкостей та моментів в безредукторному електромеханічному диференціалі, що дало змогу розробити математичну модель електроприводу та здійснити синтез двоканальної системи автоматичного керування швидкістю, яка забезпечує компенсацію кінематичної похибки при відпрацюванні лінійно-наростаючого задання швидкості.

4. Науково обґрунтовано можливість побудови електричної машини з обмотками на статорі та роторі, механічним розділенням основного і проміжного роторів, що було покладено в основу безредукторного електромеханічного диференціалу і дало змогу реалізувати двоканальне керування без використання додаткових механічних передач.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Запропоновані принципи технічної реалізації систем автоматичного керування безредукторними електроприводами з дугостаторними асинхронними двигунами були використані для проектування електроприводу суднової РЛС з метою подальшого його впровадження на морських судах;

2. Розроблено і виготовлено стенд для дослідження статичних і динамічних режимів безредукторних асинхронних двигунів з можливістю подальших стендових випробувань БЕП антенного поста РЛС у складі суднової навігаційної системи;

3. Розроблено конструкцію дослідного зразка електричної машини з вбудованим безредукторним електромеханічним диференціалом, яка дає змогу реалізувати двоканальне керування без використання додаткових механічних передач.

**Особистий внесок здобувача.** Всі теоретичні та практичні результати, представлені в дисертації, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належить: у [1] – інформаційний пошук та аналіз літературних даних, розробка функціональної схеми САК; у [2] – розробка функціональної схеми САК БЕП антенного поста навігаційної суднової РЛС; у [3] – аналіз енергетичних характеристик торцевих ДАД; у [4] – розробка функціональної схеми частотного керування ДАД; у [5] – розробка кінематичної схеми БЕП; у [6] – розробка САК БЕП; у [7] – встановлення співвідношення швидкостей та моментів БЕП з електромеханічним диференціалом; у [8] – розробка кінематичної схеми БЕП; у [9] – синтез комбінованої САК ДАД; у [10] – патентний пошук; у [11] – розробка кінематичних схем; у [12] – розробка конструкції дослідного зразка БЕП; у [13] – розробка функціональної схеми технічної реалізації пристрою для непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях МНТК «Smart-технології в енергетиці та електроніці – 2016» (сmt. Лазурне, Херсонської області STEE-2016); МНТК «Проблеми автоматизованого електропривода». «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Харків, ПАЕП - СЕЕ-2017); МНТК «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, ОКЕУ-2017); XV МНТК «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2018), на наукових семінарах Інституту електродинаміки НАН України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» (2015-2019).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, зокрема 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 – у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), 3 патенти на корисну модель України, 1 авторське право на науковий твір.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається із змісту, переліку умовних скорочень, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури із 89 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 150 сторінок, у тому числі 122 сторінки основного тексту, 73 рисунків та 12 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність виконання роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів дисертації та наведено дані про їх апробацію і публікації.

У першому розділі розглянуто та проаналізовано сучасний стан розвитку систем керування БЕП в електромеханічних системах з аеродинамічним навантаженням. Встановлено, що основним завданням для таких систем є збільшення діапазону регулювання швидкості при одночасному забезпеченні підвищеної статичної і динамічної точності.

На основі аналізу існуючих систем ЕП обертання антен РЛС встановлено, що існуючі системи, зокрема на основі ДАД, не забезпечують необхідного рівня динамічної точності, що є важливим для секторного режиму огляду. Одним із

ефективних способів підвищення точності відпрацювання задаючої дії є застосування двоканальних слідкуючих САК. Однак існуючі електромеханічні системи з двоканальними САК, як правило, передбачають застосування кінематичної ланки у вигляді редуктора або механічного диференціалу, що значно знижує їх надійність та точність відпрацювання координат.

На підставі викладеного у розділі матеріалу та аналізу обґрунтовано важливість та доцільність розробки нових методів підвищення швидкодії та точності регулювання безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням, яке стохастично змінюється, з розширеним діапазоном регулювання швидкості та з покращеними динамічними показниками керування.

У другому розділі проведено розрахунок енергетичних показників торцевого дугостаторного асинхронного двигуна (ТДАД) для ЕП антен РЛС, який складається з чотирьох розімкнутих по магнітному потоку індукторів потужністю 500 Вт кожен. Встановлено, що ККД та коефіцієнт потужності одного індуктора потужністю 500 Вт складає 0,2 та 0,31 відповідно. Виконання магнітопроводу у вигляді замкненої конструкції дає змогу покращити ККД до 0,3. Таким чином енергоефективність ТДАД малої потужності недостатня для застосування в якості виконавчого двигуна в БЕП з аеродинамічним навантаженням.

Отримано функціональну залежність моменту навантаження на валу ЕП антени від трьох змінних: кута повороту антени  $\beta$ , швидкості повітряного потоку  $V$  і кутової швидкості обертання антени  $\omega$ . Антена РЛС типу «МІУС» має відкрите виконання, тому основну частину навантажень складають аеродинамічні зусилля, що виникають через парусність антени при її обертанні під впливом вітру. На рис. 1 показаний зовнішній вид антени РЛС «МІУС», де  $L=2300$  мм,  $H=115$  мм,  $l=170$  мм,  $h=45$  мм,  $\beta$  – кут повороту антени.

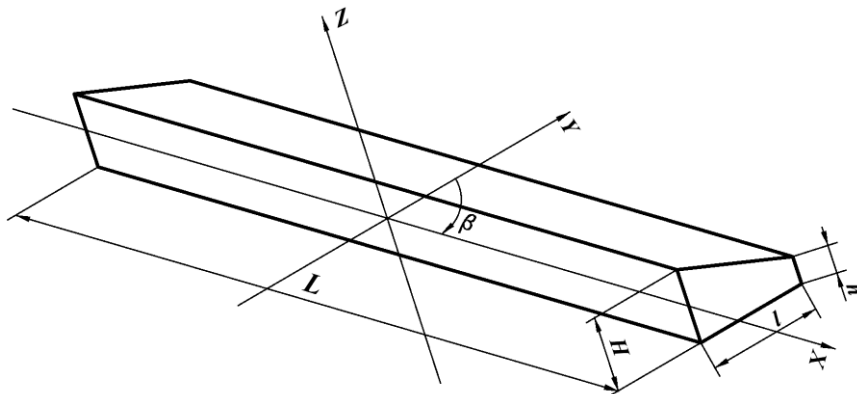


Рис. 1 Зовнішній вид антени РЛС «МІУС»

Залежність моменту навантаження на валу ЕП антени від змінних  $\beta$ ,  $V$ ,  $\omega$ :

$$M_L = a \cdot \sin 2\beta \cdot V^2 + b \cdot \cos \beta \cdot \omega \cdot V + \mu \cdot \omega^2, \quad (1)$$

де  $a$  та  $b$  постійні коефіцієнти:

$$a = k \cdot \frac{\rho \cdot H \cdot L^2}{2} \cdot \frac{\lambda n}{\lambda}, \quad b = k \cdot \frac{\rho \cdot H \cdot L^2}{6} \cdot C_n \cdot \left( 1 + \frac{1}{8} \cdot k' \cdot \lambda \right), \quad (2)$$

$\rho=1,32 \text{ кг/м}^3$  – густина повітря,  $m$  – коефіцієнт аеродинамічного моменту,  $\lambda n=S/H^2=0,998$  – зведене подовження профілю,  $S=0,0132 \text{ м}^2$  – поперечний переріз профілю,  $\lambda=L/H=20$  – подовження профілю,  $C_n=1,2$  і  $k'=0,04$  – коефіцієнти із таблиць ОСТ5.8285-73,  $\mu=1,5 \text{ Нмс}^2$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається геометричними розмірами антени.

На рис. 2 представлено розрахункові криві аеродинамічних навантажень, що показують залежності моменту навантаження на валу привода від кута повороту антени  $\beta$  при швидкості обертання  $\omega=18 \text{ об/хв}$  і швидкостях повітряного потоку 10 м/с, 20 м/с, 30 м/с, 40 м/с та 50 м/с.

