

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

**РАЦІОНАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ
ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ МАКЕТНОГО БЛОКА
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ**

За загальною редакцією
Куліка Анатолія Степановича

Харків «ХАІ» 2023

УДК 629.78.062.2.017

Р 27

Авторський колектив:

В. Г. Джулгаков, К. Ю. Дергачов, А. С. Кулік, М. В. Нечипорук,
С. М. Пасічник, В. І. Петренко

Рецензенти:

Златкін Олег Юрійович, генеральний директор НПП «Хартрон-Аркус»
ЛТД, кандидат технічних наук;

Качанов Петро Олексійович, професор кафедри «Автоматика і управління
в технічних системах» Національного технічного
університету «Харківський політехнічний
інститут», лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор

Затверджено як монографію на засіданні Вченої ради
університету (протокол № 7 від 22 лютого 2023 року)

Рациональне управління працездатністю макетного блока
Р 27 електродвигунів-маховиків [Текст]: монографія / В. Г. Джулгаков,
К. Ю. Дергачов, А. С. Кулік та ін. ; за заг. ред. А. С. Куліка. – Харків:
Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»,
2023. – 224 с.

ISBN 978-966-662-900-8

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень
щодо раціонального управління працездатністю блока електродвигунів-
маховиків, які застосовуються в системах орієнтації космічних апаратів.
Описано моделі номінального і нештатного режимів функціонування
електродвигунів-маховиків. Розглянуто інструментальні засоби глибокого
діагностування та гнучкого відновлення працездатності електродвигунів-
маховиків як об'єктів раціонального управління.

Описано експериментальну установку для дослідження макетного блока
електродвигунів-маховиків і наведено результати раціонального управління
працездатністю при дестабілізуювальних впливах.

Для фахівців у галузі проектування систем управління, а також
докторантів, аспірантів, магістрів і студентів відповідних спеціальностей.

Іл. 124. Табл. 7. Бібліогр.: 33 назви.

УДК 629.78.062.2.017

ISBN 978-966-662-900-8

© Авторський колектив, 2023

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2023

*Учітеся, читайте,
І чужому научайтесь,
Й свого не цурайтесь.*

*П. Т. Шевченко (1814-1861)
український поет, прозаїк, мислитель,
живописець, громадський діяч.
Національний герой і символ України*

ПЕРЕДМОВА

Тенденція збільшення тривалості космічних місій призвела до появи нової науково-технічної проблеми: забезпечення довготривалої працездатності обладнання та, зокрема, систем орієнтації космічних апаратів. Шлях підвищення надійності комплектуючих компонентів, вузлів та блоків має відомі межі. Традиційний шлях збільшення надмірності апаратної частини для забезпечення необхідної тривалості працездатного стану систем орієнтації призводить до суттєвого зростання масогабаритних, енергетичних та вартісних характеристик. Сучасний шлях – це шлях пошуку компромісу між використанням компонентів кінцевої надійності та багаторазовістю їх надмірності.

Сучасний рівень розвитку бортових обчислювальних пристроїв дозволяє реалізувати багато функцій управління працездатністю бортових систем орієнтації. Під час виконання космічної місії на ці системи діють як зовнішні збурювальні впливи: аеродинамічні, магнітні і гравітаційні сили, так і внутрішні впливи: несправності, збої та відмови апаратури. Ці впливи призводять до порушення працездатності систем орієнтації, а часом і до нештатних ситуацій у космічному польоті. Для реалізації раціонального управління працездатністю систем орієнтації потрібно, по-перше, виявити причину дестабілізації працездатності, по-друге, парирувати її наявними надлишковими засобами.

Виявлення причин дестабілізації працездатності пов'язано з процесом глибокого діагностування, що відноситься до інтелектуальних видів діяльності людини. Процес парирування – це процес гнучкого відновлення працездатності за результатами діагнозу, пов'язаний з інтелектуальним рішенням у реальному масштабі часу багатоваріантних завдань щодо низки суперечливих критеріїв.

Ключовим функціональним елементом систем орієнтації є виконавчі органи, які більшою мірою впливають на ефективність функціонування космічного апарату. Для тривалих та відповідальних космічних місій як

виконавчі органи використовують електродвигуни-маховики. Ідея використання електродвигунів-маховиків належить основоположнику теоретичної космонавтики Е. К. Ціолковському. Практичне застосування електродвигунів-маховиків розпочалося з 1963 року у космічних апаратах «Космос-14», «Космос-23» (СРСР) та «Німбус» (США).

Електродвигуни-маховики відносяться до класу інерційних виконавчих органів, які забезпечують перерозподіл кінетичного моменту між ротором, що обертається, і корпусом апарату. Використовується кілька надлишкових структур розміщення електродвигунів-маховиків. Найбільш поширених відомо дві. Перша. Це найпростіша надлишкова конфігурація, звана «стандарт НАСА», де як опорне тіло вибраний куб. У цій конфігурації використовуються чотири електродвигуни-маховики, три з яких створюють управляючі моменти вздовж осей пов'язаної системи координат, а момент, що створюється четвертим, спрямований по внутрішній діагоналі куба. Така конфігурація має низький рівень відмовостійкості, оскільки відмова діагонального електродвигуна-маховика призводить до канонічної, надмірної конфігурації. Друга. Як опорне тіло обрано чотиригранну піраміду. Ця конфігурація розроблена фірмою General Electric. У цій конфігурації чотири електродвигуни-маховики розміщуються по вертикальних ребрах піраміди. Таке розміщення електродвигунів-маховиків у блоках виконавчих органів дозволяє суттєво підвищити відмовостійкість через наявність значної надмірності, якщо застосовувати раціональне управління працездатністю.

Теорія автоматичного управління є науковою базою для проектування систем орієнтації космічних апаратів. Ця теорія базується на низці положень. Базове – це знання особливостей функціонування об'єкта управління, що відображається у відповідних математичних моделях у формі диференціальних рівнянь, передавальних функцій, описів у просторі станів. Ці моделі описують, зазвичай, номінальний режим функціонування. Для опису аварійних, позаштатних режимів відповідно до базового положення теорії автоматичного управління необхідні відповідні математичні моделі, що пов'язують ознаки причин дестабілізації працездатності з ознаками слідства, ознаками, доступними виміру. Такі моделі називаються діагностичними, і вони використовуються при реалізації принципу управління за діагнозом для раціонального управління працездатністю електродвигунів-маховиків.

Один із сучасних напрямів розвитку теорії автоматичного управління пов'язаний із формуванням концепції адаптивного управління та відповідних інструментальних засобів. Дослідження нового принципу управління за діагнозом призводить до формування нового класу адаптивних систем: систем раціонального управління. У монографії представлені результати досліджень принципу управління за діагнозом стосовно управління працездатністю блоку електродвигунів-маховиків.

У першому розділі наведено загальні відомості про системи орієнтації космічних апаратів. Описані типові режими польоту космічних апаратів, характерні та збурювальні впливи. Подано класифікацію систем орієнтації. Наведено приклади системи управління орієнтацією та стабілізацією мікросупутника дистанційного зондування Землі МС-2-8, системи управління космічного апарату «Спектр», бортової системи управління космічного апарату «Монітор-Е». Описано конструкцію електродвигуна-маховика серії ДМ20-250 для космічного апарату «Електро». Представлені світові виробники електродвигунів-маховиків.

Другий розділ присвячено схемам установки електродвигунів-маховиків. Розглянуто основні положення про різноманітність можливих схем встановлення. Положення базуються на використанні властивостей правильних опуклих багатогранників. Описано схему кубічної установки трьох і схему встановлення чотирьох електродвигунів-маховиків. Наведено приклади практичного використання схем кубічної установки електродвигунів-маховиків на космічних апаратах «Метеор-М», «Купон», EgyptStat-1, «МС-2-8». Розглянуто схеми пірамідальної установки та приклади їх використання. Описано перспективні схеми встановлення надмірної кількості електродвигунів-маховиків. Представлено кульовий електродвигун-маховик та приклади його використання.

У третьому розділі розглянуто електродвигун-маховик як об'єкт раціонального управління. Спочатку викладено основні тези раціонального управління. Описано функціональні схеми об'єкта раціонального управління та пристрою раціонального управління. Розглянуто області варіації параметрів коефіцієнта передачі та постійної часу. Описано процес формування функціональної схеми раціонального управління електродвигуном-маховиком в одному каналі блоку виконавчого органу. Розглянуто можливість роздільного раціонального управління працездатністю підсилювача потужності та з'єднання електродвигуна-маховика та тахогенератора. Подано відповідні функціональні схеми. Запропоновано функціональну схему двоконтурної

системи раціонального управління, в якій використовується принцип управління за відхиленням та принцип управління за діагнозом. Розглянуто можливість роздільного використання принципу управління за діагнозом до функціональних елементів об'єкта управління та принципу управління за відхиленням до всього об'єкта управління. Представлені моделі номінального функціонування електродвигуна-маховика як об'єкта автоматичного управління під час використання лагранжового підходу. Описано моделі нештатного функціонування підсилувача потужності та з'єднання електродвигуна-маховика з тахогенератором. Моделі позаштатного функціонування – діагностичні моделі відображають зв'язок непрямих ознак, доступних виміру, з прямими ознаками дестабілізуючих впливів, недоступних виміру.

Завдання діагностичного забезпечення об'єкта раціонального управління та методи їх вирішення знайшли відображення у четвертому розділі монографії. Діагностування – це технологічний процес виявлення причин порушення працездатності об'єкта раціонального управління. Сукупність етапів та засобів діагностування є діагностичним забезпеченням. Формування діагностичного забезпечення полягає у послідовному вирішенні низки взаємозалежних завдань. Перша з них – це виявлення дестабілізації. Представлено функціональну схему процесу виявлення дестабілізації та описано необхідні інструментальні засоби. Розглянуто друге завдання – пошук дестабілізуючих функціональних елементів. Описано інструментальні засоби формування непрямих булевих ознак та процедур пошуку. Подано варіанти дихотомічних дерев пошуку дестабілізації. Третє завдання полягає у визначенні типів дестабілізуючих впливів. Розглянуто суть завдання та методи його вирішення. Докладно описані інструментальні засоби формування непрямих булевих ознак. Наведено структуру дихотомічного дерева встановлення типів дестабілізації. Описано четверте завдання – визначення видів дестабілізації. Розглянуто методи його вирішення для конкретних видів дестабілізації. Подано дихотомічне дерево повного діагнозу об'єкта раціонального управління.

У п'ятому розділі – «Реабілітаційне забезпечення об'єкта раціонального управління» знайшли відображення методи відновлення працездатності за результатами діагнозу. Розглянуто інструментальні засоби та процеси відновлення працездатності підсилувача потужності для типових видів дестабілізуючих впливів. Описано особливості відновлення працездатності електродвигуна-маховика. Наведено

функціональні схеми відновлення працездатності для окремих видів дестабілізації та для всіх видів дестабілізації, розглянутих при діагностуванні. Описано алгоритми відновлення працездатності датчика кутової швидкості та наведено функціональні схеми сигнального та параметричного підстроювання, реконфігурації алгоритмів та апаратури. Розглянуто особливості відновлення датчика струму та представлені відповідні функціональні схеми.

Шостий розділ присвячений опису експериментальної установки для дослідження макетного блоку пірамідальної структури електродвигунів-маховиків. Перший варіант експериментальної установки було виконано

О. М. Тараном у період його аспірантської підготовки. Другий варіант на новій мікропроцесорній елементній базі було виконано провідним інженером кафедри В. І. Петренко. У розділі представлений склад експериментальної установки. Наведено технічні характеристики електродвигунів-маховиків та особливості їхньої пірамідальної установки. Описано схемотехнічні рішення пристрою раціонального управління експериментальною установкою та особливості імітації дестабілізуючих впливів. Наведено статичні та перехідні характеристики підсилувачів потужності, електродвигунів-маховиків, тахогенераторів. Подано лінеаризовані математичні моделі функціональних елементів для номінального режиму їх функціонування.

У сьомому розділі представлені результати експериментальних досліджень макетного блоку електродвигунів-маховиків. Описано конкретні алгоритми та програми процедури виявлення дестабілізації, а також графіки перехідних процесів, що ілюструють особливості виявлення порушення працездатності об'єкта раціонального управління на прикладі одного каналу блоку. Детально описані алгоритми, програми та графіки перехідних процесів при пошуку дестабілізуючих функціональних елементів у каналі з порушенням працездатності. Також конкретно представлено та детально описано результати експериментів з ідентифікації дестабілізуючих впливів для отримання повного діагнозу про причини порушення працездатності в об'єкті раціонального управління. Відновлення працездатності макетного блока електродвигунів-маховиків також представлено результатами експериментів у формі графіків перехідних процесів у реакції на ступінчасту управляючу дію. Наведено кількісні характеристики швидкодії процедур діагностування та відновлення працездатності об'єкта раціонального управління під час перехідного процесу.

Подані в монографії результати були отримані під час виконання протягом кількох років фундаментальних та прикладних держбюджетних досліджень з тематики раціонального управління динамічними об'єктами в умовах дестабілізуючих впливів.

Авторський колектив дякує керівництву університету за можливість плідної роботи з теми представлених досліджень та публікації результатів.

Автори вдячні Ю.О. Кузнецову за плідні консультації з практичного використання електродвигунів-маховиків у космічних апаратах.

У підготовці рукопису до друку взяли активну участь інженери кафедри Ю. В. Ситник та І. Е. Мішина, заслуживши глибоку вдячність колективу.

Велику конструктивну роботу з фінальної підготовки рукопису до публікації виконала Т.В. Кулік і автори щиро вдячні за вражаючі результати витраченої праці.

Автори дякують рецензентам О.Ю. Златкіну і П.О. Качанову за доброзичливе ставлення до теми досліджень та отримані результати.

Розділ I. СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Можна без перебільшення стверджувати, що управління орієнтацією космічного літального апарату є здебільшого головним режимом управління його рухом

Б. В. Раушенбах (1915-2001) – розробник перших систем управління та орієнтації космічних апаратів

При виконанні різноманітних космічних місій літальним апаратам необхідно забезпечувати певну орієнтацію щодо їхнього центру мас для різних режимів польоту. Такі завдання виконують системи орієнтації космічних апаратів. Причини, що порушують орієнтацію. Принципи та типи орієнтації. Класифікація систем орієнтації. Приклади систем управління космічними апаратами. Системи управління космічними апаратами «Спектр» та «Монітор-Е». Електродвигуни-маховики. Пристрій та принцип дії. Типи електродвигунів-маховиків. Технічні характеристики.

1.1. Загальні відомості про системи орієнтації космічних апаратів

Космічні апарати – це клас літальних апаратів, що включає штучні супутники Землі та інших планет, орбітальні та міжпланетні станції, космічні кораблі, транспортні кораблі постачання. Під час виконання програми польоту космічним апаратом потрібно управляти його орієнтацією. Управлінням орієнтацією космічного апарату називається здійснення заданого кутового руху триєдра осей, жорстко пов'язаного з корпусом космічного апарату, щодо деякої заданої однойменної системи осей, що знаходиться у просторі (початки обох триєдрів знаходяться в одній і тій самій точці корпусу космічного апарату), при якому рух навколо центру мас не впливає на рух самого центру мас [1].

Управління орієнтацією потрібно при виконанні таких типових режимів польоту:

1) при зміні руху центру мас космічного апарату перед кожним включенням тягових ракетних двигунів необхідно забезпечити потрібний напрямок вектору тяги;

2) при посадці космічного апарату перед входом його в атмосферу потрібна відповідна орієнтація щодо траєкторії руху;

3) при стикуванні космічного апарату з іншими космічними апаратами необхідно забезпечити відповідну орієнтацію щодо стикувального вузла;

4) для забезпечення якісних сеансів зв'язку з центром управління польотом потрібна певна спрямованість антени космічного апарату;

5) забезпечення ефективного функціонування сонячних батарей системи живлення пов'язане з орієнтацією робочих поверхонь батарей нормально до спрямування сонячних променів;

6) у разі використання сонячної енергії для потрібної організації біологічних процесів у космічному кораблі з екіпажем;

7) при виконанні поточних завдань космічної місії, при наукових експериментах, дослідженнях астрономічного типу, метеорозвідці та інших функціональних завдань потрібна відповідна орієнтація космічного апарату;

8) для парирування наслідків порушення необхідної орієнтації космічного апарату, обумовленого збурювальними впливами космічного середовища;

9) при діагностуванні та відновленні працездатності функціональних елементів системи при збоях, несправностях та відмовах.

Для розуміння необхідного складу обладнання та структури систем орієнтації розглянемо зовнішні умови функціонування космічних апаратів. Космічний простір, в якому рухається апарат, має малу щільність речовини. Тому навіть при значних, у порівнянні із земними, швидкостях руху не виникає суттєвих сил та моментів взаємодії із середовищем. Ця обставина призводить до можливості окремого розгляду рухів центру мас та рухів відносно центру мас.

У космосі на літальний апарат діють збурні моменти, що створюються гравітаційними, магнітними та електричними полями, опором атмосфери, сонячними та космічними променями, ударами метеоритів. Знання величин збурних моментів необхідне для правильно обгрунтованого вибору типу і показників виконавчих органів системи орієнтації. Так, природа гравітаційних збурень зумовлена законом всесвітнього тяжіння. Гравітаційні моменти розраховуються за відповідними формулами [2]. Наприклад, для космічного апарату, що рухається круговою орбітою з моментами інерції $J_x = 5200 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$,

$J_y = 11100 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_z = 6900 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{yz} = 210 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ при кутових відхиленнях орбіти -2° , на висоті $H = 800 \text{ км}$ збурні моменти будуть наступними: $M_x = 10,7 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_y = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$; $M_z = -0,22 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$ [3].

Велика розрідженість верхніх шарів атмосфери при високих швидкостях руху космічного апарату призводить до виникнення помітних аеродинамічних моментів. Так, рівень аеродинамічних моментів, що діяли на супутник «Метеор» на висоті 850 км, був у межах до $2 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$ [3]. Момент від тиску сонячних променів не перевищує величини $10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Момент від ударів метеоритів не вищий за $10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{м}$ [2]. Повний момент діючих збурень визначається як сума всіх моментів, що діють на космічний апарат.

Наведені оціночні значення збурних моментів дають лише поверхневі уявлення про повний момент. Залежно від конкретної конструкції космічного апарату та умов його польоту кожен із розглянутих моментів може виявитися домінуючим у сумі, що визначає повний момент. Так, на малій висоті (200–300 км) більшою мірою проявляється аеродинамічний момент, а зі збільшенням висоти орбіти він різко зменшується. На висотах понад 400 км більшою мірою проявляється гравітаційний момент. Магнітний момент можна порівняти з гравітаційним і його величина істотно залежить від електротехнічного обладнання космічного апарату. На орбітах поблизу Землі момент від тиску сонячних променів значно менше гравітаційних, аеродинамічних та магнітних моментів. На високих геостаціонарних орбітах момент від тиску сонячних променів більший за гравітаційний. На орбітах висотою 300–400 км гравітаційний, аеродинамічний та магнітний моменти приблизно однакові. Наведене порівняння моментів носить суто умовний характер, оскільки для конкретного вибору виконавчих органів потрібні чисельні значення збурних моментів, які діють на конкретний космічний апарат за умов польоту на конкретній орбіті [1–3].

Для парирування описаних збурних моментів та ряду інших, що змінюють необхідну орієнтацію космічного апарату, а також для виконання як типових, так і інших специфічних режимів польоту потрібні бортові пристрої, що створюють необхідні сили й моменти. Такі сили і моменти створюються відповідними виконавчими органами. В якості

виконавчих органів знайшли широке застосування реактивні двигуни, електродвигуни-маховики, силові гіроскопи та магнітопроводи [1–4].

Реактивні двигуни створюють необхідні керуючі моменти за рахунок зміни сили тяги, що визначається витратою реактивного палива, та відповідним розміщенням на корпусі апарату відносно його центру мас [1].

Використання в якості виконавчих органів електродвигунів-маховиків обумовлено законом збереження моменту кількості руху системи тіл. Відповідно до теореми про момент кількості руху

$$\frac{dH}{dt} + \frac{dH_M}{dt} = M_3, \quad (1.1)$$

де H і H_M – вектори кінетичних моментів апарату та маховика;

M_3 – вектор моменту зовнішніх сил.

Електродвигун-маховик – це електродвигун спеціальної конструкції, в якій зміною кутової швидкості обертання інерційного навантаження – маховика, забезпечується відповідна зміна кінетичного моменту H_M , що призводить як до парирування моменту зовнішніх сил M_3 , так і при $M_3 = 0$ до зміни кутового положення космічного апарату щодо центру мас, тобто до необхідної його орієнтації [3, 4].