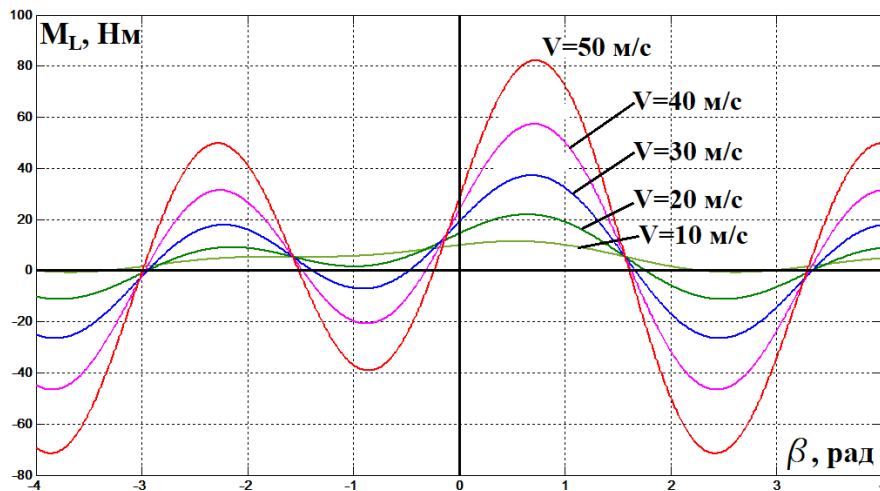


Рис. 2 Розрахункові криві вітрових аеродинамічних навантажень

Функціональну схему технічної реалізації пристрою для непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС, згідно виразу (1), представлено на рис. 3. На схемі показано: антена, встановлена на одному валу з ротором ДАД; ротор, виконаний у вигляді диска, що обертається; індуктори з обмотками, які представляють собою статор двигуна; датчики кутової швидкості та положення антени; пристрої вимірювання швидкості і напрямку вітру. Безпосередньо сам пристрій непрямого вимірювання моменту навантаження показано у вигляді структурної схеми. На пристрій заведено всі необхідні сигнали з датчиків змінних, що вимірюються для визначення моменту навантаження.

Основними завданнями САК електроприводом антенного поста РЛС при непрогнозованому характері збурення є забезпечення високої швидкодії та точності регулювання при стабілізації швидкості обертання в робочому секторі, переході на іншу робочу швидкість або зміні швидкості обертання при переході з неробочого в робочий сектор.

Вирішити дані завдання можливо за допомогою апарату нечіткої логіки, яка дозволяє позбутися багаторазового коригування коефіцієнтів регулювання та забезпечити максимально можливі показники якості системи незалежно від нелінійності параметрів та непередбачуваних флуктуацій моменту навантаження. Знаючи заздалегідь реакцію системи на зовнішні збурення, а саме залежності вітрових аеродинамічних навантажень, можливо побудувати високоточну систему керування швидкістю обертання антени РЛС.

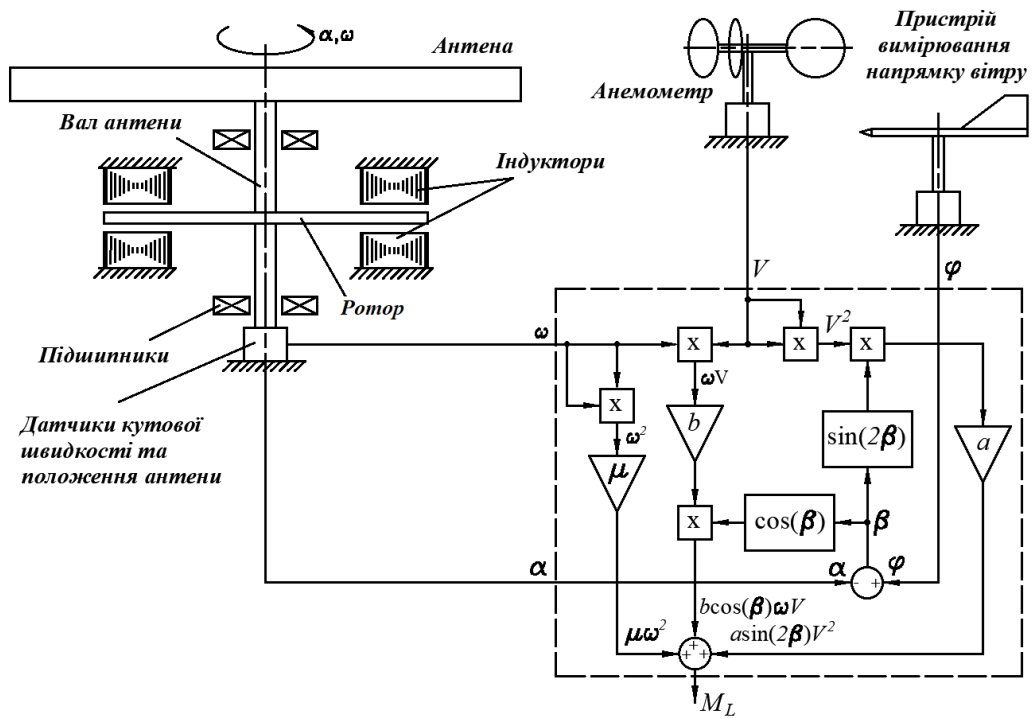


Рис. 3 Функціональна схема технічної реалізації пристрою для непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС

На рис. 4 показано функціональну схему системи керування швидкістю обертання антени РЛС з пропорційно-інтегральним нечітким логічним контролером. Блок LC представляє собою логічний контролер, що формує сигнал задання швидкості на основі обраного режиму роботи антени та заданого сектору. Режим роботи "Mode" та координати сектору  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  поступають з бортової системи. Контролер на основі різниці між заданими координатами  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  та поточним положенням антени  $\alpha$  з датчика положення  $E$  визначає робочий сектор, в якому змінює сигнал задання швидкості обертання антени. На вхід пропорційно-інтегрального нечіткого логічного контролеру окрім сигналу розузгодження  $\Delta$  між заданим сигналом швидкості  $\omega_z$  та сигналом поточного значення швидкості антени  $\omega$  також введено параметр прискорення  $d\omega/dt$ . Це дає змогу слідкувати за динамікою приводу антени при перехідних процесах, особливо в секторному режимі при переході з однієї швидкості на іншу. Також на вхід нечіткого контролеру введено сигнал швидкості вітрового потоку  $V$ . Таким чином, на основі бази знань відбувається прийняття рішення переходу на ту чи іншу швидкість з тією чи іншою динамікою, або взагалі, при непередбачуваних обставинах, наприклад, при штормі відбувається повна зупинка системи.

Вихідний сигнал нечіткого контролера поступає на суматор, де складається з сигналом коригуючої ланки  $W_k$  та подається на керуючий вхід частотного перетворювача, що живить ЕП. На основі даних сигналу швидкості обертання антени  $\omega$ , положення антени  $\alpha$ , швидкості вітрового потоку  $V$  та напрямку вітрового потоку  $\varphi$ , пристрій непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС розраховує поточне значення моменту та передає його на коригуючу ланку.

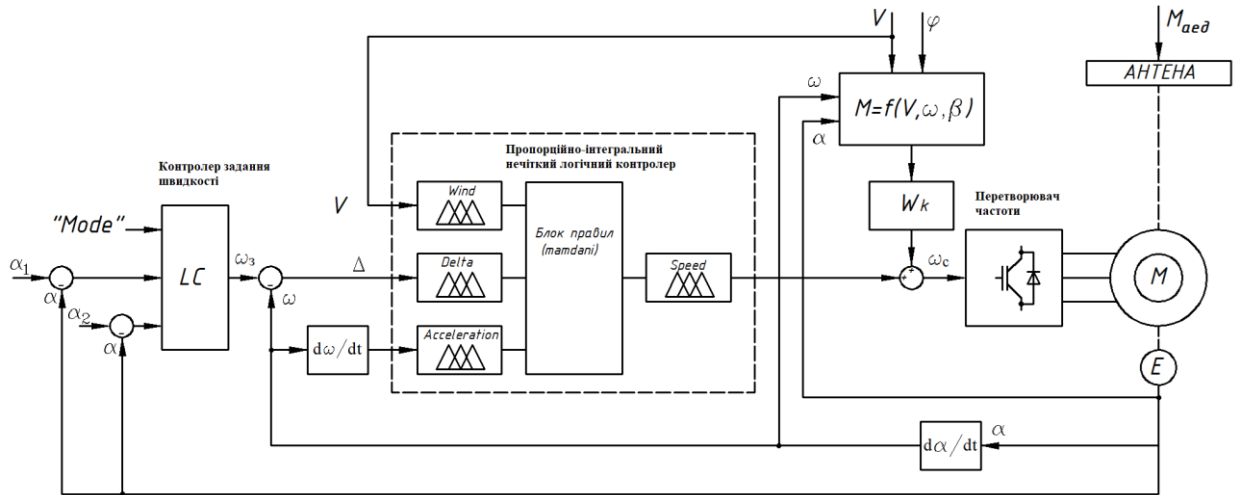


Рис. 4 Функціональна схема системи керування швидкістю обертання антени РЛС з пропорційно-інтегральним нечітким логічним контролером

Іншим підходом побудови САК електроприводом антенного поста РЛС при непрогнозованому характері збурення є використання принципу комбінованого керування. Було здійснено синтез комбінованої САК, структурну схему якої представлено на рис 5. На схемі прийняті наступні скорочення: РШ – регулятор швидкості; ПЧ – перетворювач частоти; ДАД – дугостаторний двигун; ЕМС – електромеханічна система;  $W_{sr}$  – передатна функція регулятора швидкості;  $W_k$  – коригуюча ланка. У структурній схемі дугостаторний двигун представлений спрощено з допущенням того, що робота двигуна здійснюється на лінеаризованій ділянці механічної характеристики. Система керування має два канали: один замкнений, який діє за принципом керування за відхиленням швидкості обертання антени  $\omega$  від заданого значення  $\omega_{ctr}$  і другий розімкнутий, що діє за принципом компенсації збурення  $M_L$ . На рис. 5 також позначені параметри системи:  $K_c$ ,  $T_c$  – коефіцієнт підсилення та стала часу перетворювача частоти;  $K_m$ ,  $T_e$ ,  $b$  – коефіцієнт передачі, електромагнітна стала часу і жорсткість механічної характеристики дугостаторного двигуна;  $T_m$  – електромеханічна стала часу приводу антени.

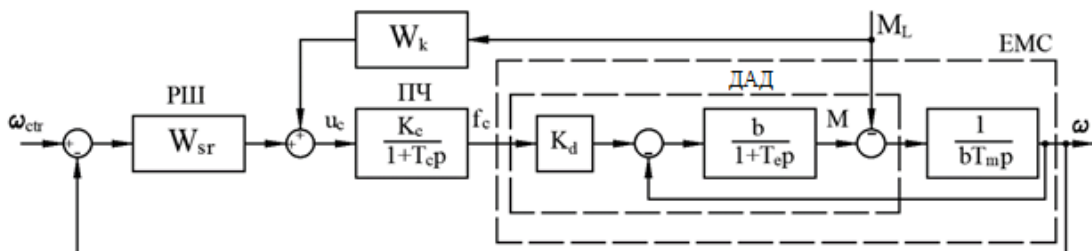


Рис. 5 Структурна схема комбінованої САК електроприводом антени РЛС

На рис. 6 та рис. 7 представлено графіки перехідних процесів електропривода антени без навантаження з подальшим прикладенням моменту навантаження величиною 25 Нм і 84 Нм відповідно на 0,6 с та зняття моменту навантаження на 1,1 с з урахуванням обмеження сигналів регулятора  $\pm 10$  В.

Крива 2 відповідає системі без коригуючої ланки, крива 3 – системі з коригуючою ланкою,  $I$  – задане значення швидкості.

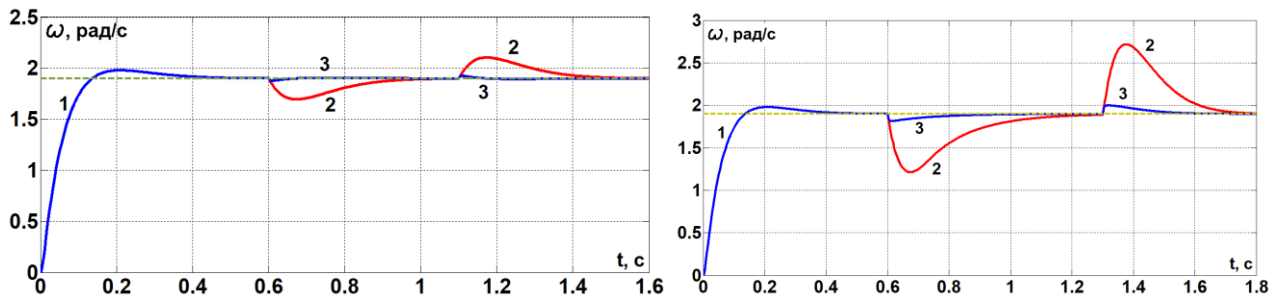


Рис. 6 Графіки перехідних процесів пуску електроприводу антени без навантаження з подальшим прикладенням моменту навантаження 25 Нм та 84 Нм

За результатами моделювання в середовищі MATLAB Simulink комбінованої системи автоматичного керування електроприводом антени РЛС зроблено наступні висновки:

- величина перерегулювання швидкості обертання антени не перевищує 5%, при цьому швидкодія системи (час першого досягнення усталеного значення) становить 0,13 с, що у 6 разів вище, ніж у існуючої системи (0,8 с);
- динамічна похибка при накиданні навантаження у системі з корекцією в середньому зменшилася у 8 разів, причому при відпрацюванні задання ефект від введення коригувального зв'язку більшою мірою виявляється при малих навантаженнях і становить 1,2 % при прикладенні моменту навантаження 25 Нм;
- навіть при прикладенні максимального моменту навантаження 84 Нм, величина динамічного падіння швидкості в системі з корекцією не перевищує 5 %, при цьому час відновлення швидкості зменшується майже у 2 рази.

Таким чином, комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом суднової антени РЛС дозволяє більш ніж у 5 разів збільшити швидкодію у порівнянні з існуючою системою електропривода та компенсувати зміну вітрового навантаження.

**Третій розділ** присвячено розробці математичної моделі та синтезу системи керування безредукторним електроприводом з електромеханічним диференціалом.

З метою вирішення задачі подальшого підвищення динамічної точності та діапазону регулювання швидкості ЕП РЛС запропоновано нове технічне рішення на основі використання безредукторного електромеханічного диференціалу.

Кінематичну схему БЕП з електромеханічним диференціалом представлено на рис. 7, де 1 – обмотка статора електродвигуна  $D_1$ , встановленого на нерухомій основі; 2 – проміжний ротор; 3 – обмотка ротора електродвигуна  $D_2$ ; 4 – ротор електродвигуна  $D_2$ , жорстко зв'язаний з робочим органом (РО) 5; 6 – датчик кутової швидкості проміжного ротора 2; 7 – датчик кутової швидкості РО; 8 – корпус;  $M_1$  – момент двигуна  $D_1$ ;  $M_2$  – момент двигуна  $D_2$ ;  $M_{2r}$  – момент двигуна  $D_2$ , який прикладається до проміжного ротора 2,  $M_0$  – момент навантаження. Обертальні моменти  $M_{2r}$  та  $M_2$  двигуна  $D_2$  у статичних та динамічних режимах мають однакову величину, але протилежне спрямування, тобто  $M_2 = -M_{2r}$ .

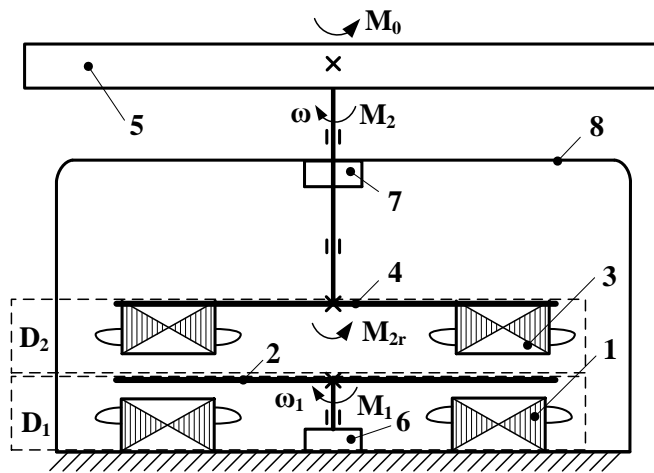


Рис. 7 Кінематична схема БЕП з електромеханічним диференціалом

ЕП працює наступним чином. Електромагнітний момент  $M_1$ , що створюється двигуном  $D_1$  першого електроприводу, прикладається до проміжного ротора 2, а через останній – до статора двигуна  $D_2$ . Двигун  $D_2$  створює відносно ротора 2 власний електромагнітний момент  $M_{2r}$ , а також рівний за величиною, але протилежний за знаком момент  $M_2$ , який безпосередньо прикладається до РО, компенсуючи статичні та динамічні моменти навантаження, що діють на нього.