Силові гіроскопи як виконавчі органи мають глибшу історію використання та розвитку, яка отримала свій початок у суднобудуванні для стабілізації положення суден під час качки [4]. Електродвигуни-маховики являють собою, по суті, одноступеневий гіроскоп, що має один ступінь свободи, пов'язаний з обертанням інерційного маховика навколо осі симетрії, нерухомої щодо корпусу космічного апарату. Двоступеневі силові гіроскопи мають два ступені свободи щодо корпусу космічного апарату. Треступеневі силові гіроскопи – це гіроскопи з трьома ступенями свободи в корпусі космічного апарату. У силових гіроскопах керуючі моменти формуються за допомогою зміни величини і знаку кутової швидкості ротора [1].

Принцип дії магнітопроводу як виконавчого органу ґрунтується на взаємодії магнітного поля силових котушок або постійних магнітів, встановлених на космічному апараті, з магнітним полем Землі [2].

Для парирування збурних моментів необхідна інформація про наслідки їх впливу на кутові положення космічного апарату, тобто на його орієнтацію щодо базової системи відліку. У якості датчиків орієнтації використовуються різні вимірювальні пристрої, що базуються на різних

фізичних принципах. При використанні зовнішніх джерел інформації, таких як магнітне та гравітаційне поля, потоки променистої енергії, що випромінюється або відбивається небесними тілами, застосовують і відповідні до джерела вимірювальні пристрої. Так, при використанні променистої енергії застосовують датчики Сонця або датчики зірок (наприклад, датчики Полярної зірки та Канопуса), що базуються на принципі оптико-електронного перетворення променистої енергії в електричний сигнал.

Представницьким класом датчиків орієнтації є інерційні датчики. Ці датчики використовують властивості абсолютного кутового руху осей орієнтації та осей, що жорстко пов'язані з корпусом апарату. Як чутливі елементи в цих датчиках використовуються гіроскопічні прилади, датчики кутової швидкості та акселерометри [1, 3].

Обробка вимірювальної інформації про кутове положення космічного апарату та формування сигналів управління на виконавчі органи проводиться за допомогою бортових ЦОМ. Для забезпечення якісного функціонування блоків датчиків та блоків виконавчих органів використовують вбудовані ЦОМ, які знаходяться у мережевій структурі з центральною керуючою космічним апаратом ЦОМ.

Системи управління орієнтацією космічних апаратів, і навіть їх підсистеми, розробляються, виробляються та функціонують за допомогою класичного принципу управління за відхиленням. Позитивний досвід багаторічного використання цього принципу в різних системах автоматичного управління космічними апаратами свідчить про можливість задовільно парировати збурні сили і моменти космічного простору. Разом з тим, крім зовнішніх збурних сил і моментів по відношенню до космічного апарату, усередині систем орієнтації виникають і внутрішні причини, внутрішні збурні дії, що призводять до порушення необхідного кутового положення. Ці внутрішні причини викликані несправностями, поломками, збоями та відмовами у роботі блоків датчиків, блоків виконавчих органів та корпусів космічних апаратів. У сукупності підсистема з блоку виконавчих приводів, корпусу космічного апарату та блоку датчиків є об'єктом управління орієнтацією (ОУО), а підсистема з бортової ЦОМ з відповідними інтерфейсами – пристрій управління орієнтацією (ПУО). Дві ці підсистеми ОУО та ПУО, об'єднані відповідно до принципу управління за відхиленням, утворюють систему управління орієнтацією космічного апарату. Таким чином, якщо зовнішні збурні впливи діють на корпус космічного апарату, то внутрішні

збурні впливи дестабілізують роботу підсистеми ПУО. Усі збурні впливи, як зовнішні, так і внутрішні, порушують нормальний режим орієнтації і являють собою, по суті, дестабілізуючі впливи для систем орієнтації космічних апаратів.

Системи орієнтації, що базуються на принципі управління за відхиленням, можуть парирувати внутрішні збурні впливи лише в дуже рідкісних ситуаціях за малості їх величин. Традиційно для парирування у цьому випадку використовується принцип мажоритування, що полягає у надмірному використанні блоків з вибором вихідних сигналів, що здебільшого збігаються. Принцип мажоритування за своєю суттю не є принципом управління, оскільки він не пов'язаний з цілеспрямованою зміною характеру вихідного сигналу блоку. Принцип реконфігурації, що полягає у відключенні блоку, що відмовив, і підключенні резервного по сигналу виявлення відмови, також не є принципом управління у класичному розумінні. Використання принципу мажоритування та принципу реконфігурації призводить, по-перше, до суттєвого збільшення масогабаритних характеристик систем орієнтації, по-друге, до значного збільшення енергоспоживання, по-третє, до неефективного використання надлишкових бортових ресурсів космічного апарату.

Поліпшити ситуацію з парируванням дестабілізуючих впливів можна за допомогою спільного використання принципу глибокого діагностування причин дестабілізації та принципу гнучкого управління надлишковими засобами. Використання цих принципів розширює функціональні можливості систем орієнтації з парирування як розрахункових, так і нерозрахункових режимів функціонування, що викликані дестабілізуючими впливами, а також підвищує якісні показники процесу управління кутовим положенням космічного апарату.

1.2. Класифікація систем орієнтації

Існуючі системи орієнтації космічних апаратів (КА) являють собою велику неосяжну множину різноманітних типів. Для того, щоб зробити цю множину доступною для огляду з тих чи інших точок зору, використовують спосіб класифікації, що полягає у розбитті множини на класи. Розбиття здійснюється за ознаками, що відображають різні точки зору, тобто – цілі. Традиційно в якості ознак класифікації систем орієнтації використовують типи осей орієнтації, ступінь участі людини в керуванні, по використуванним орієнтирам для орієнтації та за низкою

інших ознак, обумовлених завданнями досліджень. [1, 2, 5]. Відповідно до тематики книги розглянемо ієрархічну класифікацію за низкою ознак, що характеризують керуючі моменти для здійснення орієнтації. На рис. 1.1 наведено таку класифікацію.

Перша ознака класифікації – це спосіб створення керуючих моментів для космічних апаратів. За цією ознакою безліч відомих систем орієнтації можна поділити на три класи.

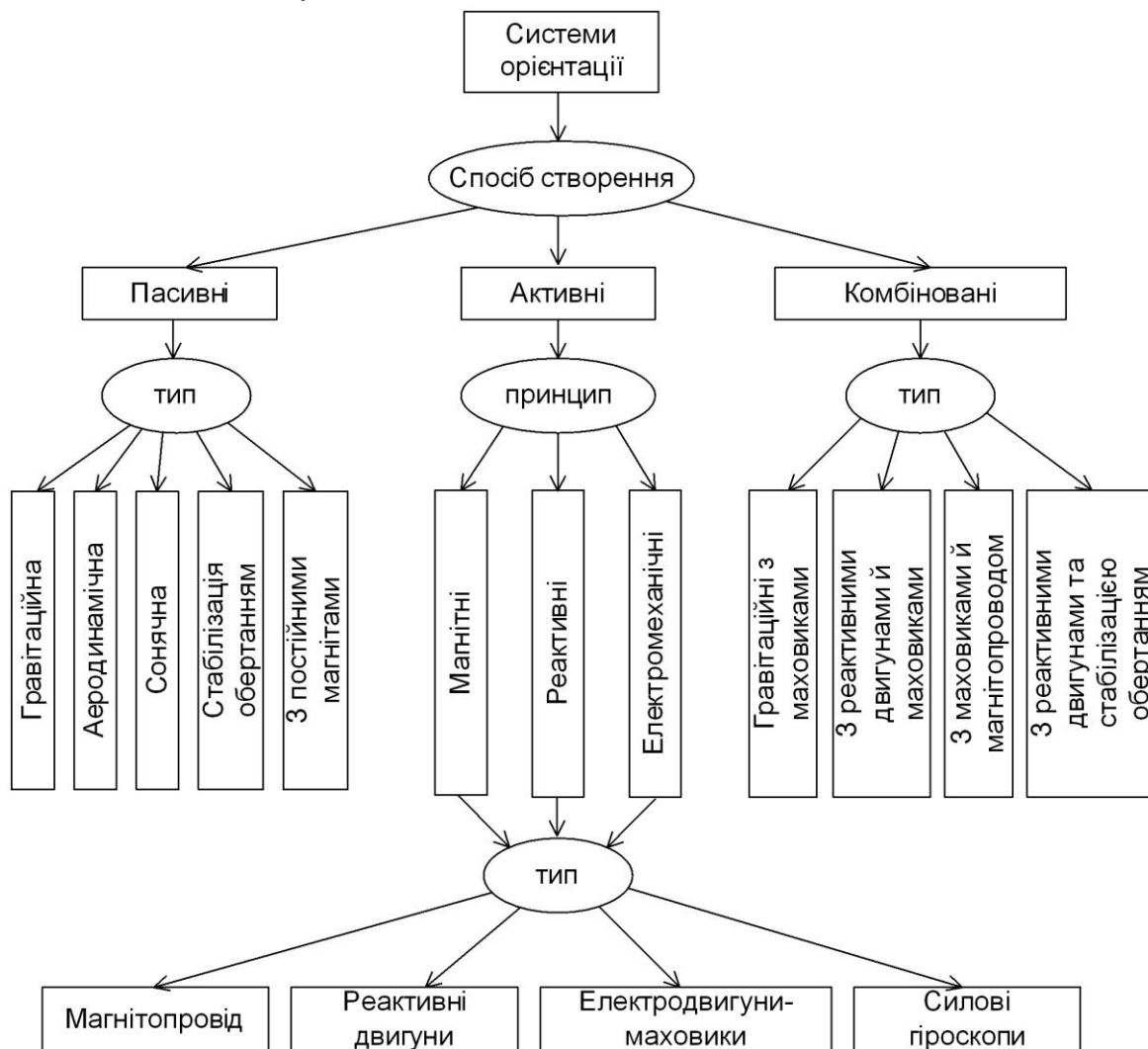


Рисунок 1.1 – Класифікація систем орієнтації

Перший клас представляють пасивні системи орієнтації. Керуючий момент у таких системах створюється за допомогою взаємодії космічного апарату з навколишнім середовищем, зокрема, у результаті взаємодії з гравітаційними або магнітними полями, або за рахунок сонячного тиску, або аеродинамічного опору, або обертання відносно поздовжньої осі КА. При підтриманні орієнтації космічного апарату в пасивних системах не використовуються бортові джерела енергії, які виробляють викид мас, і тому є ідеально економічними. За типом

використовуваних зовнішніх керуючих моментів розрізняють гравітаційні штангові системи орієнтації, аеродинамічні кульові та сонячні вітрила. Найбільшого поширення набули гравітаційні системи. Проведений аналіз кутових рухів космічних апаратів при використанні зовнішніх керуючих моментів свідчить про наявність коливальних недемпфованих рухів. Таким чином, для кутових рухів космічного апарату при використанні пасивних органів орієнтації характерна повна відсутність демпфування. Тому необхідно забезпечити штучне демпфування за допомогою автоматичної системи орієнтації, яка реагує на кутову швидкість космічного апарату [2].

В активних системах орієнтації, що представляють другий клас, керуючі моменти створюються за рахунок використання реактивного палива, або бортових джерел живлення для обертання маховиків. За принципами формування керуючих моментів, що використовуються в активних системах, розрізняють магнітні, реактивні та електромеханічні системи орієнтації. У магнітних системах орієнтації керуючий момент створюється за допомогою електромагнітів, що взаємодіють з магнітним полем Землі. У реактивних системах орієнтації використовують реактивні двигуни різних типів. Продукти згоряння, стислий газ або іонно-плазмовий потік, проходячи певним чином встановлені спеціальні сопла, створюють реактивні сили, прикладені до космічного апарату відносно центру мас. Електромеханічний принцип створення керуючих моментів полягає у використанні обертючих інерційних мас, розміщених усередині космічного апарату [3]. За типом реалізації принципів створення активних керуючих моментів розрізняють такі виконавчі органи, як магнітопровід, реактивні двигуни, електродвигуни-маховики (ЕДМ) і силові гіроскопи. Під комбінованими системами розуміють активні системи управління, у яких застосовують комбінації різних типів виконавчих органів.

Наведена класифікація досить умовна, але разом з тим, безперечно відображає місце електродвигунів-маховиків у різноманітні відомих систем орієнтації.

1.3. Приклади систем управління космічних апаратів

Приклади систем управління конкретних космічних апаратів дозволяє зрозуміти необхідний склад апаратних засобів для вирішення завдань орієнтації та роль ЕДМ під час вирішення цих завдань.

Спочатку розглянемо узагальнену функціональну схему системи керування КА, що дає уявлення про завдання, які вирішує система управління КА [6] (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Узагальнена функціональна схема системи управління космічним апаратом

На маневреному автономному КА вирішуються три взаємопов'язані завдання:

- 1) управління орієнтацією та стабілізація кутових положень відносно центру мас;
- 2) навігація КА у просторі;
- 3) наведення КА на ціль.

Для вирішення цих завдань у кожній підсистемі управління використовуються відповідне завданню приладове обладнання та алгоритмічне та програмне забезпечення.

Розглянемо докладніше вирішення першого завдання управління орієнтацією і стабілізацією на прикладі мікросупутника дистанційного зондування Землі МС-2-8 [6]. На рис. 1.3 представлена функціональна схема системи управління орієнтацією та стабілізацією.

У представленій системі у якості інерційних виконавчих органів використовуються ЕДМ і силові гіроскопи, розвантаження яких здійснюється за допомогою магнітних котушок. У якості двигунів стабілізації використовуються реактивні двигуни.

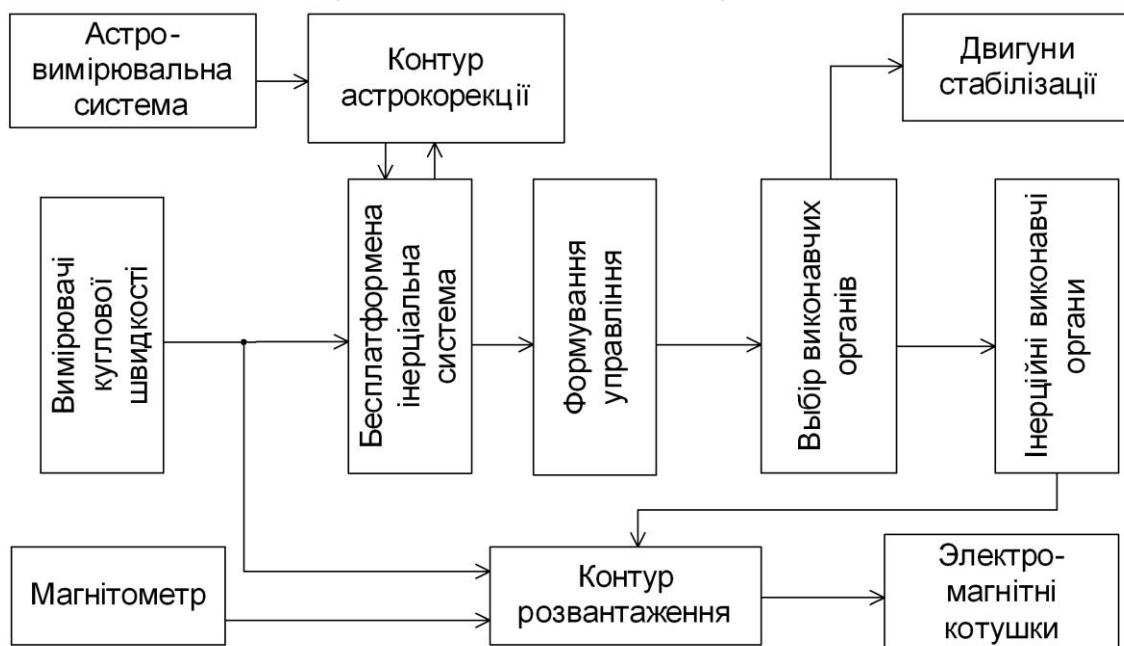


Рисунок 1.3 – Функціональна схема системи управління орієнтацією та стабілізацією МС-2-8

Як приклад, представимо структурну схему системи управління наукового КА «Спектр», розробки НВП «Хартрон-Аркус» [6]. КА призначений для вивчення магнітного випромінювання Галактики та зірок. Орбіти апарату в апогеї від 170000 км до 350000 км, у перигеї від 300 км до 5000 км; точність орієнтації 0,2''...3'; точність стабілізації по куту 0,1''...2,5'; по кутовій швидкості $< 0,0001\%_c$.

Приладовий склад системи управління та приладових зв'язків відображає структурна схема (рис. 1.4).

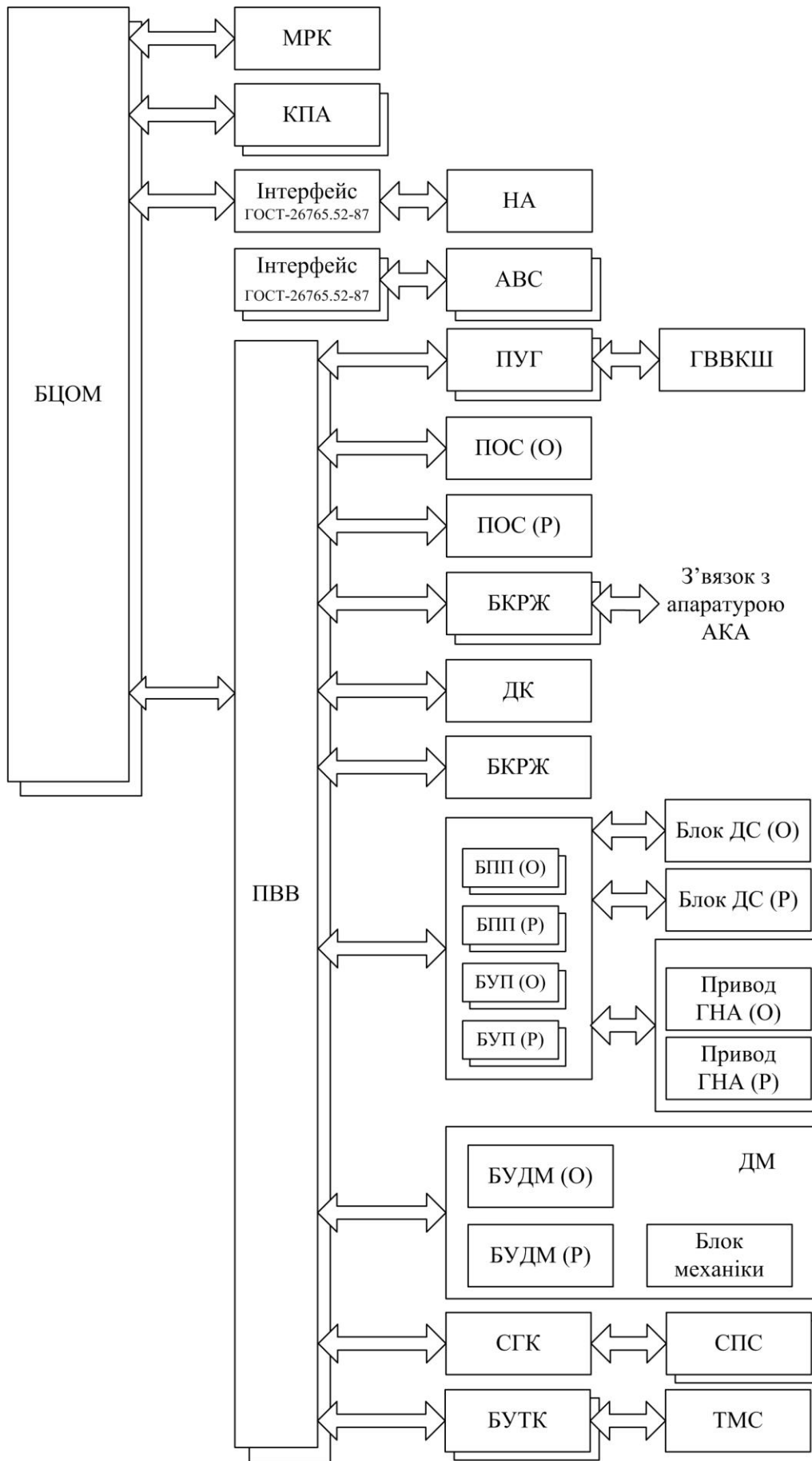


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи управління КА «Спектр»

На рисунку застосовуються такі абревіатури: БЦОМ – бортова цифрова обчислювальна машина; МРК – модуль релейних команд; КПА – контрольно-перевірочна апаратура; НА – наукова апаратура; АВС – астровимірювальна система; ПВВ – пристрій введення-виведення; ПУ – прилад узгодження ГВВКШ; ГВВКШ – гіроскопічний вимірювач вектора кутової швидкості; ПОС – прилад орієнтації на Сонце; О – основний; Р – резервний; БКРЖ – блок комутації та розподілу живлення; АКА – автоматичний космічний апарат; ДК – двигун корекції; БПП – блок підсилювача потужності; БУП – блок управління приводом; ДС – двигуни стабілізації; ГНА – гостронаправлена антена; ДМ – двигуни-маховики; БУДМ – блок управління двигунами-маховиками; СГК – силовий гіроскопічний комплекс; БУТК – блок узгодження телеметричного контролю; СПС – статичний перетворювач струму; ТМС – телеметрична станція.