Використання БЕП з електромеханічним диференціалом забезпечує розширення діапазону регулювання ЕП як у бік збільшення результуючої швидкості, так і у бік її зменшення при незалежному включенні електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$ . З метою збільшення швидкості напрямки руху електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$  вибираються односпрямованими, при цьому результуюча швидкість РО дорівнюватиме сумі швидкостей роторів електродвигунів. Для отримання низьких та наднизьких швидкостей руху РО напрямки руху електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$  вибираються протилежними, внаслідок чого результуюча швидкість виконуючого органу дорівнює різниці швидкостей роторів електродвигунів. При цьому отримання низьких швидкостей руху виконуючого органу можливе при швидкостях електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$ , близьких до номінальних, що підвищує стабільність і рівномірність руху.

Застосування електромеханічного диференціалу дає можливість здійснення реверсу робочого органу без реверсування електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$  за рахунок зміни співвідношення їх швидкостей при різноспрямованому русі.

БЕП з електромеханічним диференціалом має ряд особливостей, обумовлених його конструкцією, зокрема наявністю перехресних зв'язків між електродвигунами. Тому для здійснення синтезу системи керування такого електроприводу необхідно було розробити математичну модель електромеханічного диференціалу. Для цього було встановлено співвідношення швидкостей та моментів електромеханічного диференціалу.

Здійснено поелементне складання рівнянь динаміки для кожної з ланок, яка має ступінь вільності. Даний механізм втрачає рухомість при накладанні двох жорстких зв'язків, тобто має два ступеня вільності. Перша ланка, яка відповідає першому ступеню вільності, включає проміжний ротор 2. Ланка другого ступеня вільності включає ротор 4 двигуна  $D_2$  та РО 5.

Рівняння динаміки, що описують рух першої та другої ланок диференціалу:

$$M_1 - M_{2r} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \quad (3)$$

$$M_2 - M_0 = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (4)$$

де  $J_1$  – момент інерції проміжного ротора 2;  $J_2$  – сумарний момент інерції двигуна  $D_2$  та РО;  $\omega_2$  – швидкість статора двигуна  $D_2$  та зв'язаного з ним РО відносно проміжного ротора.

Переходячи до зображень, отримуємо рівняння для швидкостей електродвигунів  $D_1$  та  $D_2$ , тобто  $\omega_1$  та  $\omega_2$  відповідно:

$$\omega_1 = (M_1 - M_{2r}) \frac{1}{J_1 p}; \quad (5)$$

$$\omega_2 = (M_2 - M_0) \frac{1}{J_2 p}. \quad (6)$$

Абсолютна швидкість РО відносно нерухомої основи  $\omega$  визначається алгебраїчною сумою швидкостей двигунів  $D_1$  та  $D_2$ :

$$\omega = \omega_1 + \omega_2. \quad (7)$$

На рис. 8 показано структурну схему замкненого за швидкістю БАП з електромеханічним диференціалом при урахуванні перехресних зв'язків за швидкістю та моментом. На схемі позначені:  $K_{f1} = K_{f2}$  – коефіцієнти передачі перетворювачів частоти;  $T_\mu$  – некомпенсована стала часу перетворювачів;  $f_1, f_2$  – вихідні частоти перетворювачів;  $p_{p1}, p_{p2}$  – кількості пар полюсів електродвигунів;  $\omega_{01}, \omega_{02}$  – швидкості холостого ходу;  $\beta_1, \beta_2$  – модулі жорсткості механічних характеристик;  $T_{E1}, T_{E2}$  – електромагнітні сталі часу двигунів  $D_1$  та  $D_2$  відповідно;  $K_{\omega 1} = K_\omega$  – коефіцієнти зворотного зв'язку за швидкістю для першого та другого каналу відповідно;  $U_r$  – напруга задання швидкості,  $U_{\omega 1}, U_\omega$  – напруги зворотних зв'язків першого та другого каналів.

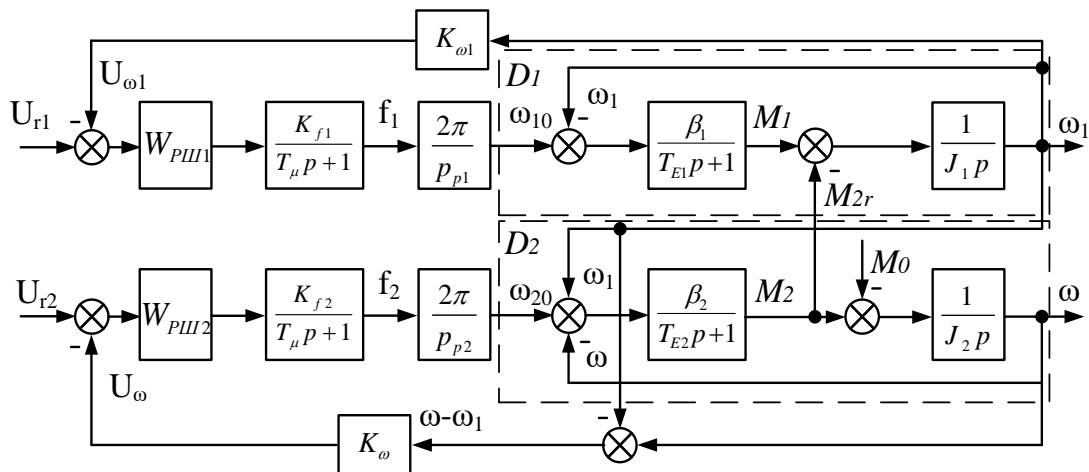


Рис. 8 Структурна схема замкненого за швидкістю БАП з електромеханічним диференціалом

За результатами моделювання в середовищі MATLAB Simulink на рис. 9 представлено графіки перехідних процесів швидкості та моменту на валу замкненого за швидкістю БЕП з електромеханічним диференціалом при лінійному наростанні задання швидкостей, що відповідає рівноприскореному руху, з подальшим прикладенням номінального навантаження  $M_0 = 16$  Нм на восьмій секунді при односпрямованому обертанні електродвигунів  $D_1$  і  $D_2$ .

На рис. 10 показано аналогічні графіки при різноспрямованому обертанні електродвигунів. На рис. 11 показано значення кінематичної та статичної похибок на вихідному валу ЕП.

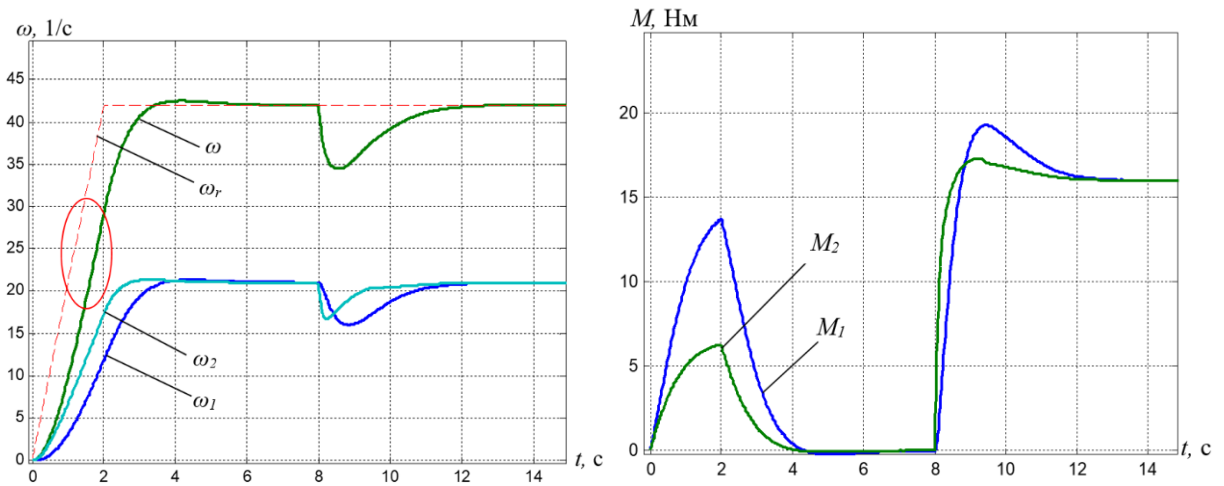


Рис. 9 Графіки перехідних процесів швидкостей та моментів замкнених за швидкістю ЕП при односпрямованому обертанні електродвигунів  $D_1$  і  $D_2$

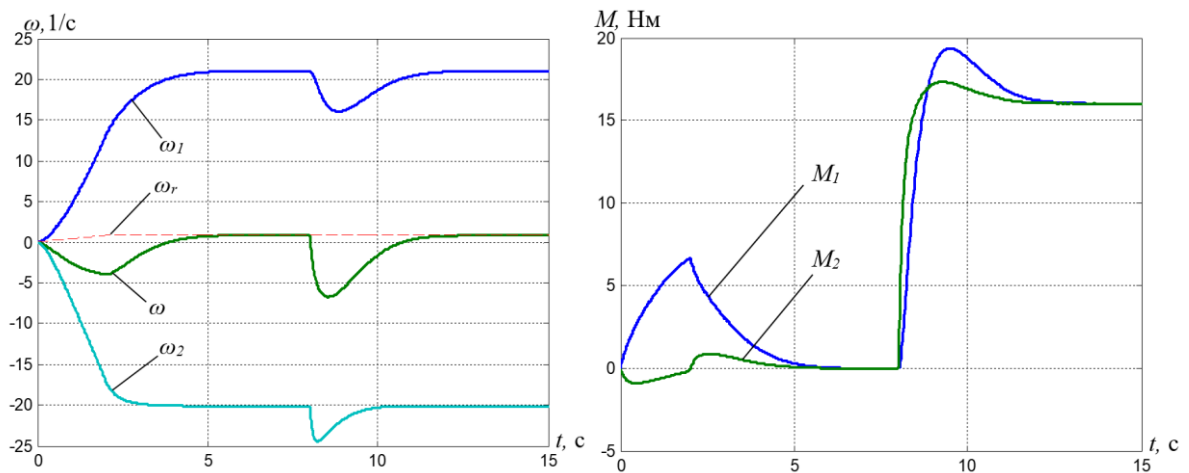


Рис. 10 Графіки перехідних процесів швидкостей та моментів замкнених за швидкістю ЕП при різноспрямованому обертанні електродвигунів  $D_1$  і  $D_2$

З графіків перехідних процесів видно, що синтезовані ПД регулятори швидкості усувають статичну похибку при прикладенні номінального навантаження до вихідного валу електромеханічного диференціалу. При односпрямованому обертанні двигунів  $D_1$  та  $D_2$  з швидкостями 21 1/с усталена швидкість вихідного валу електромеханічного диференціалу буде 42 1/с (рис. 9). Після прикладення

навантаження  $M_0=16$  Нм відбувається компенсація статичної похибки вихідного валу на швидкості 42 1/с, що підтверджує можливість стабільної роботи БЕП з електромеханічним диференціалом з розширеним діапазоном регулювання швидкості вище номінальної (до значення  $2\omega_n$ ).

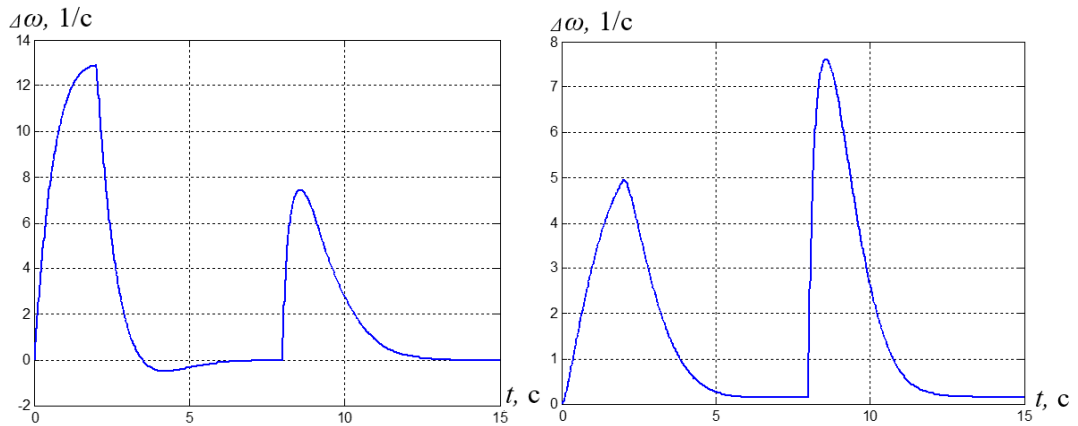


Рис. 11 Значення похибки на валу ЕП при односпрямованому (зліва) та різноспрямованому (справа) обертанні двигунів  $D_1$  і  $D_2$

При різноспрямованому обертанні двигунів  $D_1$  та  $D_2$  зі швидкостями 21 1/с і 20 1/с усталена швидкість вихідного валу електромеханічного диференціалу буде дорівнювати 1 1/с, (рис. 10). Після прикладення навантаження  $M_0=16$  Нм відбувається компенсація статичної похибки на швидкості 1 1/с, що підтверджує можливість стабільної роботи БЕП з електромеханічним диференціалом при розширеному діапазоні регулювання швидкості від номінальної до 0.

При відпрацюванні лінійно-наростаючого задання швидкості у БЕП з електромеханічним диференціалом, замкненим за швидкістю, виникає кінематична похибка. Значення кінематичної похибки вихідного валу при врахуванні перехресних зв'язків за швидкістю та моментом збільшилося з 7,3 1/с до 12,6 1/с. При різноспрямованому обертанні двигунів  $D_1$  та  $D_2$  значення кінематичної похибки під час розгону складає 5,9 1/с, а при прикладенні номінального навантаження – 7,4 1/с (рис. 11).

Наявність взаємозв'язків за швидкістю та моментом призводить до зміни характеру перехідного процесу під час пуску з монотонного на аперіодичний з перерегулюванням 1,6 %. Це свідчить про взаємний вплив двигунів в електромеханічному диференціалі, особливо в перехідних режимах роботи. Тому для компенсації динамічної похибки ЕП була розроблена двоканальна САК, яка зменшує кінематичну та інші похибки регулювання.

**Четвертий розділ** присвячено дослідженню статичних та динамічних режимів двоканальної САК БЕП з електромеханічним диференціалом, замкненої за швидкістю.

На рис. 12 показано структурну схему БЕП з електромеханічним диференціалом при двоканальному керуванні за швидкістю, де прийняті позначення, аналогічні структурній схемі рис. 8. На вхід системи подається напруга задання  $U_r$ . Перший канал, з двигуном  $D_1$ , замкнений за швидкістю проміжного ротора  $\omega_1$ , другий канал з двигуном  $D_2$  – за швидкістю РО  $\omega$ .

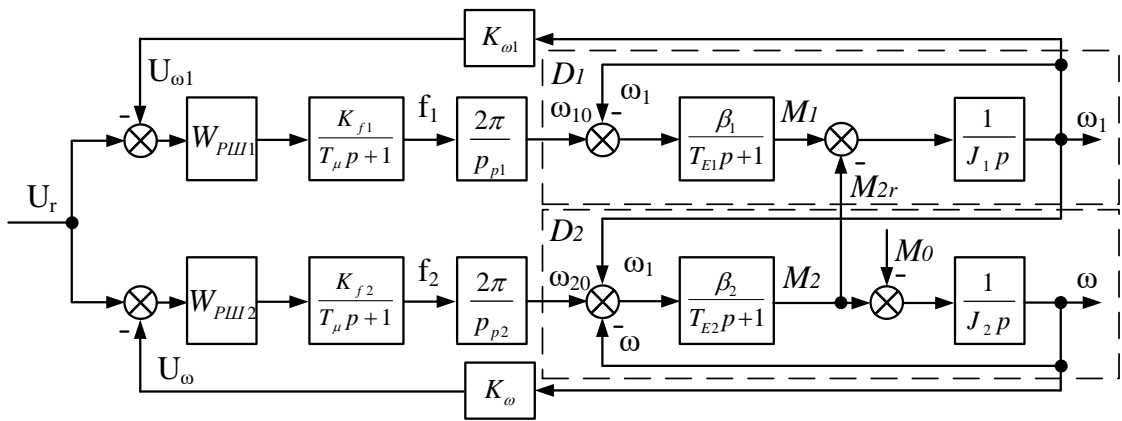


Рис. 12 Структурна схема замкнутого за швидкістю двоканального БЕП з електромеханічним диференціалом

На рис. 13 представлено графіки перехідних процесів швидкості та моменту на валу замкнутого за швидкістю двоканального ЕП при лінійному наростанні задання швидкості, що відповідає рівноприскореному руху, з подальшим прикладенням номінального навантаження  $M_0 = 16$  Нм на восьмій секунді. На рис. 14 показано значення кінематичної та статичної похибок на вихідному валу двоканального ЕП.