З наведеної структурної схеми очевидний апаратний склад системи управління науковим КА «Спектр», і навіть зв'язку апаратури з БЦВМ, що керує процесом її використання. Поряд з ДС(О) та ДС(Р) при орієнтації КА використовуються також ДМ.

Розглянемо підхід до проектування бортових систем управління КА Московського дослідно-конструкторського бюро «Марс» [7]. У розробках бюро бортові системи управління (БСУ) виконують такі основні функції:

- 1) управління рухом КА навколо центру мас за допомогою електромеханічних виконавчих пристроїв;
- 2) забезпечення заданої орієнтації КА у базовій системі координат;
- 3) здійснення кутової стабілізації КА у заданій системі орієнтації з необхідною точністю;
- 4) визначення поточних параметрів кутового та траєкторного руху КА;
- 5) демпфування залишкової кутової швидкості КА після відділення від носія;
- 6) забезпечення приведення КА після демпфування у потрібну орієнтацію;
- 7) розвантаження ЕДМ для зменшення накопиченого кінетичного моменту;
- 8) корекція орбіти КА за допомогою включення та вимкнення двигунів;
- 9) управління функціонуванням двигунів;
- 10) управління орієнтацією сонячних батарей;

- 11) управління роботою пірозасобів КА;
- 12) управління цільовою апаратурою, системою електропоста-чання;
- 13) управління роботою системи телеметричних вимірів (СТВ);
- 14) управління роботою засобів, які забезпечують тепловий режим;
- 15) контроль бортової системи управління та парирування наслідків відмов;
- 16) ведення бортової шкали часу із заданою точністю.

До складу БСК (рис. 1.5) входять:

- 1) бортова цифрова обчислювальна система (БЦОС), в якій виробляються керуючі впливи на приладове обладнання та здійснюється інформаційна взаємодія з іншими системами КА;
- 2) блоки силової автоматики (БСА), які здійснюють комутацію електроживлення для приладового обладнання;
- 3) інформаційно-вимірювальна система (ІВС), що забезпечує здійснення процесів управління КА із заданою точністю;
- 4) виконавчі органи (ВО) для відпрацювання керуючих впливів з метою зміни або збереження положення КА у просторі.

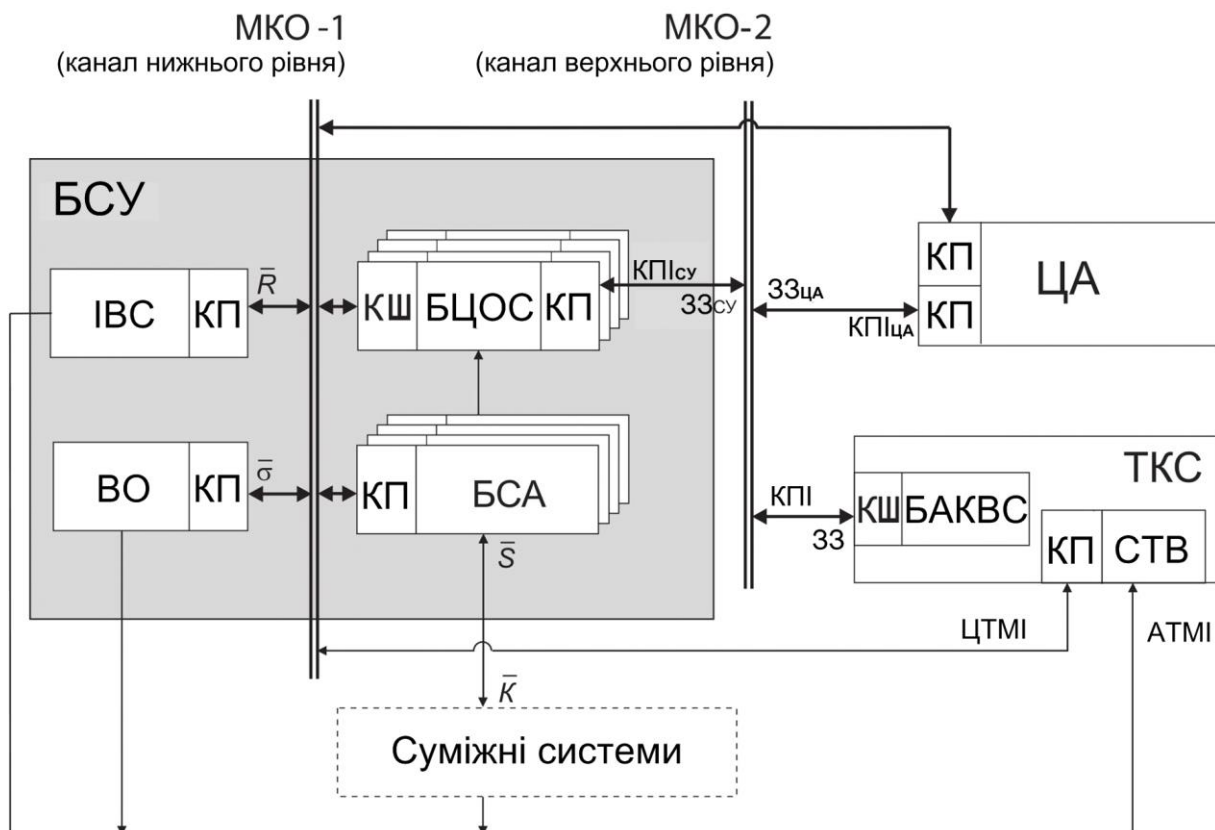


Рисунок 1.5 – Структурна схема бортової системи управління

Зв'язок БЦОС з блоками та системами, а також з цільовою апаратурою (ЦА) та СТВ здійснюється по мультиплексному каналу обміну (МКО-1).

По другому каналу обміну (МКО-2) бортова апаратура командно-виміральної системи (БАКВС) пов'язана з БЦОС та ЦА. БЦОС є контролером шини (КШ) по відношенню до всіх пристроїв, крім БАКВС, по відношенню до якої є кінцевим пристроєм (КП).

В ІВС формується вектор параметрів стану \bar{R} КА, що надходить до БЦОС, де використовується в обчислювальних алгоритмах. У результаті обчислень формується вектор управління $\bar{\sigma}$, що надходить на ВО. БСА отримують від суміжних систем вектор сигналів \bar{S} і передають на них вектор команд \bar{K} . Командно-програмна інформація (КПІ) надходить від наземного комплексу управління через ТКС до БСК, а аналогова (АТМІ) та цифрова (ЦТМІ) телеметрична інформація – у зворотному порядку.

Структурна схема БСК "Монітор-Е" представлена на рис. 1.6. Це перша розробка бюро "Марс", що стала базовою для подальших розробок для КА "КазСат", "Експрес-МД1", "Електро-Л", "Спектр-Р".

На схемі застосовуються такі аббревіатури: ТДСОС – термодинамічна система орієнтації супутника; АД – астродатчик; ГВВКШ – гіроскопічний вимірвач вектора кутової швидкості; КУДМ – комплекс управляючих двигунів-маховиків; ДМ – двигуни-маховики; ЕП – електронний прилад; СМК – силовий магнітний комплекс; КПП – комутаційно-перетворюючий пристрій; ПЗА – панхроматична знімальна апаратура; БУ СНІПІ – блок управління системи накопичення і перетворення інформації; РДЗА – розподіленого доступу знімальна апаратура; БАКВС – бортова апаратура командно-виміральної системи; ТКС – телекомандна система; АСН – апаратура супутникової навігації; РБ – розгінний блок; АПУ ДУ – апаратура перетворення та управління двигуновою установкою; АОСБ – апаратура орієнтації сонячних батарей; СЗТР – система забезпечення теплового режиму; АРК СЕП – апаратура регулювання та контролю системи електропостачання; ППРЗЕ – піропатрони розкриття зовнішніх елементів.

Для вирішення завдань орієнтації та стабілізації в КА «Монітор-Е» використовувалися 4 двигуни-маховики. У подальших технологіях КУДМ зберігся.

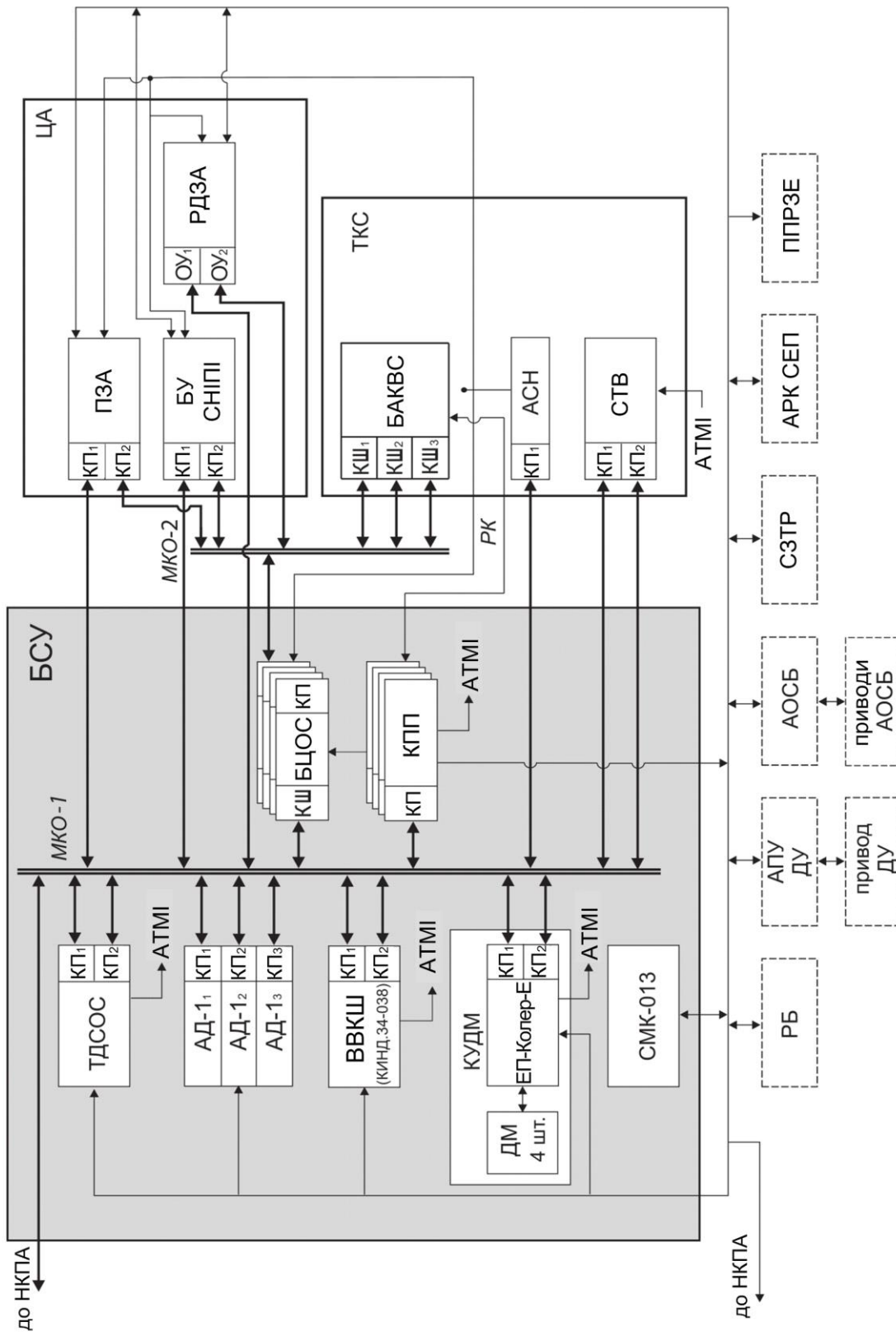


Рисунок 1.6 – Структурна схема БСУ КА «Монитор-Е»

1.4. Електродвигуни-маховики

Застосування ЕДМ як виконавчих органів, розташованих за трьома осями пов'язаної з КА системи координат було запропоновано К. Е. Цюлковським у 1902 році [8].

У перших електромеханічних системах орієнтації КА "Метеор" та "Ресурс" (1963 р.) використовувалися асинхронні електродвигуни-маховики з електронними перетворювачами, розробки "НВП ВНДІЕМ" [3]. За принципом дії вони були релейними. Надалі була освоєна серія виконавчих органів на основі керованих безконтактних двигунів постійного струму з постійними магнітами. У цих електродвигунах управління крутним моментом здійснювалося зміною струму в якірній обмотці. Управління величиною струму проводиться регулятором з широтно-імпульсною модуляцією за зовнішнім управляючим сигналом, з яким порівнюється струм в обмотці якоря. Нові ЕДМ дозволили реалізувати у маховичних системах орієнтації лінійні алгоритми управління.

Конструкцію ЕДМ серії ДМ20-250 для КА "Електро" представлено на рис. 1.7.

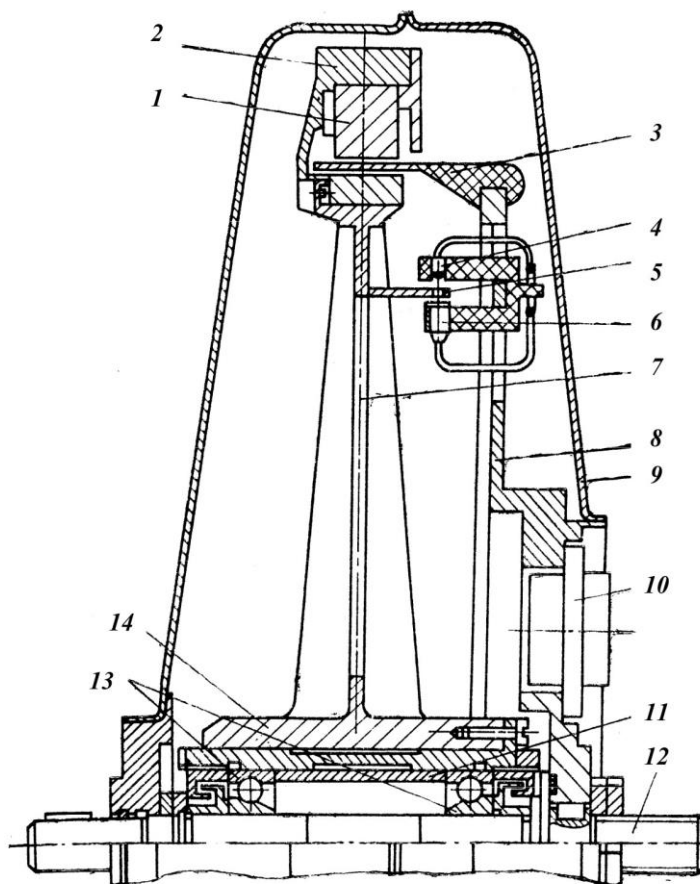


Рисунок 1.7 – Конструкція електродвигуна-маховика

У цій конструкції ротор-маховик, який встановлено на двох підшипниках 13, розташований усередині герметичного корпусу 9. Внутрішні кільця підшипників посаджені на нерухому вісь 12. Через ущільнення кінці осі виведено за межі кожуха і служать для кріплення ЕДМ на КА. Відстань між підшипниками витримується за допомогою втулки 11.

Ротор-маховик 2 має форму обода. Обід складається із зовнішнього та внутрішнього магнітопроводів, укріплених на спицях 7 і ступиці 14. У розточці зовнішнього магнітопроводу розташовано постійні магніти 1, що намагнічені у радіальному напрямку. Зовнішній і внутрішній магнітопроводи з'єднані перемичкою, що екранує, і утворюють єдину деталь. Магнітні екрани локалізують магнітні поля у заданій зоні, усуваючи поля розсіювання, які могли б викликати гальмівні моменти, що діють на ротор збоку елементів конструкції.

У зазорі між магнітами та внутрішнім магнітопроводом знаходиться статор 3. Він виконаний у вигляді тонкостінного безкаркасного циліндра, утвореного провідниками обмотки якоря та залитого компаудом. Статор укріплений на фланці 8, звареному з кожухом 9. Така конструкція дозволяє використовувати як інерційну масу не тільки обід, а й активні частини – магніти, що сприяє мінімізації питомих масових характеристик ЕДМ.

Перемикання обмоток проводиться комутатором, керованим датчиками Холла, які розташовано на якорі двигуна в робочому зазорі.

На фланці розміщено роз'єднання для з'єднання електричних ланцюгів ЕДМ зі схемою управління, а також клапан 10 для підтримки усередині кожуха заданого перепаду тиску по відношенню до навколишнього простору.

Для визначення кінетичного моменту використовується блок випромінюючих діодів 4 і фотодіод 6. Вони розділені встановленим на роторі тонкостінним екранним циліндром 5 з 240 отворами. Блок містить дві оптичні пари, зсунуті на 90° . При обертанні маховика через отвори екрана відбувається періодичне засвітлення фотодіодів. Вони генерують змінну напругу з частотою, що пропорційна частоті обертання ротора. У результаті обробки сигналів двох оптичних пар обчислюється частота та напрямок обертання маховика.

ЕДМ серії ДМ20-250 діаметром близько 0,4 м та масою 10 кг розвиває максимальний кінетичний момент 20 Нмс (рис. 1.8). Максимальна частота обертання ротора 1100 хв^{-1} . Управляючий момент

змінюється у діапазоні від 0,002 Н·м (момент рушання) до 0,25 Н·м (максимальний момент).

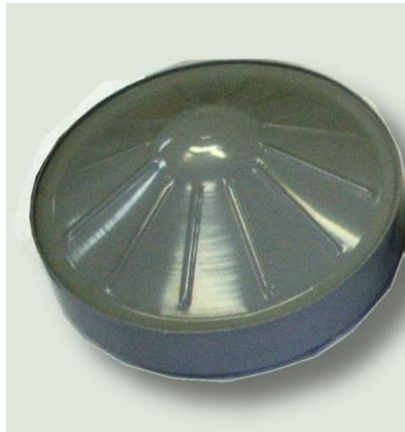


Рисунок 1.8 – Електродвигун-маховик ДМ20-250

Управління ЕДМ здійснюється з використанням принципу управління за відхиленням. На рис. 1.9 представлена функціональна схема електромаховичного виконавчого органу.

Управління кінетичним моментом ЕДМ здійснюється за допомогою ШІМ-сигналів, що надходять до комутатора, та силових транзисторів. ШІМ-сигнали формуються за допомогою задавання часових інтервалів $+\tau$ та $-\tau$. Комутатор забезпечує увімкнення та відключення секцій обмотки електродвигуна за сигналами датчика кутового положення відповідно до знака сигналу управління $+\tau$ або $-\tau$.

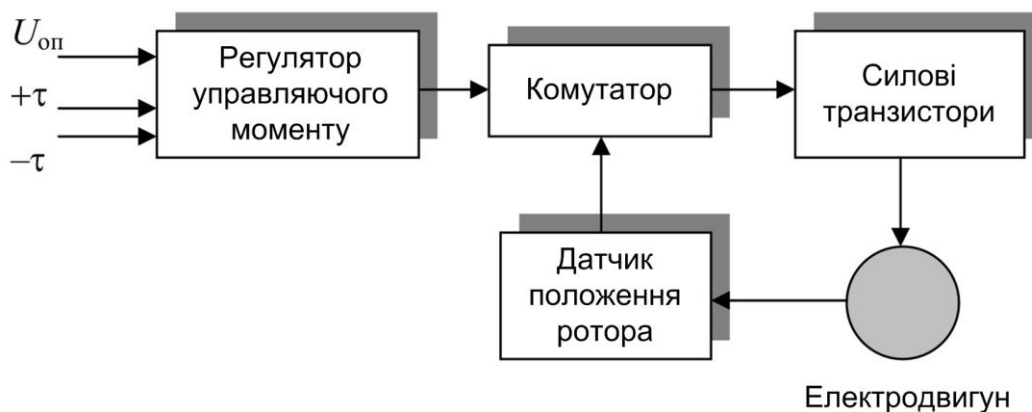


Рисунок 1.9 – Функціональна схема електромаховичного виконавчого органу

Серед різноманіття конструкцій ЕДМ виділимо перспективний кульовий ЕДМ із магнітним підвісом ротора [3] (рис. 1.10). Ротор-маховик виконано у вигляді порожньої сталевий кулі, що утримується всередині корпусу за допомогою шести електромагнітів.