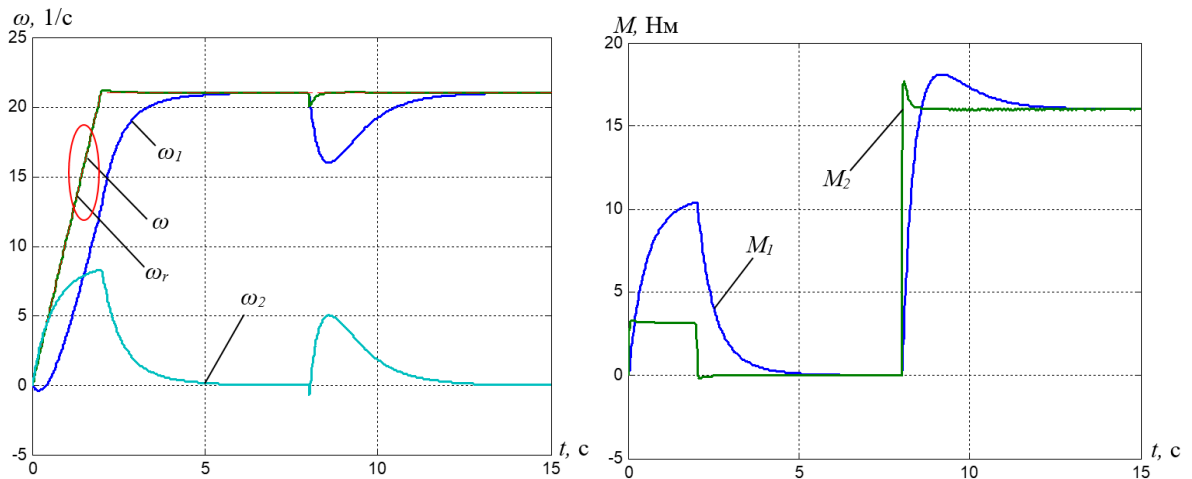


Рис. 13 Графіки перехідних процесів швидкості та моменту на валу замкнутого за швидкістю двоканального ЕП

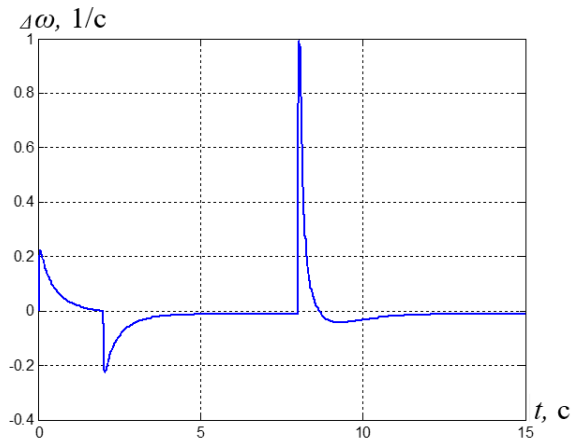


Рис. 14 Значення похибки на вихідному валу замкнутого за швидкістю двоканального ЕП

З графіків перехідних процесів видно, що САК компенсує кінематичну похибку ЕП. При відпрацюванні лінійно-наростаючого задання швидкості її значення не перевищує 0,2 1/с, а при прикладенні номінального навантаження – 1 1/с. Однак після рівноприскореного розгону до номінальної швидкості спостерігається перерегулювання РО на рівні 0,95 %, що задовольняє вимогам, які висуваються до САК.

У п'ятому розділі на підставі теоретичних досліджень та математичного моделювання розроблено функціональні схеми для реалізації САК ЕП обертання антени на основі ДАД та конструкцію дослідного зразка БЕП з електромеханічним диференціалом.

На рис. 15 представлено функціональну схему автоматизованої системи управління (АСУ) БЕП двох антенних постів (АП) навігаційної суднової РЛС, де застосовані скорочення: БЕП-ПБ, БЕП-ЛБ – безредукторні електроприводи правого і лівого бортів; ІН1-ІН4, ІН5-ІН8 – індуктори БЕП; КІН-ПБ, КІН-ЛБ – комутатори індукторів БЕП; ПЧ-ПБ, ПЧ-ЛБ – перетворювачі частоти; К-АСУ – контролер АСУ; Е – енкодери; ЩСЕ – щит суднового електроживлення; ПО – пульт оператора.

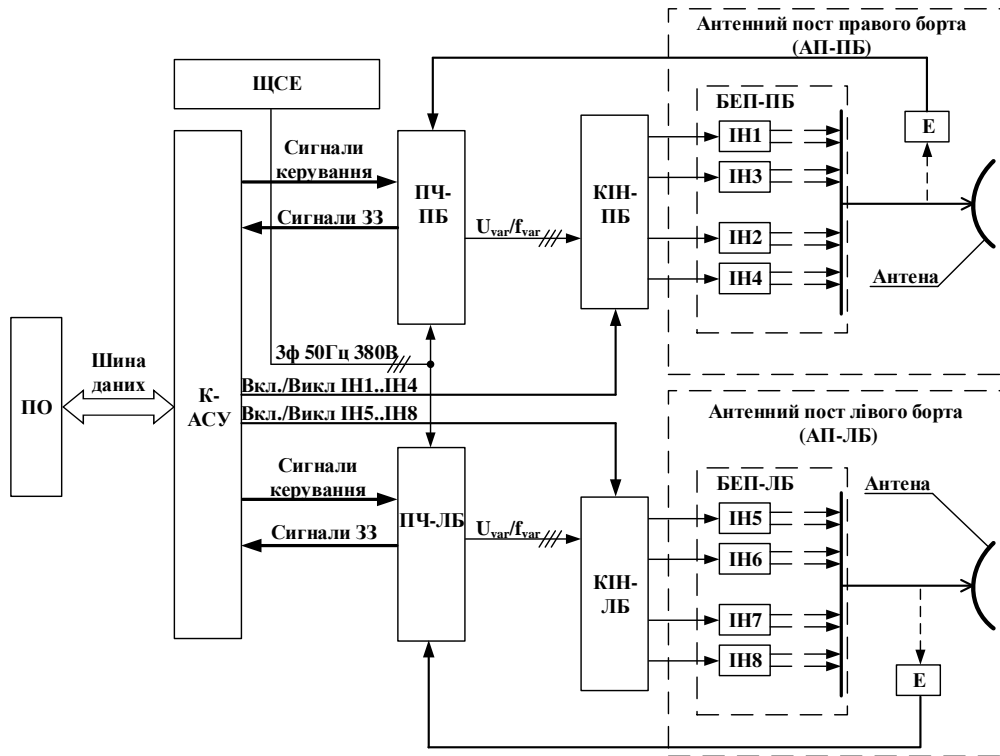


Рис. 15 Функціональна схема АСУ БЕП двох антенних постів (лівого і правого бортів) навігаційної суднової РЛС

Застосування частотного регулювання (ПЧ-ПБ, ПЧ-ЛБ) БЕП дозволяє забезпечити плавність перехідних процесів пуску, гальмування, переходу з однієї робочої кутової швидкості на іншу, зокрема при роботі в режимі секторного обертання АП.