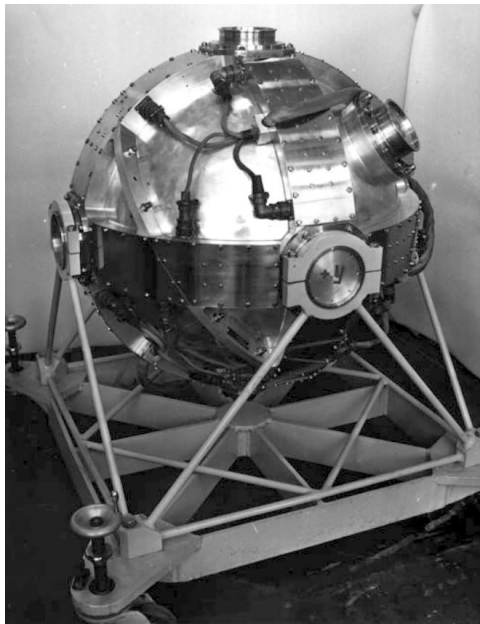


Рисунок 1.10 – Кульовий електродвигун-маховик

Один кульовий ЕДМ замінює три одновісні ЕДМ і цим забезпечує вигреш у масі. Кульовий ЕДМ з діаметром ротора 0,64 м та загальною масою 230 кг використовувався для тривісної стабілізації та повільних поворотів орбітальних станцій «Салют» та «Діамант». Він розвиває управляючий момент до 3 Н·м та кінетичний момент до 200 Н·м·с.

Виробництво ЕДМ здійснюється з використанням високотехнологічного обладнання та з високою технологічною культурою, тому відомо лише про ряд фірм, що постачають на ринок високоякісні ЕДМ. У табл. 1.1 представлені світові виробники ЕДМ [9].

Усі ЕДМ призначені для експлуатації електромеханічних блоків поза герметичним контейнером різних КА. Наприклад, ЕДМ фірми ВНДІЕМ застосовують у складі систем орієнтації та стабілізації супутників типу ГЛОНАСС. Система орієнтації та стабілізації забезпечує демпфування коливань супутника після відокремлення від засобів виведення, початкову орієнтацію сонячних батарей на Сонце та поздовжньої осі супутника на Землю, а також стабілізацію супутника в процесі корекції орбіти. Розвантаження ЕДМ здійснюється за допомогою магнітопроводу.

Отже, в системах орієнтації КА, що виконують одне з головних завдань у різних космічних місіях, як виконавчі органи для тривалих польотів використовуються перспективні ЕДМ.

Таблиця 1.1

Найменування параметра, розмірність	Країна, фірма-виробник, модель ДМ							
	Канада, Дуласоп, MW1000	Канада, Дуласоп, MW4000	Німеччина, Teldix, RSI 4-75/60	Німеччина, Teldix, RSI30-280/30	США, Honeywell, HR16	Росія, ВНДІЕМ, ДМ1-20	Росія, ВНДІЕМ, ДМ5-50	Росія, ВНДІЕМ, ДМ20-250
Кинетичний момент, Н·м·с	1,1	4	4,0	30,0	50	1,0	5,0	20,0
Управляючий момент, МН·м	30	50 - 150	75	280	200	20	50	250
Швидкість обертання, об/хв.	10000	10000	7000	7300	6000	65000	63500	61470
Інтерфейс	RS-422/485	RS-422/485	-	-	-	-	-	-
Потужність в усталеному режимі, Вт	5	7,5	-	-	22	-	-	-
Максимальна потужність, Вт	41	75	20	-	105	15	31	70
Напруга живлення, В	28	28	-	-	14	-	-	-
Маса, кг	14,5	5,2	-	-	12	1,4	3,8	11,5
Габарити, мм	130×130×90	250×250×110	-	-	Ø 351, висота – 159	Ø 150, висота – 95	Ø 225, висота – 114	Ø 360, висота – 160
Строк служби, років	5	5	15	15	15	13	13	13

Розділ II. СХЕМИ ВСТАНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ

Ті, хто правильно знаходять спільне, можуть правильно розглянути і приватні речі.

Піфагор (VI ст. до н. е.) – філософ та вчений, засновник піфагорійської школи, досягнення якої стали фундаментальними для розвитку античної цивілізації

Відомий ряд практичних схем встановлення електродвигунів-маховиків на космічних апаратах. Чим викликане таке різноманіття, які причини? Обмежено це різноманіття чи ні? Які існують теоретичні передумови для дослідження інших можливих схем розміщення? Які властивості мають відомі схеми встановлення електродвигунів-маховиків? На ці та інші питання практичної установки подано відповідь у наступному викладі.

2.1. Основні положення про різноманітність можливих схем встановлення

Для виконання тривалих космічних місій потрібна працездатність систем орієнтації КА та, зокрема, ЕДМ. Ресурсні можливості ЕДМ обмежені і не завжди збігаються з потрібним ресурсом місії КА. Більше того, паспортні терміни служби ЕДМ не завжди підтверджуються на практиці через неминучі у космічному польоті несправності, збої та відмови. Тому розробники електромеханічних блоків змушені використовувати надмірну кількість ЕДМ задля забезпечення безаварійного функціонування виконавчих органів протягом усієї довготривалої місії.

Відомі практичні схеми розміщення ЕДМ базуються на використанні таких геометричних фігур, як куб та піраміда. Куб та піраміда належать до класу опуклих багатогранників. Видається доцільним розглянути увесь клас опуклих багатогранників, що дозволить сформулювати обґрунтоване уявлення про потенційно можливе різноманіття розміщення ЕДМ.

Багатогранником у тривимірному просторі називається сукупність кінцевого числа плоских багатокутників така, що кожна сторона будь-якого багатокутника є одночасно стороною іншого [8].

Багатогранник називається опуклим, якщо він лежить з одєї сторони від площини будь-якої його грані. Внутрішня частина багатогранника є опуклим тілом.

Однією з основних теорем загальної теорії опуклих багатогранників є теорема Ейлера (1758): число вершин мінус число ребер плюс число граней дорівнює двом. Символічно, що

$$V - P + \Gamma = 2, \quad (2.1)$$

це ейлерова характеристика багатогранників.

Найбільш важливим для цього розгляду є канонічний клас правильних багатогранників.

Правильні багатогранники – це опуклі багатогранники, усі грані яких суть правильні багатокутники. Багатокутник називається правильним, якщо у нього рівні сторони та кути. Багатогранні кути при всіх вершинах правильного багатогранника рівні між собою, оскільки рівні їх плоскі та двогранні кути. Це означає, що у кожній вершині сходиться однакове число граней – q . Якщо позначити кількість кутів багатокутника як p , то справедливою є така нерівність:

$$(p - 2)(q - 2) < 4. \quad (2.2)$$

Враховуючи тепер, що p і q – цілі числа не менше 3, то всі можливі пари (p, q) будуть такими: $(3,3)$, $(4,3)$, $(3,4)$, $(5,3)$, $(3,5)$. На рис. 2.1 подано правильні багатогранники, що відповідають нерівності (2.2).

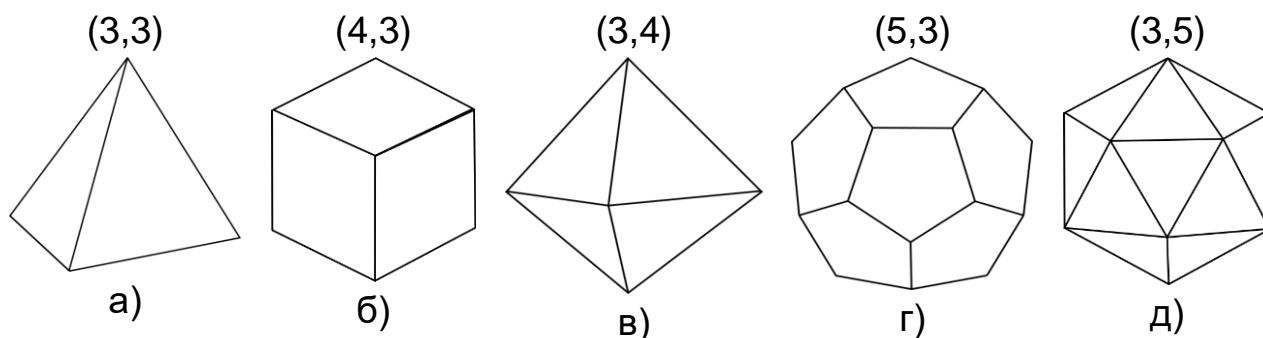


Рисунок 2.1 – Правильні опуклі багатогранники

Представлені багатогранники мають різну кількість граней та отримали назву відповідно до числа граней. Так, багатогранник на рис. 2.1, а має чотири грані і тому отримав назву тетраедр (від грецьк. «тетра» – чотири та «хедрон» – грань). Багатогранник на рис. 2.1, б – гексаедр, він більш відомий як куб. Вісім граней у багатогранника на рис. 2.1, в, отже, це октаедр. Багатогранник (рис. 2.1, г) із дванадцятьма

гранями – додекаедр, та багатогранник (рис. 2.1, д), що містить 20 граней і названий як ікосаедр.

На основі куба можна побудувати й решту чотири види багатогранників. Йоган Кеплер вважав куб «батьком» усіх правильних тіл. Так, кінці діагоналей, що схрещуються, протилежних граней куба будуть вершинами правильного тетраедра (рис. 2.2, а).

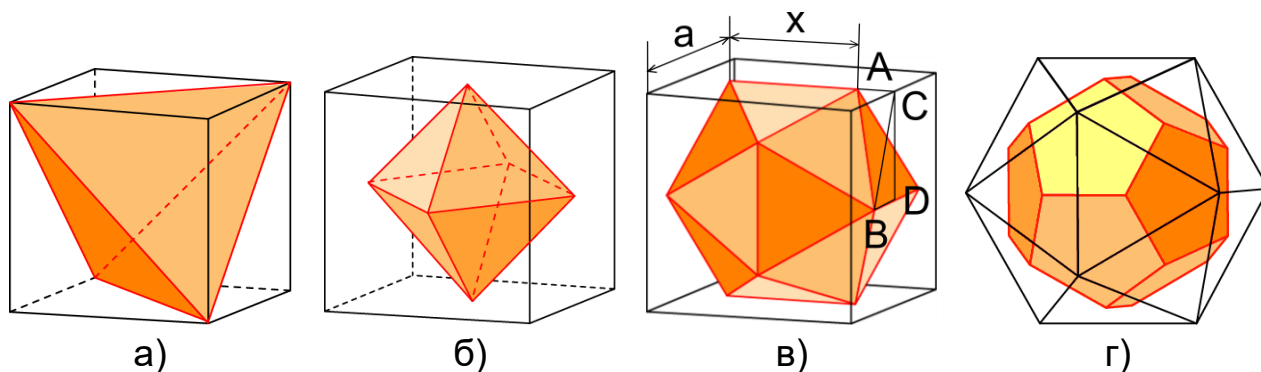


Рисунок 2.2 – Правильні багатогранники, вписані в куб

Якщо з'єднати центр кожної грані куба із центрами сусідніх граней, отримаємо 12 рівних відрізків, що утворюють ребра правильного октаедра (рис. 2.2, б). Ікосаедр будується складніше. На кожній грані куба паралельно двом її сторонам проведемо по відрізку однієї й тієї ж довжини x із серединою в центрі грані так, щоб відрізки на сусідніх гранях були перпендикулярні. З'єднаємо кінці цих відрізків так, як показано на рис. 2.2, в. Вийде двадцятигранник типу (3,5), тобто усі його грані – трикутники і при кожній вершині їх п'ять. Підберемо x так, щоб усі ребра були рівними. За допомогою теореми Піфагора довжина ребра AB дорівнюватиме

$$AB^2 = AC^2 + CB^2 = AC^2 + CD^2 + DB^2 = \frac{[x^2 + a^2 + (a-x)^2]}{4}, \quad (2.3)$$

тут a – довжина ребра куба.

Умова $AB^2 = x^2$ породжує квадратне рівняння $x^2 + ax - a^2 = 0$,

позитивний корінь якого дорівнює $x = \frac{a(\sqrt{5}-1)}{2}$. Цікаво, що відношення

$\frac{x}{a} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ є відношення золоті пропорції. При даному значенні x усі

грані вписаного багатогранника – правильні трикутники. Також існує доказ рівності двогранних кутів.

Додекаедр можна отримати з ікосаедра тим самим способом, що і октаедр із куба. Якщо з'єднати центри суміжних граней ікосаедра, то отримаємо п'ятикутні грані (рис. 2.2, г). Загалом таких п'ятикутників буде дванадцять. Доказ рівності граней та двогранних кутів призводить до висновку, що це правильний додекаедр [10, 11].

На рис. 2.3 представлена кеплерівська космічна містерія з його книги «Mysterium Cosmographicum», опублікованої в 1596 [12].

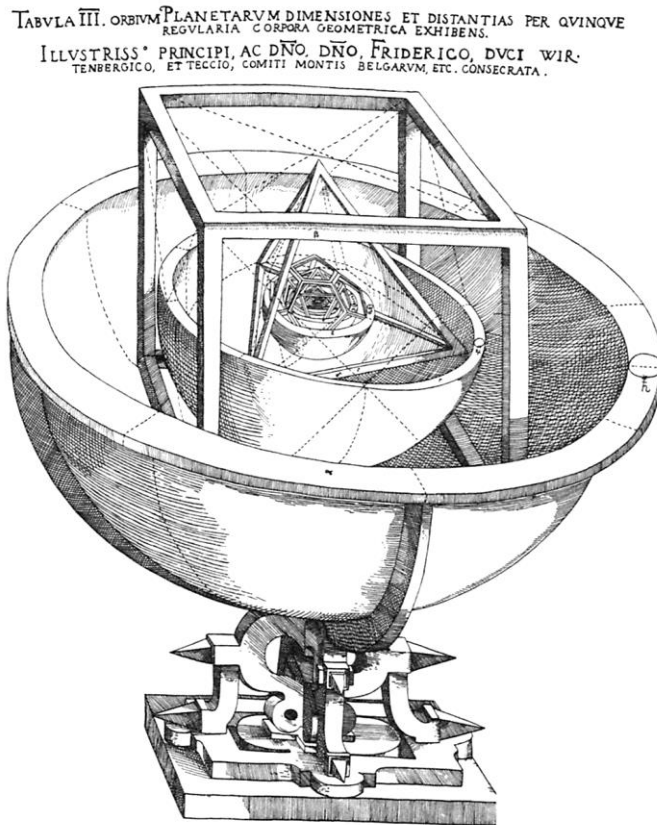


Рисунок 2.3 – Кеплерівська космічна містерія

Сфери відомих на той час шести планет, описані навколо п'яти правильних піфагорових (платонових) тіл, з яких зовнішнім є куб.

Найважливішою властивістю правильних багатогранників є їхня симетричність. З кожним правильним багатогранником пов'язана така характеристика, як двогранний кут – це кут між суміжними гранями. Цей кут визначається за допомогою формули:

$$\sin \frac{\Theta}{2} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{q}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{p}\right)}. \quad (2.4)$$

Правильні багатогранники з давніх-давен привертати до себе увагу вчених, будівельників, архітекторів і філософів. Вражала краса,

досконалість, гармонія цих багатогранників. Піфагорійці вважали ці багатогранники божественними і використовували в своїх філософських ученнях про сутність Світу. Вони вважали, що елементи першооснови буття мають форму правильних багатогранників.

Детально описав властивості правильних багатогранників давньогрецький вчений Платон і тому їх називають тілами Платона. Правильним багатогранникам присвячена XIII книга знаменитих начатків Евкліда [11].

Для досліджень Піфагора, Кеплера та його послідовників фундаментальне значення має те що, що є лише п'ять правильних тіл. Доказ цього факту можна отримати з відкритого значно пізніше Декартом й Ейлером співвідношення, що зв'язує числа граней, ребер і вершин у будь-якому багатограннику (2.1). Користуючись цим рівнянням, можна довести, що є п'ять правильних багатогранників.

Отже, кожне ребро правильного багатогранника є спільною стороною двох граней, що прилягають. Якщо всіх граней багатогранника $nГ$, то співвідношення з ребрами буде наступним

$$nГ = 2Р. \quad (2.5)$$

Позначимо число ребер, які сходяться на одній вершині як $Р'$. Оскільки кожне ребро з'єднує дві вершини, то

$$Р'В = 2Р. \quad (2.6)$$

Підставляючи вирази для $Г$ і $В$ з отриманих співвідношень у рівняння (2.1), отримуємо:

$$\frac{2Р}{Р'} - Р + \frac{2Р}{n} = 2.$$

Поділення обох частин цього рівняння на $2Р$ після відповідних перетворень дозволяє отримати наступне рівняння:

$$\frac{1}{n} + \frac{1}{Р'} = \frac{1}{2} + \frac{1}{Р}. \quad (2.7)$$

Очевидно, що n не може бути менше 3, оскільки трикутник є найпростішим багатокутником, а також, що в кожній вершині багатогранника сходиться не менше трьох граней – $Р' = 3$. Якщо n та $Р'$ одночасно будуть більше 3, то з урахуванням цілісності їх значень, ліва частина рівняння виявиться меншою або дорівнюватиме $\frac{1}{2}$, і ні за якого значення $Р$ вона не перетвориться на рівність. Таким чином, рівняння справедливе або при $n = 3$ та $Р' \geq 3$, або $Р' = 3$ та $n \geq 3$.

Якщо $n = 3$, рівняння (2.7) набуває наступного вигляду:

$$\frac{1}{3} + \frac{1}{P'} = \frac{1}{2} + \frac{1}{P},$$

або

$$\frac{1}{P'} = \frac{1}{P} + \frac{1}{6}. \quad (2.8)$$

У даному випадку P' може приймати лише значення 3, 4 та 5. При $P' \geq 6$ рівняння немає рішення. Значення $n = 3$, $P' = 3$ відповідають багатограннику, у якого в кожній вершині сходяться три трикутники. Відповідно до рівняння (2.8) він має 6 ребер, далі відповідно до рівняння (2.6) у нього 4 вершини, а відповідно до рівняння (2.5) – 4 грані. Очевидно, що це піраміда чи тетраедр. При $n = 3$, $P' = 4$ виходить восьмигранник, у якого в кожній вершині сходяться по чотири трикутні грані – октаедр.

Якщо $P' = 3$, рівняння (2.7) перетворюється на вид

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{P} + \frac{1}{6}$$

і, повторивши аналогічні міркування, ми отримаємо, що n може приймати тільки значення 3, 4 і 5. При $n = 3$ знову виходить тетраедр. Значенню $n = 4$ відповідає багатогранник із 6 квадратів – куб, а при $n = 5$ результатом буде багатогранник, що складається з п'ятикутників – додекаедр.

Інші поєднання цілих чисел не підходять як рішення для рівняння (2.7), отже, існує лише п'ять правильних багатогранників [12].

Цей результат суттєво вплинув на думки та результати багатьох дослідників природних закономірностей.

Отже, принциповою особливістю класу опуклих правильних багатогранників є використання у якості граней багатокутників з рівними сторонами та кутами. І тому клас опуклих правильних багатогранників виявився обмеженим та містить, що доведено Евклідом, лише п'ять фігур: тетраедр, гексаедр або куб, октаедр та ікосаедр, які отримали з давніх-давен узагальнену назву тіл Платона.

У початковій практиці розміщення ЕДМ та формування їх компоновочної схеми стали використовувати поняття «опорні тіла» – це геометричні фігури, до ребер або граней яких прив'язувалися осі обертання ЕДМ. Такими геометричними фігурами традиційно вибирали куб чи піраміду. У наступні роки почали досліджувати можливості інших опорних тіл для формування раціональної схеми компоновання розміщення ЕДМ, що задовольняє тактико-технічним вимогам до

проектованих КА. Ця обставина призвела до того, що в якості опорних тіл почали обирати вже як фрагменти правильних опуклих багатогранників, так і їх модифікації. Цей процес перебуває у перехідному розвитку, оскільки розміщення ЕДМ з використанням правильних опуклих багатогранників як опорних тіл найчастіше входить у протиріччя з тактико-технічними вимогами створюваних КА. Як правило, вирішується це протиріччя компромісом, пов'язаним з відступом від класичних геометрично правильних багатогранних форм. У даний час на багатьох КА, що експлуатуються, використовуються схеми розміщення, які називаються «куб» і «піраміда». Пошуки інших раціональних схем розміщення продовжуються. Цей пошук обумовлений необхідністю виконання таких суперечливих вимог, як збільшення часу активного функціонування систем орієнтації з ЕДМ, зменшення масогабаритних, енергетичних та вартісних характеристик апаратного обладнання, підвищення якості та ефективності процесу орієнтації та стабілізації КА.

2.2. Схема кубічної установки

Керувати орієнтацією КА можна за допомогою управління його кутовим положенням навколо трьох осей. Для отримання незалежних керуючих моментів за трьома осями КА на його борту встановлюють три ЕДМ з осями обертання, що паралельні осям зв'язаної системи координат. Слід зазначити, що момент, створюваний ЕДМ, не залежить від місця його установки на КА. Необхідно тільки, щоб вісь обертання ЕДМ була паралельною відповідній осі зв'язаної системи координат. У якості опорного тіла при такій установці використовується куб. На рис. 2.4 представлено схему встановлення ЕДМ за схемою куб.

У цій схемі установки ЕДМ₁ створює момент, що управляє навколо осі O_x:

$$M_x = -\dot{H}_1, \quad (2.9)$$

де \dot{H}_1 – похідна кінетичного моменту ЕДМ₁, рівна $J_1\dot{\omega}_1$, J_1 – момент інерції ЕДМ₁ і $\dot{\omega}_1$ – похідна його кутової швидкості.

Аналогічно ЕДМ₂ створює момент, що управляє навколо осі O_y:

$$M_y = -J_2\dot{\omega}_2 = \dot{H}_2, \quad (2.10)$$

тут J_2 і $\dot{\omega}_2$ – відповідно момент інерції та прискорення ЕДМ₂, а \dot{H}_2 – похідна його кінетичного моменту.

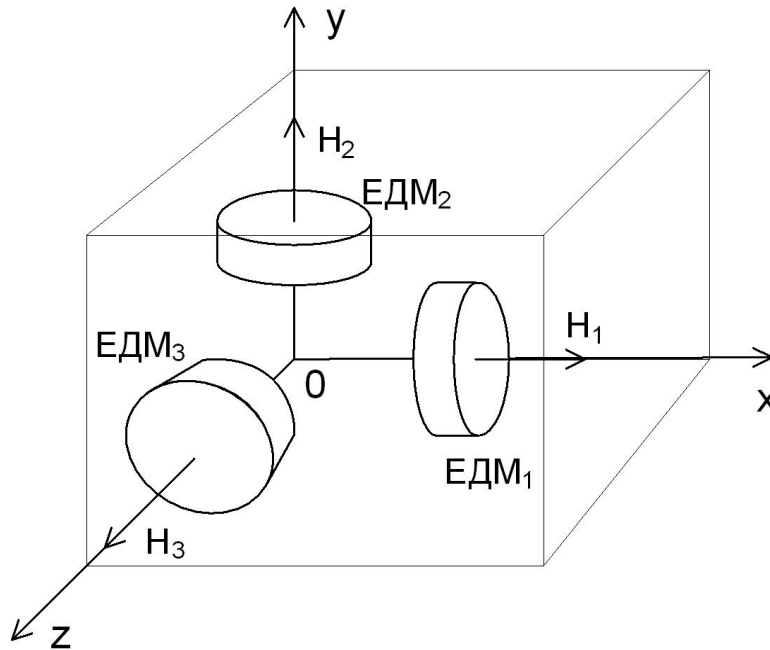


Рисунок 2.4 – Схема установки ЕДМ по граням куба

Навколо осі Oz управляючий момент створюється ЕДМ₃ і дорівнює

$$M_z = -J_3 \dot{\omega}_3 = \dot{H}_3, \quad (2.11)$$

де J_3 , $\dot{\omega}_3$ і \dot{H}_3 – відповідно момент інерції, похідна кутової швидкості та похідна кінетичного моменту ЕДМ₃.

Наведені формули не враховують гіроскопічних складових вектору управляючих моментів, що з'являються при обертанні маховичного блоку разом з КА [3].

Незалежність управляючого моменту від місця установки ЕДМ обумовлена наступним. Якщо уявити момент ЕДМ як момент, створюваний парою сил, рівних за величиною та протилежних за напрямом, то згідно з положеннями теоретичної механіки момент пари сил є вільним вектором, який можна переносити у будь-яку точку простору [13].

Також згідно із законом збереження моменту кількості руху [13] для будь-якого одного каналу орієнтації КА, наприклад, для першого, справедливе таке рівняння:

$$\dot{H}_x + \dot{H}_1 = M_{\text{вн}}, \quad (2.12)$$

де \dot{H}_x – похідна кінетичного моменту КА;

$M_{\text{вн}}$ – момент зовнішніх сил.

Із закону збереження моменту кількості руху для кутових рухів КА і ЕДМ₁ впливає незалежність величини управляючого моменту від місця

його генерації за умови збігу напрямків осі Ox_1 і вектору кінетичного моменту H_1 .

Вперше у світовій практиці було використано ЕДМ, встановлені за схемою «куб» на космічному об'єкті «Космос-14», запущеному 13 квітня 1963 року з космодрому Капустін Яр. Розробку електромеханічної системи орієнтації КА було здійснено ВНДІЕМ під керівництвом академіка А. Г. Йосип'яна [3].

Підвищення вимог до тривалості активного функціонування КА призвело до появи та модифікації розглянутої схеми встановлення трьох ЕДМ. Принциповим недоліком традиційної схеми установки ЕДМ по осях пов'язаної системи координат виявилася неможливість виконання орієнтації КА при відмові одного ЕДМ, а тим більше двох. Іншими словами, традиційна схема установки в експлуатації показала низький рівень стійкості до відмов, а як наслідок, позаштатні ситуації, що призводять до припинення космічної місії.

Необхідність тривалого активного функціонування КА у різних космічних місіях зумовила тенденцію підвищення рівня стійкості до відмови як систем орієнтації в цілому, так і апаратного та програмного забезпечення зокрема. Підвищення стійкості до відмови ЕДМ, як здатності функціонування при відмовах окремих компонентів, в сучасній інженерній практиці здійснюється за допомогою введення додаткових ЕДМ. Такий блок, у якому число ЕДМ більше трьох, називається надлишковим.

Найпростіші рішення щодо забезпечення надмірності базуються на введенні резервних ЕДМ у традиційній схемі установки. Найпоширенішим рішенням є використання двох або трьох ідентичних ЕДМ замість одного. Таке технічне рішення призводить до суттєвого збільшення масогабаритних, енергетичних та вартісних характеристик електромеханічного блоку.

Більш досконалі рішення полягають у використанні чотирьох ЕДМ, три з яких розміщуються за традиційною схемою, а четвертий по внутрішній діагоналі куба. На рис. 2.5 представлено схему такої установки мінімально-надлишкових ЕДМ.

Положення внутрішньої діагоналі у цій схемі установки або вектору H_4 може бути задано двома настановними кутами α та β . Кут α визначається за умови однаковості проєкцій вектору H_4 на осі зв'язаної

системи координат $H_{4x} = H_{4y} = H_{4z}$, тоді $H_{4x} = \sin\alpha \cos\beta H_4$;
 $H_{4y} = \cos\alpha H_4$; $H_{4z} = \sin\alpha \sin\beta H_4$.

У результаті перетворення цих співвідношень отримаємо, що $\beta = 45^\circ$, а $\text{tg}\alpha = \frac{1}{\cos\beta} = \sqrt{2}$, отже, $\alpha = 54,74^\circ = 54^\circ 44' 8''$.

Подана схема встановлення чотирьох ЕДМ затверджена стандартом NASA у рамках проекту багатоцільової модульної платформи MMS. Додатковий, надлишковий ЕДМ₄ являє собою ненавантажений резерв на випадок відмови одного з основних ЕДМ₁, ЕДМ₂, та ЕДМ₃.

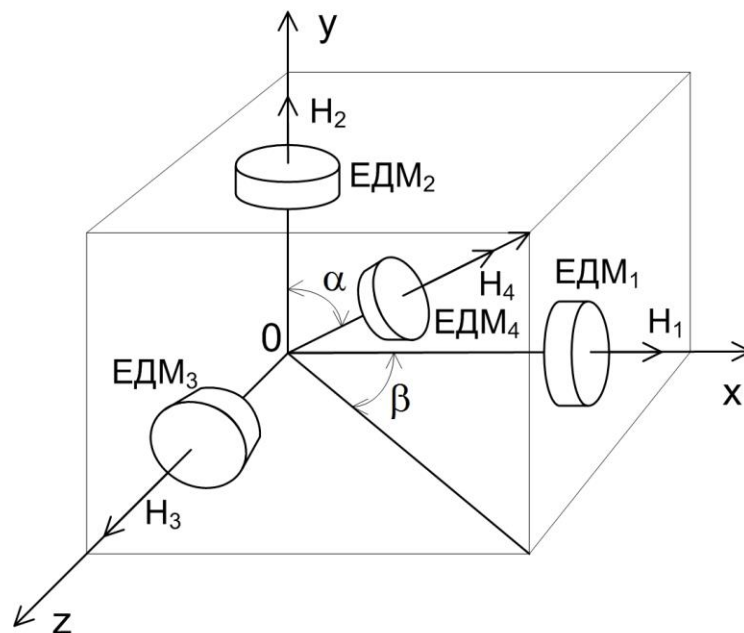


Рисунок 2.5 – Схема установки мінімально-надлишкових ЕДМ

Така схема установки забезпечує незалежне поканальне управління орієнтацією КА при відмові одного будь-якого ЕДМ. Недолік цієї схеми полягає у тому, що при відмові одного з основних ЕДМ ефективність управління у цьому каналі зменшується в 1,73 рази. При відмові резервного ЕДМ₄ та відмові будь-якого з основних ЕДМ_i, $i = \overline{1,3}$ управління орієнтацією стає неможливим.

Вибір числа та раціональної схеми установки ЕДМ залежить від цілого ряду факторів. Перший та основний – це функції та конструкція КА. Знання орбіти і форми КА дозволяє сформувавши зв'язаній системі координат область дії збурюючих моментів. Виходячи з цього, формується область кінетичних моментів ЕДМ, що необхідні для парирування збурюючих моментів. У тактико-технічних вимогах формулюються вимоги щодо вирішення управлінських завдань,

наприклад, таких як гасіння кутових швидкостей на кінцевій ділянці, забезпечення необхідної орієнтації із заданою точністю, кутові маневри КА в задане положення та ряд інших. Ці вимоги дозволяють розширити область парируючих кінетичних моментів до області необхідних кінетичних моментів ЕДМ, що необхідні для вирішення завдань якісної орієнтації конкретного КА. Сформована таким чином область дозволяє перейти до вибору конкретних типів ЕДМ та пошуку схем їх встановлення, що забезпечують виконання тактико-технічних вимог до системи орієнтації КА.

Для ілюстрації розглянемо фрагмент технології формування вимог до ЕДМ [12]. Так, для вирішення задачі гасіння кутової швидкості КА по одному з каналів потрібен управляючий момент ЕДМ:

$$M_y = \frac{\kappa J \Delta\omega}{\Delta t}, \quad (2.13)$$

де κ – коефіцієнт запасу по управляючому моменту;

J – момент інерції КА по каналу;

$\Delta\omega$ – діапазон зміни кутової швидкості під час гасіння;

Δt – інтервал часу гасіння кутової швидкості.

Тоді потрібний кінетичний ЕДМ

$$H = \kappa J \Delta\omega. \quad (2.14)$$

Істотною у виборі ЕДМ буде вимога високої маневреності КА. З рівняння динаміки ЕДМ

$$J\dot{\omega} = M_y \quad (2.15)$$

за умови мінімізації часу розвороту отримаємо:

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{M_y \Delta t^2}{8J}, \quad (2.16)$$

де γ – кут розвороту. Тоді необхідний управляючий момент

$$M_y = \frac{4J\gamma}{\Delta t^2}. \quad (2.17)$$

При цьому необхідна максимальна кутова швидкість

$$\omega = \frac{M_y \Delta t}{J \cdot 2}. \quad (2.18)$$

Аналогічним чином формуються вимоги до ЕДМ і на вирішення інших завдань КА. Потім вибираються максимальні розрахункові значення параметрів і формується область необхідних кінетичних моментів, з якої здійснюється вибір ЕДМ і формування схем їх установки на КА.

У схемі установки мінімально-надлишкових ЕДМ (рис. 2.5) кінетичні моменти H_1 , H_2 та H_3 визначені за умови, що область необхідних кінетичних моментів являє собою паралелепіпед з гранями $2H_1$, $2H_2$ і $2H_3$.

Настановні кути α та β для ЕДМ₄ визначені за умови рівної ефективності дії уздовж осей зв'язаної системи координат. Можливе й інше рішення щодо настановних кутів, якщо виходити із співвідношення однаковості коефіцієнта пропорційності:

$$\frac{H_{4x}}{H_1} = \frac{H_{4y}}{H_2} = \frac{H_{4z}}{H_3}. \quad (2.19)$$

Можливі інші умови, які можуть бути сформовані в тактико-технічних вимогах до системи орієнтації КА, щодо розподілу кінетичного моменту резервного ЕДМ₄. Врахування цих умов дозволить сформулювати відповідні значення настановних кутів α та β .

Схеми установки із трьох ЕДМ (рис. 2.4) використовувались в ряді КА. Так, управління орієнтацією КА «Метеор-М» № 1 (рис. 2.6) здійснювалося трьома ЕДМ ДМ20-250 з осями обертання, паралельними осям пов'язаної системи координат. Це метеорологічний тип КА, запущеного 17 вересня 2009 з космодрому Байконур, розробки ВНДІЕМ імені А. Г. Йосип'яна [15].



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд КА «Метеор-М» № 1

"Метеор-М" № 1 призначений для оперативного отримання інформації для прогнозу погоди, контролю озонового шару та радіаційної обстановки у навколосемному космічному просторі, а також для моніторингу морської поверхні, включаючи льодову обстановку. Маса КА – 2630 кг; середня висота орбіти – 832 км; період обертання – 101 хв;

діаметр корпусу КА – 2,5 м; ширина із розгорнутими сонячними панелями – 14 м [3].

На КА «Купон» (рис. 2.7), запущеному 12 листопада 1997 з космодрому Байконур, у системі орієнтації розробки НВП «Хартрон-Аркос» використовувалися три ЕДМ традиційної схеми установки.

КА "Купон" – малий геостаціонарний супутник зв'язку, призначений для використання в системі "Банкір". Маса КА – 2650 кг; середня висота орбіти – 36000 км; період обертання – 24 години 3 хвилини 49 секунд; точність орієнтації на Полярну зірку не гірша за 7 кут. хв. [15].

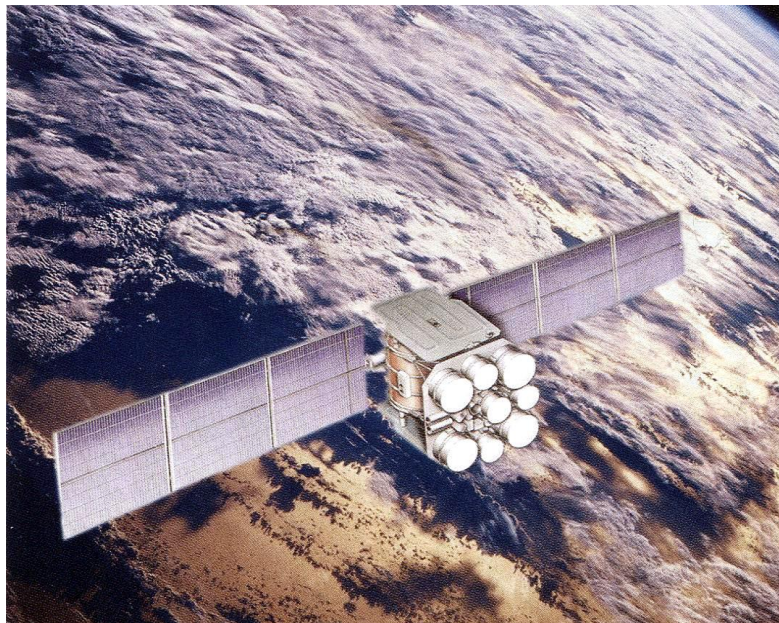


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд КА «Купон»

У перспективній розробці інституту математики ім. М. В. Келдиша супутника для Марса в системі орієнтації використовуються три ЕДМ у традиційній схемі ортогональної установки [16]. У цій розробці не використовується розвантаження маховиків, оскільки за розрахунками кінетичного моменту достатньо для компенсації збурюючих моментів, які можуть виникнути при польоті на орбіті навколо Марса.

EgyptStat-1 – перший єгипетський супутник дистанційного зондування Землі був запущений 17 квітня 2007 з космодрому Байконур за допомогою ракети-носія «Дніпро» на орбіту заввишки 668 км; вага супутника 165 кг. Виробник супутника ДКБ «Південне» (рис. 2.8).

Орбіта супутника з нахилом $97,8^\circ$; в апогеї – 666,9 км, в перигеї – 659,6 км; період обертання – 97,9 хв; розрахунковий період активного функціонування 5 років [17].

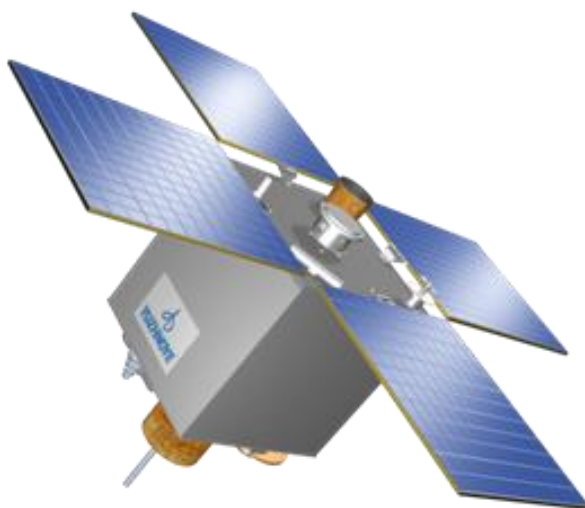


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд супутника EgyptStat-1

Розробка та виготовлення системи орієнтації супутника здійснювалося НВП «Хартрон-Аркос».

На супутнику було використано чотири ЕДМ, три з яких були встановлені по ребрах куба – ортогональна схема, а четвертий – резервний – у каналі тангажу. Фактична тривалість польоту склала 14 років 3 місяці та 20 днів.

Український супутник «МС-2-8» (рис. 2.9) дистанційного зондування Землі з оптико-електронними приладами багатозонального спостереження високої роздільної здатності розробки ДКБ «Південне», масою 135 кг, з висотою орбіти 668 км, з нахилом $98,074^\circ$ [18].

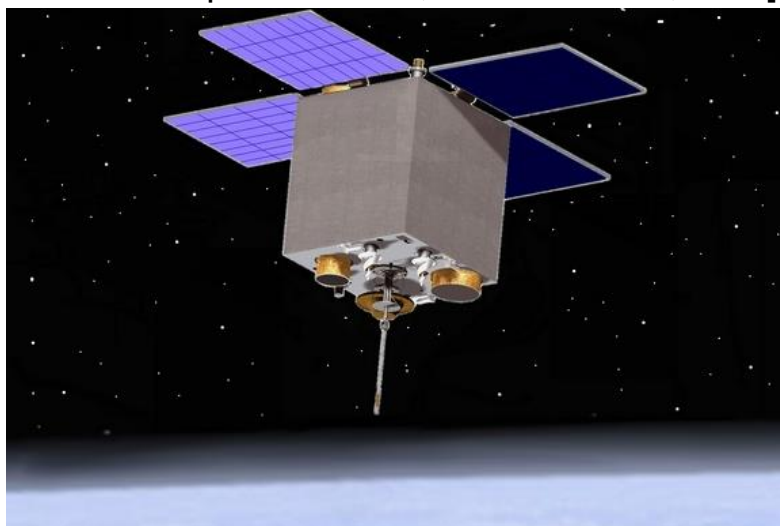


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд супутника «МС-2-8»

У системі орієнтації супутника розробки НВП «Хартрон-Аркос» використано чотири ЕДМ: три за схемою «куб», а четвертий – резервний – у каналі тангажу.

Отже, схема установки ЕДМ з використанням опорного тіла «куб» застосовувалася і застосовується в системах орієнтації малогабаритних КА з відносно невеликим періодом активного функціонування порівняно з тривалими космічними місіями в десятки років.

2.3. Схеми пірамідальної установки

Для здійснення тривалих космічних місій через обмеженість ресурсів ЕДМ необхідно використовувати надлишкові схеми установки. Існуючі обмеження за масово-габаритними, енергетичними та вартісними характеристиками призводять до пошуку мінімально-надлишкових схем установки, що задовольняють як обмеженням, так і тактико-технічним вимогам на розробку КА. Найбільш задовільною схемою установки ЕДМ для тривалих космічних місій, виходячи з відомого досвіду розробки та експлуатації, є пірамідальна схема установки (рис. 2.10).

У цій схемі установки кінетичні моменти $H_i, i = \overline{1,4}$ мають напрямки, що збігаються з ребрами піраміди. На рис. 2.10 представлені напрямки позитивних кінетичних моментів, спрямованих на вершину піраміди.