Застосування електронних комутаторів (ЕК-ПБ, ЕК-ЛБ), що підключають до виходу ПЧ від одного до чотирьох індукторів, дозволяє збільшувати крутий момент БЕП при збільшенні вітрового навантаження і динамічних перевантаженнях.

Верхній рівень САК являє собою пульт оператора з людино-машинним інтерфейсом. Обмін даними на верхньому рівні між ПО та К-АСУ здійснюється за протоколом Profinet, на середньому рівні між К-АСУ та ПЧ – за протоколом Modbus. Енкодери підключаються до ПЧ через послідовний інтерфейс SSI. В залежності від режиму роботи та вітрового навантаження в систему включається потрібна кількість індукторів ДАД.

На моніторі оператора відображається поточний стан усіх виконавчих пристроїв та датчиків системи, також відображається поточне положення та швидкість антени.

За результатами проведених досліджень було запропоновано нове технічне рішення, захищене патентом на корисну модель України, в основу якого поставлено задачу модернізації електричної машини з обмотками на статорі і роторі шляхом реалізації на її основі вбудованого безредукторного електромеханічного диференціалу.

На рис. 16 представлено конструкцію дослідного зразка БЕП з електромеханічним диференціалом, де 1 – статор з обмотками, 2 – фазний ротор, який вільно обертається відносно статора, з обмоткою, під'єднаною до окремого джерела; 3 – щит підшипниковий, 4 – вентилятор, 5 – підшипник, 6 – колодка клемна, 7 – кожух, 8 – кришка підшипника, 9 – кільце контактне, 10 – щіткотримач (3 шт.), 11 – проміжний ротор (сателіт), закріплений у підшипниках на роторі і може вільно обертатися відносно нього; 12 – підшипник сателіта, 13 – вал двигуна.

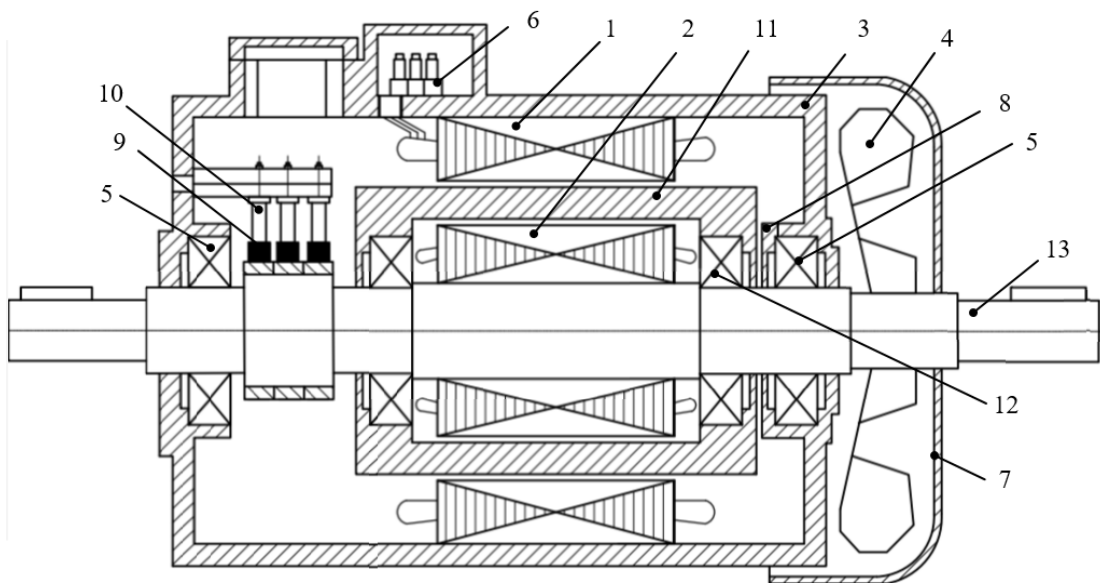


Рис. 16 Конструкція дослідного зразка БЕП з електромеханічним диференціалом

У додатку представлено зовнішній вид розробленого стенду та експериментально зняті механічні характеристики асинхронного тихохідного двигуна, на основі якого здійснювалися дослідження, список публікацій, акти впровадження та апробація результатів дисертації.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання створення систем автоматичного керування безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням, яке стохастично змінюється, з розширеним діапазоном регулювання швидкості та з покращеними показниками якості керування.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі аналізу існуючих систем автоматичного керування безредукторними електроприводами обґрунтовано актуальність вдосконалення методів комбінованого та двоканального керування безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням.
2. За допомогою аналітичного методу, розробленого в ІЕД НАНУ колективом авторів за участю здобувача, проведено розрахунок енергетичних показників торцевого дугостаторного асинхронного двигуна для приводу антен РЛС, який складається з чотирьох розімкнутих по магнітному потоку індукторів потужністю 500 Вт кожен. Встановлено, що ККД та  $\cos\phi$  одного індуктора потужністю 500 Вт складає 0,2 та 0,31 відповідно. Також встановлено, що виконання магнітопроводу у вигляді замкненої конструкції дає змогу покращити енергетичні показники у порівнянні з розімкнутими магнітопроводами. Так, ККД для двигуна РЛС підвищується до значення 0,3.
3. На основі аналізу аеродинамічних навантажень на прикладі антени РЛС типу «МІУС» визначено аналітичну залежність моменту вітрового навантаження від швидкості вітрового потоку, кута повороту і швидкості обертання антени, що дозволило непрямим шляхом визначити аеродинамічний момент навантаження антени РЛС і реалізувати новий метод керування БЕП з компенсуючим зв'язком за збуренням. Це дало можливість розробити пристрій для непрямого визначення моменту навантаження на валу антени РЛС та синтезувати систему керування швидкістю обертання антени, яка компенсує зміни моменту аеродинамічного навантаження за абсолютною величиною.
4. Розроблено систему керування швидкістю обертання антени РЛС з пропорційно-інтегральним нечітким логічним контролером, яка забезпечує роботу антени в секторному режимі та компенсує за абсолютною величиною зміни моменту аеродинамічного навантаження. Крім того, на основі сигналів зворотних зв'язків в реальному часі та бази знань, що записані в пам'яті нечіткого контролера, система корегує прийняття рішення про зміни швидкості з необхідною динамікою, або взагалі при непередбачуваних обставинах, наприклад, при штормі забезпечує повну зупинку системи.
5. Синтезовано комбіновану САК з основним зворотним зв'язком, замкненим за швидкістю обертання антени і регулятором з налаштуванням на технічний оптимум, та прямим каналом, що діє за принципом компенсації збурення. Це дало змогу зменшити динамічну похибку при прикладенні навантаження у системі з корекцією в середньому у 8 разів у порівнянні з існуючою системою. Навіть при прикладенні максимального моменту навантаження 84 Нм, який може виникнути при сильному пориві вітру до 50 км/год, величина динамічного падіння швидкості в системі з

корекцією не перевищує 5%, при цьому час відновлення швидкості зменшується майже у 2 рази у порівнянні з одноканальним керуванням.

6. Розроблено математичну модель БЕП з електромеханічним диференціалом, яка враховує перехресні електромеханічні і електромагнітні взаємозв'язки. Проведено синтез замкненої за швидкістю САК для БЕП з електромеханічним диференціалом та аналіз усталених і динамічних режимів роботи БЕП. Аналіз показав, що САК має якісно нові властивості керування, які полягають у збільшенні сумарного діапазону регулювання швидкості як уверх, так і униз від номінальної, отриманні наднизьких швидкостей вихідного валу при близьких до номінальних швидкостях кожного з двигунів. Разом з тим, при лінійно-наростаючому заданні швидкості у САК виникає кінематична похибка відпрацювання вихідного валу електромеханічного диференціалу. Наявність взаємозв'язків за швидкістю та моментом призводить до зміни характеру перехідного процесу під час пуску з монотонного на аперіодичний з перерегулюванням 1,6 %. Це свідчить про взаємний негативний вплив природних перехресних зв'язків в електромеханічному диференціалі, особливо в перехідних режимах роботи.

7. Розроблено метод підвищення динамічної точності САК на основі спільного використання електромеханічного диференціалу та принципу двоканального керування, що дало змогу зменшити динамічну похибку при відпрацюванні задання швидкості до  $0,2 \text{ с}^{-1}$ , а при прикладенні номінального навантаження – до  $1 \text{ с}^{-1}$ .