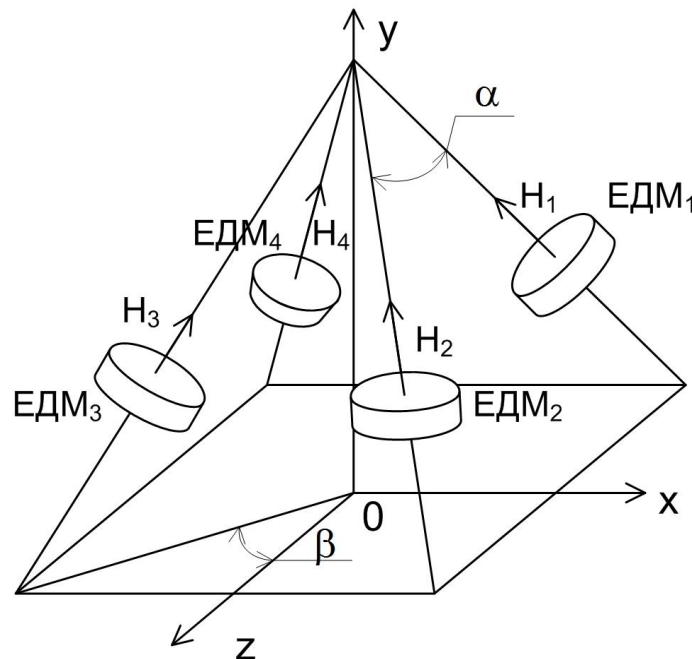


Рисунок 2.10 – Схема установки ЕДМ на ребрах піраміди

Для визначення управляючих моментів, створюваних $ЕДМ_i$ навколо відповідних осей пов'язаної з КА системи координат $Oxyz$, необхідні такі характеристики піраміди, як установчі кути α та β , якщо в основі

піраміди квадрат. Кути α та β вибираються зазвичай з умови рівної ефективності ЕДМ за усіма каналами управління. Тоді

$$\frac{4\dot{H}\sin\alpha\sin\beta}{J_{xx}} = \frac{4\dot{H}\cos\alpha}{J_{yy}} = \frac{4\dot{H}\sin\alpha\cos\beta}{J_{zz}}, \quad (2.19)$$

тут J_{xx} , J_{yy} і J_{zz} – моменти інерції КА щодо відповідних осей пов'язаної системи координат. У результаті перетворення отримуємо, що

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{J_x}{J_z}, \quad (2.20)$$

а

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{J_x}{J_y \sin\beta}. \quad (2.21)$$

Розглянута схема установки є найпростішим варіантом конфігурацій, розроблений фірмою General Electric для забезпечення відмовостійкості.

У схемі на рис. 2.10 як опорне тіло для установки ЕДМ обрана піраміда. На рис. 2.11 представлено перетворення куба на піраміду, слідує І. Кеплеру, якщо з'єднати центр верхньої грані куба з вершинами його основи.

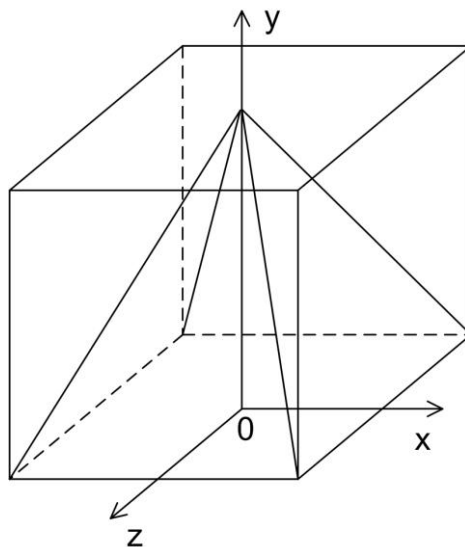


Рисунок 2.11 – Схема перетворення куба на піраміду

Найбільш поширеною та використовуваною на практиці є схема установки фірми General Electric, в якій як опорне тіло обрано паралелепіпед і вектори кінетичних моментів розташовані на ребрах піраміди, що з'єднують центр верхньої грані з вершинами його основи. У такій схемі установки розширюються можливості більш ефективного

перерозподілу сумарного управляючого моменту ЕДМ по осях пов'язаної системи координат КА з урахуванням його тензора інерції і необхідної ефективності управління в каналах орієнтації. На рис. 2.12 представлено схему такої пірамідальної установки ЕДМ.

Паралелепіпед характеризується такими параметрами: a – довжина; b – ширина; c – висота. На схемі ЕДМ $_i$, $i = \overline{1,4}$ представлені відповідними векторами позитивних кінетичних моментів H_i , $i = \overline{1,4}$, прив'язаними до нижніх кутів піраміди і спрямованими вздовж ребер піраміди до її вершини. Віссю симетрії установки ЕДМ $_i$ є вісь Oy пов'язаної системи координат. Слід зазначити, що в якості осі симетрії можна вибрати будь-яку вісь пов'язаної системи координат.

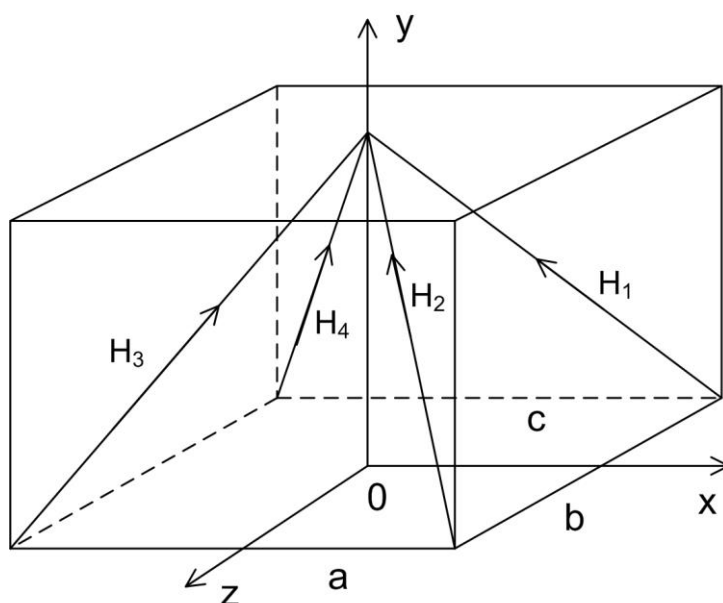


Рисунок 2.12 – Схема установки ЕДМ з використанням паралелепіпеда

Для отримання рівної ефективності ЕДМ $_i$ за трьома каналами управління необхідно, щоб параметри піраміди були пропорційні осьовим моментам інерції КА [19]. Формально:

$$a = \kappa J_{xx}; \quad b = \kappa J_{zz}; \quad c = \kappa J_{yy}, \quad (2.20)$$

тут κ – коефіцієнт пропорційності.

При необхідності управління швидкими рухами КА за різними каналами потрібно враховувати значення модулів кутових прискорень КА: ε_x , ε_y , ε_z . Тоді параметри піраміди визначатимуться з таких співвідношень:

$$a = \kappa J_{xx} |\varepsilon_x|; b = \kappa J_{zz} |\varepsilon_z|; c = \kappa J_{yy} |\varepsilon_y|. \quad (2.21)$$

Для отримання різної ефективності управління за трьома каналами вводяться відповідні коефіцієнти, що дозволяють перерозподілити сумарний момент від чотирьох ЕДМ з урахуванням тактико-технічних вимог конкретної космічної місії.

Фірмою «НВП ВНДІЕМ» розроблено цілу низку маховичних систем орієнтації пірамідальних структур, які використовувалися в КА «Метеор», «Ресурс» та «Електро». На рис. 2.13 представлено систему з чотирьох ЕДМ пірамідальної установки [3].



Рисунок 2.13 – Система пірамідальної установки ЕДМ

У цій системі ЕДМ встановлені на підставці, що є усіченою чотирикутною пірамідою. Два ЕДМ розташовані зовні, два інших усередині підставки. Осі обертання ЕДМ перпендикулярні бічним граням піраміди. Конструкція підставки забезпечує точні посадкові кути ЕДМ. Праворуч від підставки – периферійний адаптер для підключення маховичної системи до обчислювальної мережі КА.

На КА «Монітор-Е» система управління розробки фірми МОКБ «Марс», використовувалися в системі орієнтації чотири ЕДМ за схемою «піраміда» з віссю симетрії уздовж осі Oz пов'язаної системи координат та з установчими кутами $\alpha = 60^\circ$ і $\beta = 45^\circ$ [3] (рис. 2.14).

Зв'язок проєкцій вектору кінетичних моментів «піраміди» з вектором кінетичних моментів ЕДМ $H_i, i = \overline{1,4}$ описується таким векторно-матричним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

де A – матриця косинусів установчих кутів;

a_{ij} – елементи матриці;

H_x , H_y і H_z – проекції сумарного вектору кінетичних моментів на осі пов'язаної системи координат.

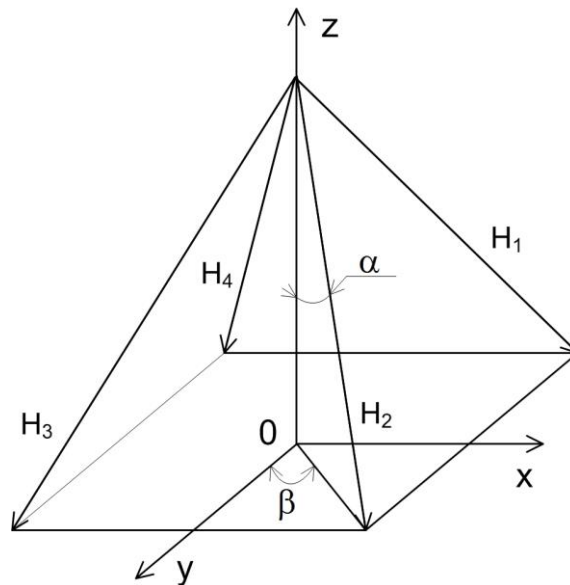


Рисунок 2.14 – Схема орієнтації векторів кінетичних моментів ЕДМ

Для установчих кутів $\alpha = 60^\circ$ і $\beta = 45^\circ$ матриця A має вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 0,6124 & 0,6124 & -0,6124 & -0,6124 \\ -0,6124 & 0,6124 & 0,6124 & -0,6124 \\ -0,5 & -0,5 & -0,5 & -0,5 \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Для геостационарних КА зв'язку та КА дистанційного зондування Землі на фірмі прийняті такі основні характеристики ЕДМ:

- 1) максимальний кінетичний момент $\pm 18 \text{ Нмс} + 10\%$;
- 2) максимальний управляючий момент $\pm 2 \text{ Нм}$;
- 3) ціна молодшого розряду $0,001 \text{ Нм}$;
- 4) частота зміни управляючого коду не більше 10 Гц ;
- 5) стала часу – не більше $0,1 \text{ с}$.

КА «Монітор-Е» було запущено 26 серпня 2005 року з космодрому Плесецьк за допомогою ракети-носія Рокот та виведено на сонячно-

синхронну орбіту заввишки 550 км. Маса КА – 750 кг, маса корисного навантаження – 210 кг (рис. 2.15).

«Монітор-Е» – експериментальний супутник, призначений для інформаційного забезпечення вирішення задач природокористування, картографування територій, контролю забруднення навколишнього середовища та надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру. Головним розробником був ЦК НВЦ імені М. В. Хрунічева [20].



Рисунок 2.15 – Загальний вигляд КА «Монітор-Е»

Аналогічна пірамідальна установка ЕДМ використовувалася фірмою МОКБ "Марс" у системах орієнтації КА "КазСат", "Експрес-МД1", "Електро-Л", "Спектр-Р" [3].

У перспективній розробці українського КА дистанційного зондування Землі «Січ-перспектива» у системі орієнтації НВП «Хартрон-Аркус» використало чотири ЕДМ за схемою «піраміда».

Як свідчить практика використання ЕДМ у схемі «піраміда», що така мінімально-надлишкова структура є найбільш ефективною для довгострокових космічних місій КА різного призначення.

2.4. Перспективні схеми установки

При будь-якому числі ЕДМ і різних схемах їх установки на КА в результаті зміни всіх векторів кінетичних моментів $H_i, i = \overline{1, n}$, $-H_i^* \leq H_i \leq H_i^*$ у тривимірному просторі пов'язаної системи координат Охуз утворюється область S , що являє собою геометричне місце можливих положень сумарного вектору

$$H = \sum_{i=1}^n H_i. \quad (2.24)$$

Вочевидь, що форма області S залежить від векторів кінетичної енергії H_i , та її розміри пропорційні сумарному кінетичному моменту H [3]. Так, для трьох ЕДМ, встановлених на гранях куба (рис. 2.3), область S буде у формі куба (рис. 2.16).

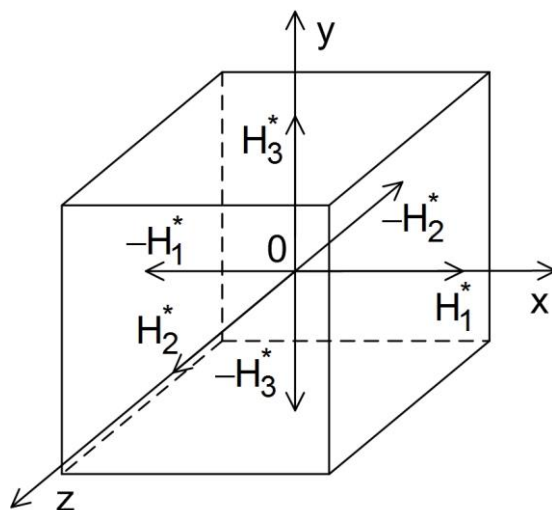


Рисунок 2.16 – Область змін кінетичного моменту H для ортогональної схеми

При рівності моментів $H_1 = H_2 = H_3 = H_0$ грані куба будуть довжиною $2H_0$.

Форма та розміри необхідної області $S_{\text{тр}}$ змін кінетичного моменту в загальному випадку залежать від конструкції КА, збурюючих впливів і визначаються тактико-технічними вимогами до динаміки орієнтації та стабілізації. Таким чином, вибір схеми установки та максимальних кінетичних моментів ЕДМ має задовольняти умові $S_{\text{тр}} \subset S$ [3].

Область S мінімально-надлишкової пірамідальної схеми установки ЕДМ є ромбододекаедр – 12-гранник, що має 14 вершин, 24 ребра. Його гранями є ромби із довжиною сторін $2H_0$ (рис. 2.17).

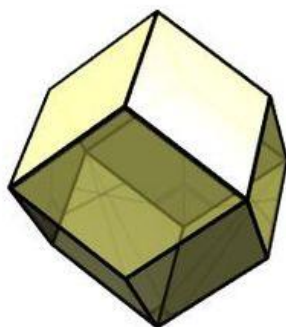


Рисунок 2.17 – Область змін вектору кінетичного моменту H для пірамідальної схеми

Перетин області S координатними площинами є квадрати з довжиною сторін $4\sqrt{\frac{2}{3}}H_0$, при цьому вершини квадратів розташовані на осях координат.

Радіус описаної сфери становить $R = \frac{4\sqrt{3}}{3}H_0 \approx 2,31H_0$, а радіус вписаної сфери дорівнює $r = 2\sqrt{\frac{2}{3}}H_0 \approx 1,63H_0$.

Поверхня області S характеризує стан насичення ЕДМ. Грані області утворюються при насиченні двох, ребра – трьох, а вершини – чотирьох ЕДМ.

Об'єм $V = \frac{64}{3}(H_0)^3$ області S складається із об'ємів 12 правильних пірамід з загальною вершиною O . Область S у формі ромбододекаедра має максимальний об'єм серед усіх областей S , що відповідають довільним схемам чотирьох ЕДМ на КА.

Область S з п'яти однакових ЕДМ є опуклим 20-гранником. Його гранями будуть ромби з кутами при вершинах $\gamma_1 \approx 57,36^\circ$ і $\gamma_2 \approx 101,9^\circ$. Об'єм області складається із об'ємів 10-ти пірамід $V \approx 57,86H_0^3$, а радіуси описаної та вписаної сфер складають $R \approx 2,89H_0$, $r \approx 2,17H_0$.

Область S із шести однакових ЕДМ є опуклим 30-гранником. Його гранями будуть ромби з кутами при вершинах $\gamma_1 \approx 48,2^\circ$, $\gamma_2 \approx 90^\circ$ і $\gamma_3 \approx 109,5^\circ$. Об'єм багатогранника $V = 96H_0^3$, радіуси описаної і вписаної сфер будуть $R \approx 3,46H_0$, $r \approx 2,67H_0$.

При відмовах одного, двох або трьох ЕДМ область S вироджується відповідно в 20-гранник, 12-гранник і паралелепіпед.

Порівняємо області S для двох традиційних схем установки ЕДМ. Область S_3 для схеми трьох однакових ЕДМ ортогональної структури має форму куба з довжиною $2H_0$ (рис. 2.16). Радіус описаної сфери $R = \sqrt{3}H_0 = 1,73H_0$, а вписаної $r = H_0$. Мінімальний розмір області S_4 мінімально-надлишкової пірамідальної схеми установки ЕДМ в 1,63 рази більший за мінімальний розмір області S_3 . По об'єму $S_4 = 2,67S_3$.

Для характеристики ефективності електромаховичних виконавчих органів було запропоновано коефіцієнт використання спрямованого

сумарного кінетичного моменту у довільному напрямку, заданому h -одичним вектором [21]:

$$\chi_h = \frac{H_h}{H}, \quad (2.25)$$

де H_h – максимальний сумарний кінетичний момент, створюваний ЕДМ у напрямку h ; H – сумарний кінетичний момент всіх ЕДМ, які використані у схемі установки. Якщо напрямок h довільний, то можемо ввести коефіцієнти [3]:

$$\chi_{\min} = \frac{H_{\min}}{H}, \quad \chi_{\max} = \frac{H_{\max}}{H}. \quad (2.26)$$

Так, для трьох ЕДМ у схемі ортогональної установки

$$\chi_{\min} = \frac{H_0}{3H_0} \approx 0,33, \quad \chi_{\max} = \sqrt{3} \frac{H_0}{3H_0} \approx 0,58. \quad (2.27)$$

Для чотирьох ЕДМ у пірамідальній схемі установки

$$\chi_{\min} = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{H_0}{4H_0} \approx 0,41, \quad \chi_{\max} = \frac{4\sqrt{3}}{3} \frac{H_0}{4H_0} \approx 0,58. \quad (2.28)$$

Для характеристики несферичності області S використовується співвідношення радіусів $\frac{(R-r)}{r}$. Для S_3 ця величина становить 0,73, а для S_4 – 0,41.

Розглянемо схему установки із шести ЕДМ. На рис. 2.18 представлено схему розташування позитивних векторів кінетичних моментів шести ЕДМ у пов'язаній системі координат $Oxyz$.

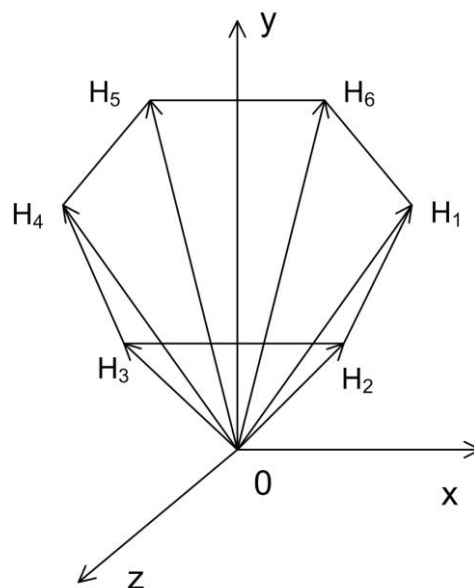


Рисунок 2.18 – Схема розташування векторів кінетичних моментів шести ЕДМ

Як опорне тіло в цій схемі використана шестигранна піраміда. ЕДМ розміщені по ребрам цієї піраміди. Вибором кута при вершині піраміди можна варіювати областю S_6 зміни сумарного кінетичного моменту H , задовольняючи тактико-технічні вимоги до КА [3].

Наприклад, якщо потрібні програмні повороти КА навколо однієї з осей, то зменшуючи кут при вершині піраміди, можна витягнути область зміни H вздовж цієї осі. На зображенні вісь симетрії конуса збігається з віссю Oy – віссю програмного повороту. На рис. 2.19 представлена конструктивна схема розміщення шести ЕДМ на вимірювальній платформі [3].



Рисунок 2.19 – Схема установки шести ЕДМ

У цій схемі ЕДМ розташовані на двох підставках, оскільки на КА ЕДМ можуть встановлюватись у різних місцях при виконанні умови установочних кутів. Вимірювальна платформа була призначена для вимірювання управляючих моментів, створюваних ЕДМ щодо трьох взаємно перпендикулярних осей.

Розглянемо можливі схеми установки ЕДМ із використанням позитивних напрямів векторів кінетичних моментів H_i . Ці схеми установки не досліджені як у теоретичному, так і у прикладному планах. Такі дослідження необхідні для виявлення функціональних можливостей схем, отримання їх кількісних характеристик, формування порівняльного аналізу з відомими схемами і визначення завдань їх практичного використання.

Принциповим недоліком схеми встановлення мінімально-надлишкових чотирьох ЕДМ (рис. 2.5) є вразливість до несправностей ЕДМ₄. Для усунення цього недоліку можливе використання ще одного ЕДМ₅, розміщеного по внутрішній діагоналі куба. Схема розташування

позитивних векторів кінетичних моментів п'яти ЕДМ представлена на рис. 2.20.

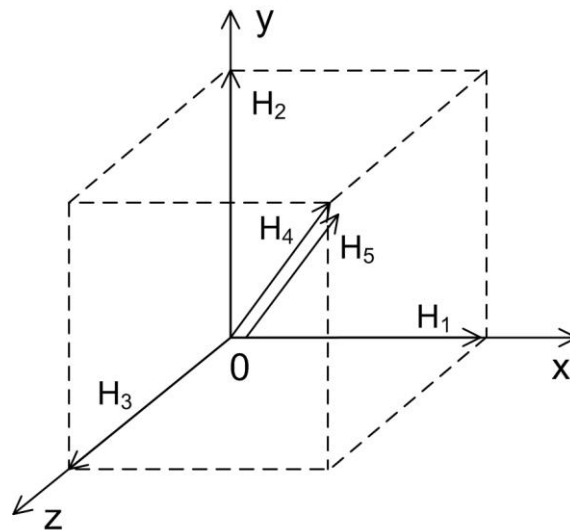


Рисунок 2.20 – Схема розташування п'яти векторів кінетичних моментів

У такій схемі розташування відмова будь-якого ЕДМ не призводить до порушення працездатності електромаховичного виконавчого органу. Більше того, навіть при одночасному відмові двох ЕДМ_i можливо буде зберегти працездатність системи орієнтації КА при оперативному діагностуванні та гнучкому відновленні працездатності.

Прагнення до зменшення надмірності ЕДМ_i та забезпечення необхідного рівня відмовостійкості електромаховичного виконавчого органу за рахунок алгоритмічних та програмних засобів бортових цифрових обчислювачів призводять до схеми встановлення з використанням як опорного тіла тетраедра та його граней (рис. 2.21).

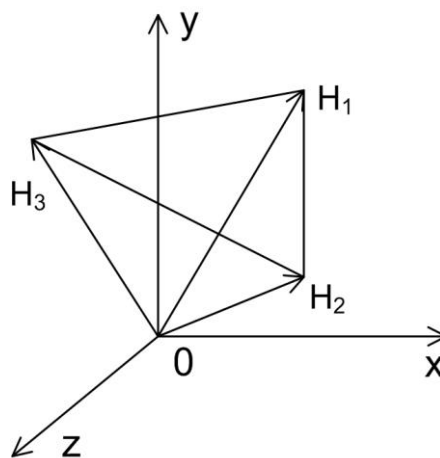


Рисунок 2.21 – Схема розташування трьох векторів кінетичних моментів

Вочевидь, що у цій схемі вектори $H_i, i = \overline{1,3}$ неколінарні осям пов'язаної системи координат $Oxyz$ і тому кожен вектор дає свої проєкції на осі. Привабливість цієї схеми у мінімально можливій кількості ЕДМ, але при цьому неминуче ускладнення процедури управління орієнтацією КА, а особливо при відмові одного з ЕДМ.

Для підвищення рівня стійкості до відхилення електромаховичного виконавчого органу для виконання тривалих місій КА можна ускладнити схеми установки ЕДМ з використанням двох опорних тіл: куба і тетраедра. На рис. 2.22 представлена така схема розташування шести векторів кінетичних моментів.

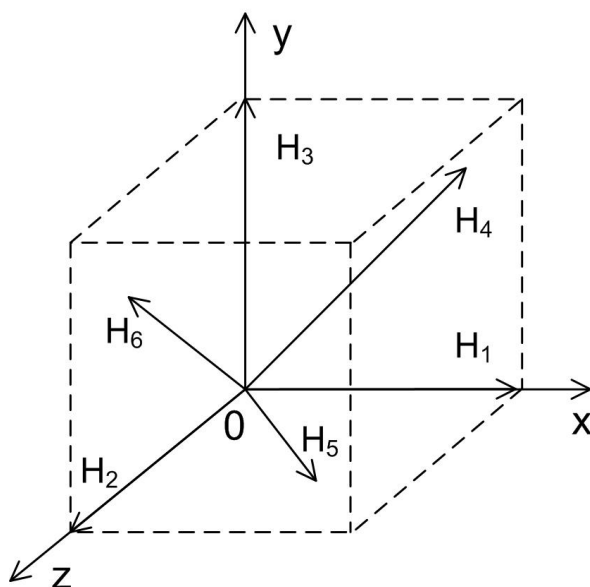


Рисунок 2.22 – Схема розташування шести векторів кінетичних моментів

У цій схемі вектори H_1, H_2 і H_3 розташовані по ребрах куба і збігаються з напрямком осей системи координат $Oxyz$, а надлишкові вектори H_4, H_5 і H_6 розташовані по діагоналях граней куба і дають відповідні проєкції тільки на дві осі системи координат.

Збільшити кількість надлишкових проєкцій векторів H_4, H_5 і H_6 можна, зменшивши кути при вершині тетраедра, розмістивши їх навколо головної діагоналі куба. Тоді кожен надлишковий вектор даватиме проєкції на кожен вісь зв'язаної системи координат (рис. 2.23).

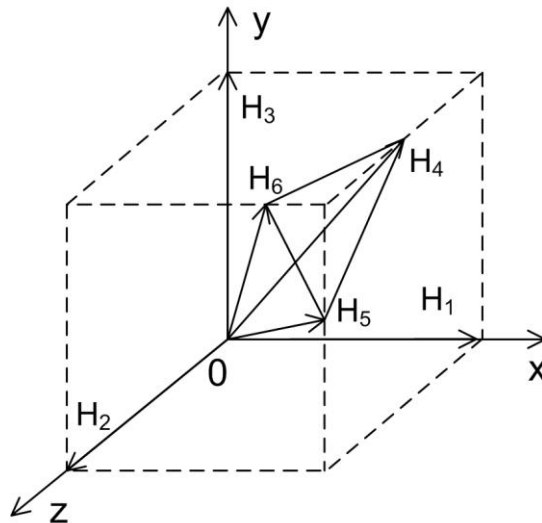


Рисунок 2.23 – Схема розташування векторів H_4 , H_5 і H_6 навколо головної діагоналі куба

У цій схемі кожен надлишковий вектор дає три проекції на осі пов'язаної системи координат $Oxyz$, що підвищує надмірність, а відповідно і рівень відмовостійкості схеми. Рівняння для вектору кінетичного моменту, створюваного ЕДМ₄, ЕДМ₅ та ЕДМ₆ можна подати у векторно-матричній формі:

$$H_p = DH', \quad (2.29)$$

тут $H_p = [H_{px}, H_{py}, H_{pz}]$ – вектор сумарного резервного кінетичного моменту в проекціях на осі пов'язаної системи координат $Oxyz$;

D – матриця направляючих косинусів;

$H' = [H_4, H_5, H_6]$ – вектор кінетичних моментів ЕДМ _{i} , $i = \overline{4,6}$. Матриця

D – $\dim 3 \times 3$ буде наступної структури:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

де d_{ij} – значення направляючих косинусів.

Для схеми (рис. 2.23) матриця D буде такою:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & 0 & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}.$$

Матриця D насправді – це матриця сумарного надлишкового вектору кінетичного моменту, створюваного додатково до основного вектору кінетичного моменту електромаховичного виконавчого органу КА.

Бажання зменшити масо-габаритні, енергетичні та вартісні характеристики електромаховичних виконавчих органів призвело до розробки кільцевого ЕДМ [3]. На рис. 2.24 подано макетний зразок такого ЕДМ.



Рисунок 2.24 – Макетний зразок кільцевого ЕДМ

У цій конструкції металеве кільце, що є маховиком, обертається за допомогою приводного електродвигуна по напрямних роликах. Такий ЕДМ використовувався в орбітальних космічних станціях «Салют» та «Алмаз». Кільцевий ЕДМ із загальною масою 140 кг розвиває управляючі моменти до 200 Нм та кінетичний момент до 1000 Нмс при частоті обертання до 80 об/хв.

Більш перспективним є кульовий ЕДМ (рис. 2.25).

Ротор-маховик конструктивно виконаний у формі порожнистої сталевий кулі, що утримується всередині корпусу за допомогою шести електромагнітів. За принципом дії кульовий ЕДМ відповідає асинхронного електродвигуна. Сферичний ротор обертають шість дугових статорів, розміщених у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Мідне покриття сферичного шару виконує функцію обмотки ротора. За допомогою взаємодії магнітного поля статорів зі струмами в

роторі виникає електромагнітний момент, що приводить його в обертання навколо будь-якої осі, що проходить через центр мас.



Рисунок 2.25 – Кульовий ЕДМ

Вимірювання швидкостей та напрямки обертання проводиться тахогенераторами. Один кульовий ЕДМ замінює три одновісні ЕДМ. При однакових моментах інерції та діаметрах сферичний ЕДМ удвічі легший за три кільцеві ЕДМ. Кульовий ЕДМ з діаметром ротора 0,64 м та загальною масою 230 кг використовувався для триосної стабілізації та повільних поворотів космічних орбітальних станцій «Салют» та «Діамант». Кульовий ЕДМ розвиває управляючий момент до 3 Нм і кінетичний момент до 200 Нмс.

«Салют», так називалася серія пілотованих радянських орбітальних наукових станцій, що є важкими штучними супутниками Землі тривалого часу функціонування (рис. 2.26).

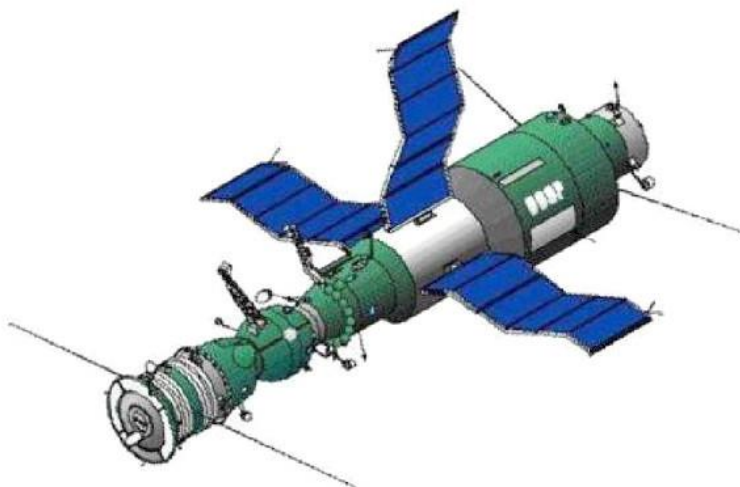


Рисунок 2.26 – Загальний вигляд станції "Салют-4" із пристикованим кораблем "Союз"

Наприклад, станція «Салют-4» була виведена на орбіту 26 грудня 1984 року й функціонувала протягом 770 діб. Маса станції 18 500 кг, період обігу навколо Землі 89,1 хв..

«Алмаз» – це серія радянських розвідувальних станцій (рис. 2.27).



Рисунок 2.27 – Загальний вигляд станції «Алмаз»

Усього було запущено сім станцій під різними назвами. Станція розроблялася на ОКБ-52 під керівництвом Володимира Челомея.

Станція «Алмаз» мала такі показники. Максимальна довжина – 14,6 м, найбільший діаметр – 4,2 м. Простір помешкання досягав 100 м^3 . Повна маса станції 17,8 т, корисне навантаження – 5 т. Електропостачання станції здійснювалося за допомогою сонячних батарей площею 52 м^2 , що забезпечили потужність 3,12 кВт.

Пошук нових ефективних ЕДМ та схем їх установки продовжуються у напрямку вдосконалення не тільки конструкцій, а й розробки продуктивного алгоритмічного та програмного забезпечення процесів управління такими електромеханічними приводами для завдань орієнтації та стабілізації КА тривалого функціонування у різних космічних місіях.

Розділ III. ЕЛЕКТРОДВИГУН-МАХОВИК ЯК ОБ'ЄКТ РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

Незважаючи на очевидну невідповідність думки про «норовливість» неживих предметів, ми змушені констатувати, що різноманітні пристрої, процеси та явища мають тенденцію відхилятися від наміченого для них способу дії.

Р. Беллман (1920–1984) – американський математик, «батько динамічного програмування».

Функціонування електродвигуна-маховика у складі виконавчого органу системи орієнтації у тривалому космічному польоті схильне до дії цілого ряду дестабілізуючих факторів. Що це за фактори? Як вони впливають на працездатність виконавчого органу? Раціональне управління дозволяє забезпечити працездатність за умов дестабілізації.

3.1. Основні положення раціонального управління

Електромеханічний виконавчий орган – це система автоматичного управління, що складається з об'єкта автоматичного управління та пристрою автоматичного управління. Для кожного ЕДМ у виконавчому органі об'єкт автоматичного управління складається з послідовного з'єднання підсилювача потужності (ПП), ЕДМ та тахогенератора (ТГ) (рис. 3.1).

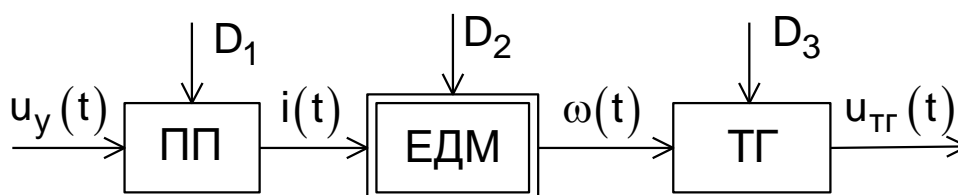


Рисунок 3.1 – Функціональна схема об'єкта автоматичного управління

Тут $u_y(t)$ – управляюча напруга; $i(t)$ – струм; $\omega(t)$ – кутова швидкість; $u_{ТГ}(t)$ – напруга тахогенератора.

На функціональні елементи діють дестабілізуючі впливи $D_i, i = \overline{1,3}$. Дестабілізуючі впливи – це дії, що порушують працездатність функціональних елементів та об'єкта автоматичного управління в цілому.

Під працездатністю функціонального елемента, об'єкта, підсистеми та системи розумітимемо такий їх стан, при якому значення усіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідає тактико-технічним вимогам.

Дестабілізуючими впливами в космічному польоті можуть бути різні перешкоди, шуми, збурюючі впливи, несправності, збої та відмови, які призводять до порушення працездатності.

Традиційно побудова системи автоматичного управління кутової швидкості ЕДМ виходить з використання принципу управління за відхиленням. Замкнута система автоматичного управління дозволяє зберігати працездатність при ряді перешкод, шумів і збурюючих впливах, а при несправностях, збоях і відмовах входить у позаштатний режим. Для таких нештатних режимів об'єкт автоматичного управління доповнюють резервними функціональними елементами та засобами реконфігурації, що забезпечують відключення елемента, що відмовив, і підключення резервного. Таким чином забезпечується парировання дестабілізуючих впливів та збереження працездатності. Як правило, виявлення функціонального елемента, що відмовив, проводиться за допомогою процедури допускового контролю. При виході за межу допуску контрольованого параметра функціонального елемента проводиться його відключення і підключення справного, резервного. У процедурі допускового контролю неможливо виявити причину виходу за межу допуску, тобто дестабілізуючий вплив, що спричинив позаштатну ситуацію, відмову функціонального елемента. Інакше кажучи, немає глибокого діагностування причин непрацездатного стану функціонального елемента. Неглибоке діагностування призводить до того, що відновлення працездатності проводиться з використанням кардинальних засобів – заміною резервним. Такий підхід до забезпечення працездатності систем автоматичного управління виявляється надто витратним та не високоефективним. Найбільш продуктивним є адаптивний підхід, що базується на раціональному управлінні працездатністю об'єктів автоматичного управління [22].

Розглянемо основні положення, на яких базується раціональне управління стосовно електромеханічного виконавчого органу:

- 1) раціональна система управління (PCY) складається з двох підсистем: об'єкта раціонального управління (OPY) та пристрою раціонального управління (ПРУ);

2) ОРУ, крім основних функціональних елементів (рис. 3.1) містить резервні підсилювач потужності (ПП_р) та тахогенератор (ТГ_р), і нові зв'язки (рис. 3.2).

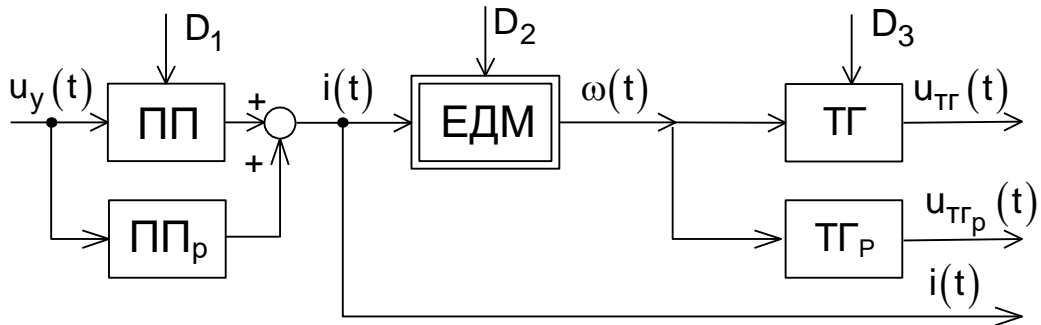


Рисунок 3.2 – Функціональна схема об'єкта раціонального управління

3) ПРУ містить функціональні елементи, що реалізують процедури управління (ПУ) за відхиленням, процедури діагностування (ПД) та процедури відновлення (ПВ) працездатності (рис. 3.3).

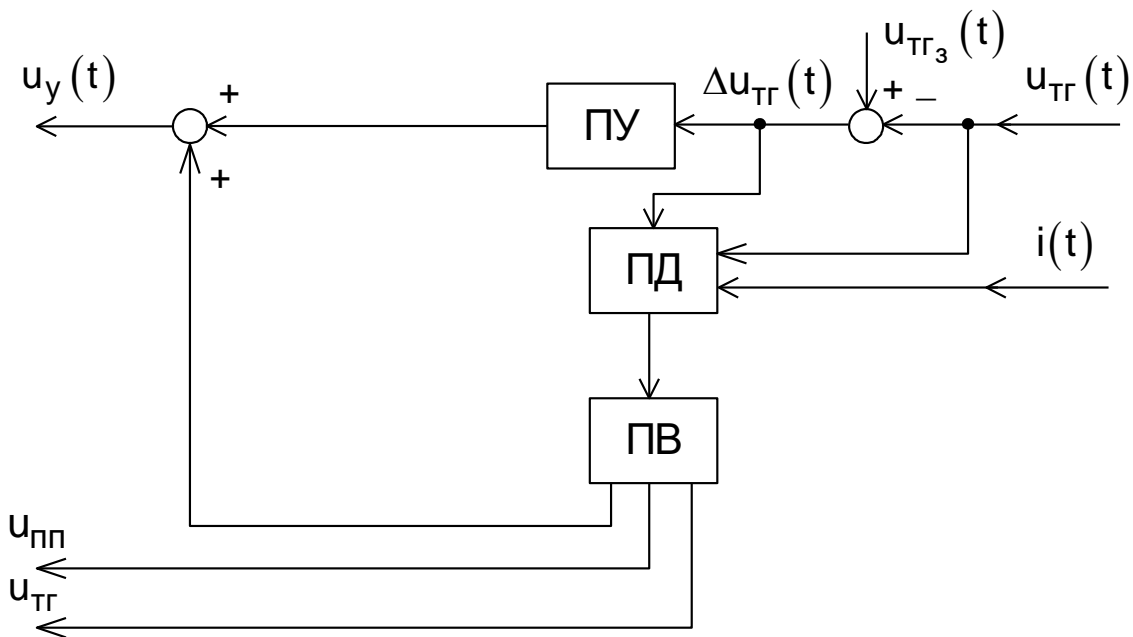


Рисунок 3.3 – Функціональна схема пристрою раціонального управління

Усі процедури оптимального управління реалізуються на мікропроцесорній апаратурі. Вихідні сигнали $u_{\text{ПП}}$ та $u_{\text{ТГ}}$ – це сигнали на відключення основних функціональних елементів ОРУ та підключення резервних. Сигнал $\Delta u_{\text{ТГ}}(t)$ – це сигнал відхилення $\Delta u_{\text{ТГ}}(t) = u_{\text{ТГ}}(t) - u_{\text{ТГ3}}(t)$, $u_{\text{ТГ3}}(t)$ – задана функція зміни напруги ТГ;

4) передбачається, що ПРУ має великий рівень надійності, відмовостійкості і живучості порівняно з ОРУ;

5) дестабілізуючі впливи D_1, D_2 і D_3 є невизначеними подіями та породжують в ОРУ безліч його дестабілізованих станів, що не відповідають працездатному;

6) виявлення причин дестабілізованих станів ОРУ здійснюється за допомогою процедур діагностування, що дозволяють виявити появу дестабілізацій, знайти функціональний елемент, в якому з'явився дестабілізуючий вплив, потім встановити тип дестабілізуючого впливу та визначити його величину. Іншими словами, отримати повний діагноз;

7) за результатами повного діагнозу здійснюється вибір засобів відновлення з наявної бази та компенсація або усунення причини, що викликала дестабілізацію в ОРУ, так, щоб відновити працездатність за регламентований час та з необхідною точністю.