8. Розроблено конструкцію дослідного зразка електричної машини з вбудованим безредукторним електромеханічним диференціалом, яка дає змогу розширити діапазон регулювання швидкості та реалізувати двоканальне керування без використання додаткових механічних передач.

9. Достовірність та адекватність приведених результатів підтверджується коректним використанням основних положень теорії електроприводу та теорії автоматичного керування, збігом розрахункових результатів з відомими даними, які встановлені в граничних випадках та експериментальними дослідженнями.

10. Результати роботи у вигляді функціональних схем АСУ БЕП суднової навігаційної РЛС та конструкції дослідного зразка БЕП з електромеханічним диференціалом використані ТОВ «Науково-технічна фірма ТЕМС» для проектування електроприводу РЛС.

11. Результати досліджень пропонується використовувати при розробці систем керування БЕП з розширеним діапазоном регулювання швидкості та з покращеними динамічними показниками якості керування в устаткуванні суднових РЛС, а також електроприводах астронавігаційних систем, високоточних металорізальних верстатів, роботизованих комплексів та прецизійної медичної техніки.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Стяжкин В.П., Зайченко О.А., Подейко П.П., Гаврилук С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. №19(95). С. 71–74. (За матеріалами МНТК «Smart-технології в енергетиці та електроніці – 2016»).

2. Стяжкін В.П., С.І. Гаврилюк. Автоматизована система керування безредукторними електроприводами суднових навігаційних РЛС. *Електроніка та зв'язок*. Київ: Т. 21. №4 (93). 2016. С. 20-23.
3. Гаврилюк С.І., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Крищук Р.С., Ращепкін А.П. Моделювання торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з двошаровим масивним дисковим ротором. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*. Вип. 45. 2016. С. 40-49.
4. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Застосування методів частотного керування для дугостаторних електроприводів антен суднових навігаційних РЛС. *Вісник НТУ «ХП»*. №27 (1249). 2017. С. 411-414. (За матеріалами МНТК «ПАЕП - СЕЕ-2017»).
5. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Безлюфтовий двоканальний електропривод. *Вісник НТУ «ВП»*. 2017. С. 96-100. (За матеріалами МНТК «ОКЕУ-2017»).
6. Теряєв В.І., Стяжкін В.П., Гаврилюк С.І. Безлюфтовий двухканальний регулюємый електропривод. *«Електрооборудование: експлуатація і ремонт»* 2018. № 4 (167). С. 42-46.
7. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Співвідношення швидкостей та моментів у двоканальному електроприводі з безредукторним електромеханічним диференціалом. *Технічна електродинаміка*. 2018. №1. С. 80-83. (Наукометрична база Scopus). (За матеріалами XV МНТК ««Проблеми сучасної електротехніки-2018»»).
8. В.П. Стяжкін, О.А. Зайченко, С.І. Гаврилюк. Безредукторний електропривод ротора електромагнітного сепаратора. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2019. № 31 (107) С. 11-18.
9. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени суднової радіолокаційної станції. *Технічна електродинаміка*. 2020. №6. С. 36-41. (Наукометрична база Scopus).
10. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Безлюфтовий двоканальний слідкуючий електропривод. Патент на корисну модель 122234 України: № u201707611; заявл. 18.07.2017; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 24. 4 с.
11. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Двоканальний регульований електропривод. Патент на корисну модель 124134 України: № u201709575; заявл. 29.09.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6. 7 с.
12. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Електрична машина з вбудованим електромеханічним диференціалом. Патент на корисну модель 136138 України: № u201900730; заявл. 24.01.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15. 12 с.
13. Стяжкін В.П., Теряєв В.І., Гаврилюк С.І. Комбіноване керування електроприводами антен суднових радіолокаційних станцій з непрямим вимірюванням моменту навантаження. Авторське право на науковий твір. Свідоцтво №101564. Дата реєстрації 31.12.2020 р., 9с.

## АНОТАЦІЇ

**Гаврилюк С.І. Системи автоматичного керування безредукторними асинхронними електроприводами з аеродинамічним навантаженням.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи». – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці систем автоматичного керування безредукторними електроприводами з аеродинамічним навантаженням, що змінюється стохастично, з розширеним діапазоном регулювання швидкості та з покращеними показниками якості керування.

На основі аналізу аеродинамічних навантажень на прикладі антени РЛС типу «МІУС» визначено аналітичну залежність моменту вітрового навантаження від швидкості вітрового потоку, кута повороту і швидкості обертання антени, що дозволяє непрямим шляхом визначати аеродинамічний момент навантаження антени РЛС і реалізувати метод комбінованого керування БЕП з компенсуючим зв'язком за збуренням.

Розроблено систему керування швидкістю обертання антени РЛС з пропорційно-інтегральним нечітким логічним контролером, яка на основі сигналів зворотних зв'язків в реальному часі та бази знань, що записані в пам'яті нечіткого контролера, корегує прийняття рішення щодо зміни швидкості з необхідним прискоренням, а при непередбачуваних обставинах, забезпечує зміну режиму роботи або повну зупинку системи.

Здійснено синтез комбінованої САК з основним контуром, замкненим за швидкістю обертання антени і регулятором, налаштованим на технічний оптимум, та другим каналом, що діє за принципом компенсації збурення.

Запропоновано використання безредукторного електромеханічного диференціалу для електропривода РЛС. Новим є те, що вперше встановлено співвідношення швидкостей та моментів в безредукторному електромеханічному диференціалі, яке враховує перехресні зв'язки між його електродвигунами.

Запропоновано новий метод підвищення точності при відпрацюванні лінійно наростаючого задання швидкості на основі використання електромеханічного диференціалу та принципу двоканального керування за швидкістю, який дав змогу зменшити динамічну похибку до  $0,2 \text{ c}^{-1}$ , а при прикладенні номінального навантаження – до  $1 \text{ c}^{-1}$ .

Розроблено конструкцію дослідного зразка БЕП з вбудованим електромеханічним диференціалом.

**Ключові слова:** безредукторний електропривод, дугостаторний асинхронний двигун, аеродинамічне навантаження, комбінована система автоматичного керування, електромеханічний диференціал, двоканальне керування.

**Havryliuk S.I. The system of automatic control of gearless asynchronous electric drives with aerodynamic load.** – The manuscript.

Dissertation for Candidate of Science Degree in Specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. – Institute of Electro-Dynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is dedicated to the development of automatic control systems for gearless electric drives with stochastically changing aerodynamic load, with an extended range of speed control and improved quality control.

Based on the analysis of aerodynamic loads on the "MIUS" radar antenna the equation of the wind loading moment depending on the wind speed, angle of rotation and rotation speed of the antenna, is obtained. The equation allows instantaneous value calculating of the aerodynamic load and implementing combined control method of the gearless electric drive with positive perturbation feedback.

The developed radar antenna speed control system with a proportionally integrated fuzzy logic controller, based on real-time feedback signals and knowledge base stored in the fuzzy controller memory, adjusts the decision to change speed with the required acceleration, and in unforeseen circumstances, provides mode changes or complete shutdown of the system, is developed.

The synthesis of the combined control system with the main speed feedback of rotation of the antenna and the controller with the setting to the technical optimum and the second channel, which operates on the principle of positive perturbation feedback, is done.

For the first time the use of gearless electromechanical differential for electric drive of the radar antenna was proposed. The newness is that for the first time the ratio of speeds and torques in the gearless electromechanical differential, which takes into account the cross-links between its electric motors, is established.

The new method of increasing accuracy with a linearly increasing speed reference based on the use of an electromechanical differential and the principle of two-channel speed control, which allows reducing the dynamic error to  $0,2 \text{ s}^{-1}$ , and when applying a nominal load to  $1 \text{ s}^{-1}$ , is proposed.

The prototype design of gearless electric drive with an electromechanical differential has been developed.

**Keywords:** gearless electric drive, arc-shaped asynchronous motor, aerodynamic load, combined automatic control system, electromechanical differential, two-channel control.

Підписано до друку 22.03.2021 р. формат 60x84/16

Папір офсетний. умовно – друк. аркушів 0,89.

Обл.-вид.аркуш 0,73. тираж 100. замов. 11.

Відділ оперативної поліграфії ІЕД НАН України

03057, Київ-57, проспект Перемоги, 56