Отже, для формування процедур раціонального управління потрібно знання про номінальний режим функціонування ОРУ. Ці знання у формі математичних моделей отримують в результаті обробки натурних експериментів. Традиційно математична модель, що описує зв'язок вихідного сигналу $u_{\text{ТР}}(t)$ з вхідним $u_y(t)$, представляється у формі передавальної функції наступного виду:

$$W(s) = \frac{U_{\text{ТР}}(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{Ts + 1}, \quad (3.1)$$

де k – коефіцієнт передачі ОРУ; T – постійна часу.

У передавальній функції параметри представлені точковими значеннями. У разі експлуатації значення параметрів варіюється з різних як зовнішніх, так і внутрішніх причин. Область варіації можна показати у декартовій площині цих параметрів (рис. 3.4).

Варіація параметрів відбувається щодо номінальних значень параметрів k та T і в межах верхніх та нижніх значень параметрів. В результаті, область можливих значень параметрів виходить у формі прямокутника ABCD.

Область можливих значень ABCD можна зменшити за допомогою принципу управління за відхиленням. Так, якщо ПУ задано коефіцієнтом – k_{33} , то передавальна функція замкнутої системи управління кутовою швидкістю ЕДМ буде наступною:

$$\Phi(s) = \frac{U_{\text{ТР}}(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{Ts + 1 + k k_{33}}. \quad (3.2)$$

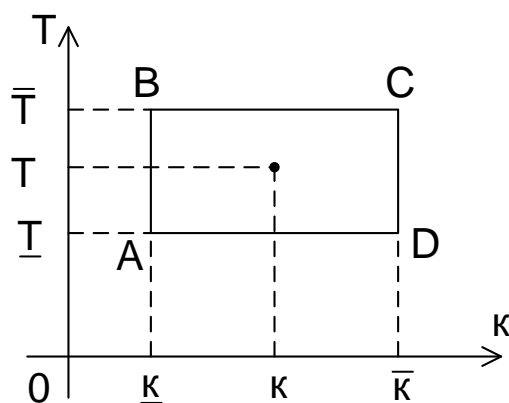


Рисунок 3.4 – Область варіації параметрів k та T

Перетворимо передавальну функцію замкнутої системи до структури, ідентичної передавальній функції розімкнутої системи (3.1). Тоді отримаємо:

$$\Phi(s) = \frac{U_{TF}(s)}{U_y(s)} = \frac{\frac{k}{1 + kK_{33}}}{\frac{T}{1 + kK_{33}}s + 1} = \frac{k_1}{T_1s + 1}. \quad (3.3)$$

Аналізуючи нові параметри замкнутої системи управління, дійшли висновку, що вони пропорційно зменшилися на величину $\frac{1}{1 + kK_{33}}$. Отже, область можливих значень параметрів замкнутої системи буде меншою за область ABCD розімкнутої системи. Таким чином, використання принципу управління за відхиленням дозволяє зменшити вихідну варіацію параметрів та суттєво покращити показники працездатності електромеханічного виконавчого органу. На рис. 3.5. представлена ця нова область $A_1B_1C_1D_1$ в системі координат O_kT_1 .

Дестабілізуючі впливи, що являють собою несправності, поломки, деградацію, збої, загалом, відмови в об'єкті автоматичного управління призводять до істотної зміни k_1 та T_1 , і, отже, до появи нової області зміни параметрів $A_2B_2C_2D_2$ (рис. 3.5).

У термінах цих областей завдання раціонального управління: виявити момент появи відхилення параметрів k_1 і T_1 , виявити функціональний елемент об'єкта автоматичного управління де відбулася відмова, далі його ідентифікувати, а потім парировати відмову так, щоб з області $A_2B_2C_2D_2$ перейти в область працездатності $A_1B_1C_1D_1$, тобто відновити працездатність.

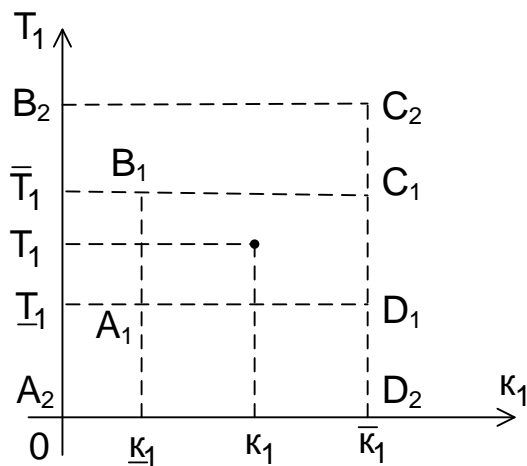


Рисунок 3.5 – Область варіації параметрів k_1 та T_1

Область працездатності електромеханічного виконавчого органу можна формувати і у просторі показників якості, що логічніше. У тактико-технічних вимогах до електромеханічних виконавчих органів, як правило, містяться обмеження щодо точності, часу перехідного процесу та перерегулювання. У цих термінах можна сформувавши області варіації показників якості. Ці області будуть паралелепіпедами. Завдання раціонального управління залишається таким самим, як і раніше описане.

Розглянемо докладніше, у чому відмінність об'єктів автоматичного та раціонального управління? Об'єкт автоматичного управління відображає перетворювальні властивості у номінальному режимі. Іншими словами, перетворення вхідних управляючого та збурювального впливів у вихідний стан при справному стані об'єкта. Об'єкт раціонального управління відображає перетворювальні властивості як у штатному, так і у позаштатних режимах функціонування. Нештатні режими функціонування викликані дестабілізуючими впливами, що змінюють як технічний, так і функціональний стан об'єкта. Об'єкт раціонального управління (рис. 3.2) відрізняється від об'єкта автоматичного управління (рис. 3.1) структурою. Ця відмінність обумовлена необхідністю забезпечення можливості визначення працездатності та досягається запровадженням додаткових функціональних елементів, зв'язків та режимів тестового функціонування.

У традиційних системах автоматичного управління ЕДМ використовується принцип управління за відхиленням. У системах раціонального управління застосовується новий принцип управління – за

діагнозом. Використання цього принципу дозволяє розширити функціональні можливості традиційних систем управління до ефективного управління працездатністю у позаштатних ситуаціях. Така нова властивість раціональних систем управління ЕДМ може дозволити суттєво збільшити тривалість активного якісного функціонування за менших апаратних, енергетичних та вартісних витрат, що є актуальним для довготривалих космічних місій. Крім того, раціональні системи управління при наземному відпрацюванні дозволять скоротити терміни налагодження та витрати на обслуговування, оскільки усе це буде проходити в автоматизованому режимі.

3.2. Формування функціональної схеми раціонального управління електродвигуном-маховиком

Для організації класичного автоматичного управління ЕДМ одним каналом будь-якої схеми установки формується об'єкт автоматичного управління, що включає послідовно з'єднані такі функціональні елементи: підсилувач потужності, ЕДМ і тахогенератор (рис. 3.6).

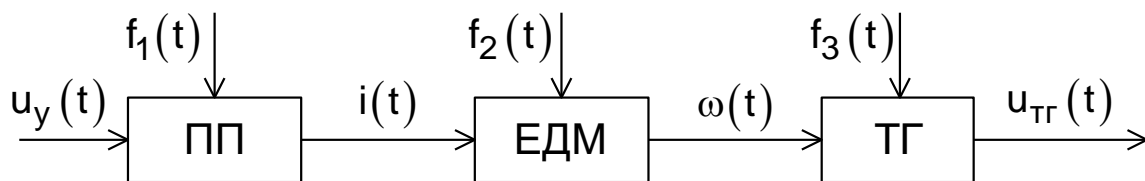


Рисунок 3.6 – Функціональна схема об'єкта автоматичного управління

Тут $f_1(t)$, $f_2(t)$ и $f_3(t)$ – неконтрольовані збурюючі впливи на відповідні функціональні елементи.

Об'єкт раціонального управління істотно відрізняється від об'єкта автоматичного управління як складом функціональних елементів, так і зв'язками цих елементів. Основна причина відмінності полягає в розширенні безлічі неконтрольованих впливів за рахунок включення в нього, крім збурюючих впливів, також потенційних несправностей, поломок, збоїв і відмов функціональних елементів. Таким чином, формується безліч дестабілізуючих впливів для кожного функціонального елемента. Для ПП – це D_1 , для ЕДМ – D_2 та для ТГ – D_3 . Далі, в результаті процедур глибокого діагностування виявляються дестабілізуючі впливи $\hat{d}_{ij} \in D_i$, $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,m}$, що порушили

працездатність об'єкта автоматичного управління. Після отримання повного діагнозу виробляється відновлення працездатності функціональних елементів. Відновлення працездатності функціональних елементів проводиться з використанням додаткових надлишкових засобів.

Як додаткові надлишкові засоби використовуються сигнальне і параметричне підстроювання, додаткові алгоритми і додаткова резервна апаратура. Такі додаткові надлишкові засоби як сигнальне та параметричне підстроювання, додаткові алгоритми є програмними модулями і реалізуються в ПРУ. Резервна апаратура – це додаткові елементи для об'єкта автоматичного управління, що використовуються при виході з експлуатації основних. Так, при повній відмові ПП можна використовувати додатковий резервний ПП_р, який візьме на себе функції основного, при непрацюючому ТГ його можна замінити на резервний ТГ_р.

Задля більшої можливості за результатами доступних вимірів отримати достовірні оцінки дестабілізуючих впливів \hat{d}_{ij} , тобто повний діагноз, потрібні додаткові сигнали з об'єкта автоматичного управління та модифікація його структури. Таким чином, у загальному випадку функціональну схему раціонального управління можна подати у наступному вигляді (рис. 3.7).

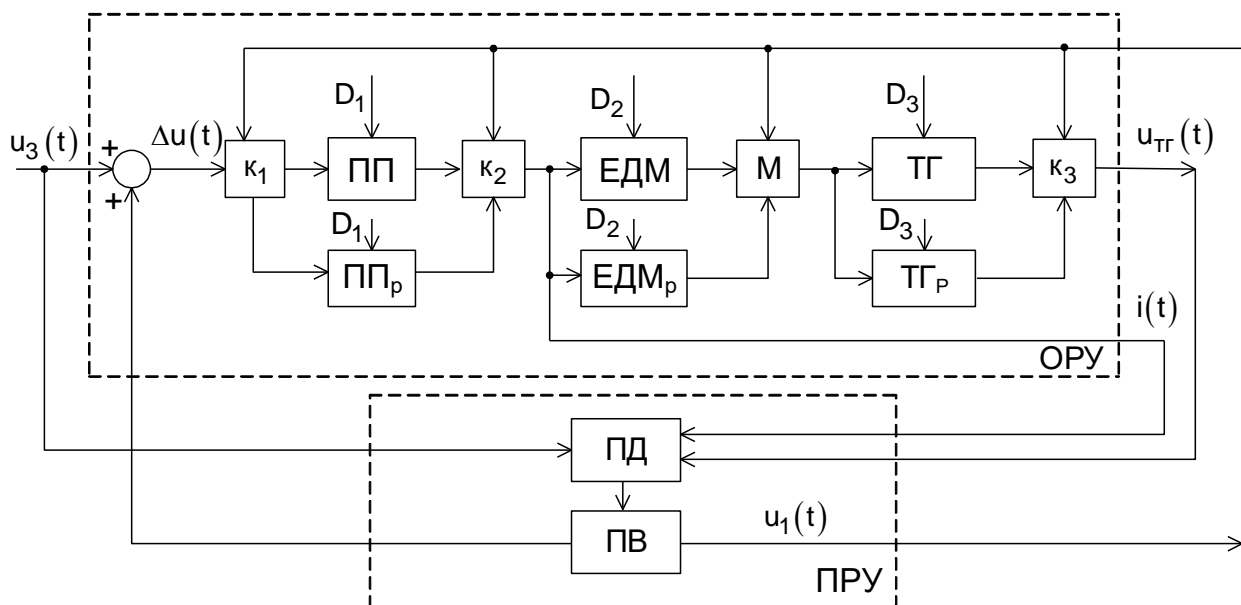


Рисунок 3.7 – Функціональна схема раціонального управління з'єднання ПП+ЕДМ+ТГ

Розглянемо докладніше склад та призначення функціональних елементів та зв'язків в ОРУ. Перший функціональний елемент – ПП. Він

має резерв як додатковий ПП_р. Цей додатковий резервний ПП_р включається до контуру управління за допомогою комутаторів k_1 і k_2 , які за сигналами комутації $u_1(t)$ з ПРУ відключають сигнали з несправного ПП і підключають до резервного. Можлива й інша схема цього блоку. Це коли працюють одночасно обидва підсилювачі на один ЕДМ. У цьому випадку при повній відмові одного з підсилювачів комутатори k_1 і k_2 відключають його з контуру управління, а справний підсилювач за допомогою додаткового сигналу $\Delta u(t)$ виводять на нову робочу ділянку відновлення працездатності блоку підсилювачів.

При цій схемі потрібно виводити додатково вихідні сигнали з кожного підсилювача для діагностування їх функціонування. При високих вимогах до надійності функціонування блоку підсилювачів потужності, його відмовостійкості чи живучості кількості резервних чи додаткових підсилювачів може бути збільшено зі збільшенням кількості комутувальних елементів та контрольних виходів з додаткових підсилювачів.

Другий функціональний елемент – ЕДМ з резервним ЕДМ_р. Резервний функціональний елемент ЕДМ_р включається до контуру раціонального управління при повній відмові основного ЕДМ за допомогою комутатора k_2 і муфти М за сигналами з ПРУ. Можливе також функціонування ЕДМ_р у гарячому резерві при інших циклограмах функціонування комутатора k_2 та муфти М за сигналами з пристроєм управління – ПРУ.

Підсилювач потужності можна розглядати як об'єкт діагностування, оскільки він схильний до дестабілізуючих впливів та з D_1 і вхід $u_3(t)$ і вихід $i(t)$ доступні виміру. Наслідуючи принцип децентралізації раціонального управління [23, 24] можна сформувати блок підсилювачів як автономну підсистему раціонального управління його працездатністю. Наприклад, при використанні додаткового ПП_р у холодному резерві схему такого блоку укрупнено можна подати у такому вигляді (рис. 3.8).

Процедури діагностування та відновлення: ПД та ПВ реалізуються ПРУ за допомогою мікропроцесорних засобів обробки сигналів $u_3(t)$ та $i(t)$.

Наслідуючи принцип децентралізації раціонального управління, ЕДМ не задовольняє вимогам до об'єкта діагностування. Одна з вимог до об'єкта діагностування полягає у необхідності електричних управляючого вхідного та вихідного управляемого сигналів. Оскільки вихідним

сигналом ЕДМ є кутова швидкість $\omega(t)$, то її значення не можуть бути використані під час цифрової обробки сигналів.

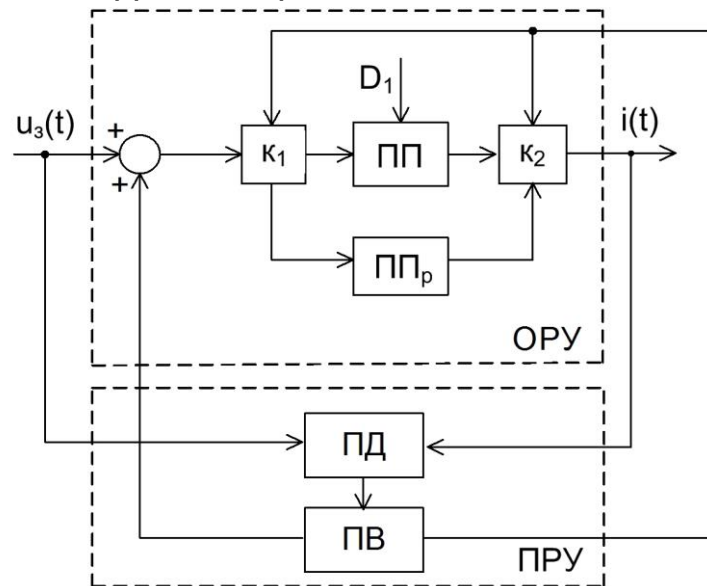


Рисунок 3.8 – Функціональна схема блоку підсилювачів потужності з раціональним управлінням працездатністю

Тому, щоб ЕДМ стало можливим використовувати як об'єкт діагностування, його потрібно доповнити датчиком кутової швидкості. Наприклад, тахогенератор, який виробляє електричний сигнал $u_{ТГ}(t)$.

Послідовне з'єднання ЕДМ з ТГ має електричний вхід – $i(t)$ і електричний вихід – $u_{ТГ}(t)$, іншими словами сигнали доступні цифровій обробці для отримання повного діагнозу. Таке ускладнення об'єкта діагностування спричиняє і подальше структурне його ускладнення для забезпечення можливості раціонального управління працездатністю послідовного з'єднання ЕДМ та ТГ. На рис. 3.9. представлено одну із можливих функціональних схем раціонального управління з'єднанням ЕДМ+ТГ.

У представленій функціональній схемі використовується резервний ЕДМ₂, який включається в функціонування комутатором k_2 і муфтою М за сигналами з ПРУ. ТГ₂ – це другий, ідентичний першому, датчик кутової швидкості, сигнал з якого надходить в ПРУ до блоку, що виконує обробку сигналів для отримання повного діагнозу. Другий вихідний сигнал з ПРУ – це сигнальне підстроювання, яке підсумовується з сигналом $i(t)$.

Підвищити продуктивність оптимального управління ЕДМ можна, використовуючи принцип управління за відхиленням. Замкнуті системи автоматичного управління, сформовані з використанням цього принципу,

компенсують малі відхилення параметрів об'єкта автоматичного управління.

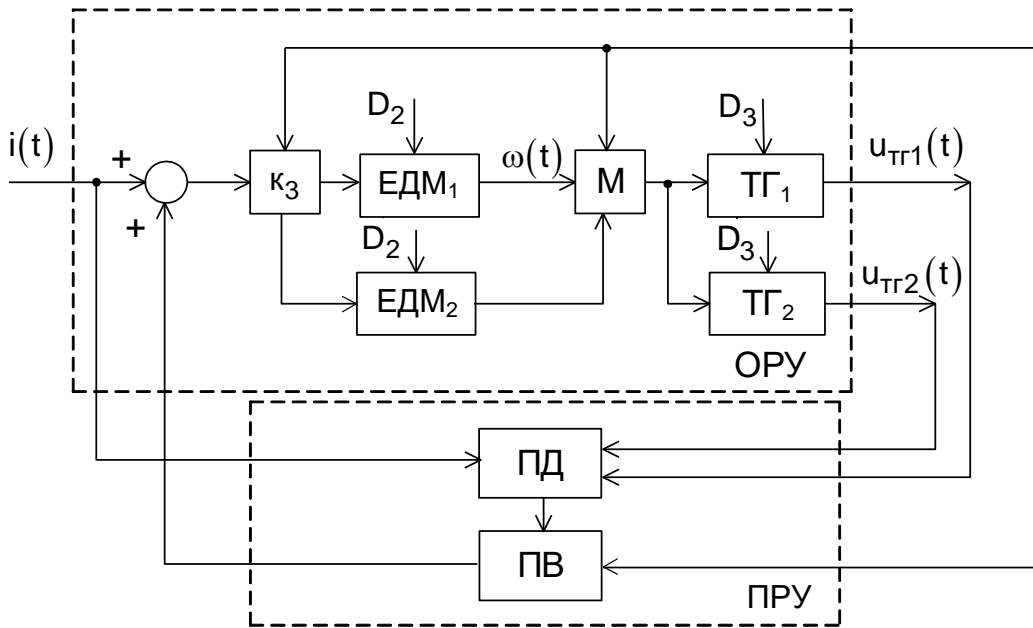


Рисунок 3.9 – Функціональна схема раціонального управління з'єднання ЕДМ+ТГ

Ця властивість замкнутих систем управління дозволяє «розвантажити» частково ПРУ, що дозволить підвищити як точність функціонування електромеханічного виконавчого органу, так і оперативність компенсації дестабілізуючих впливів.

Так, стосовно функціональної схеми раціонального управління (рис. 3.7.) вводиться контур управління вихідним сигналом $u_{ТГ}(t)$ за його відхиленням від задавального впливу – $u_3(t)$ (рис. 3.10).

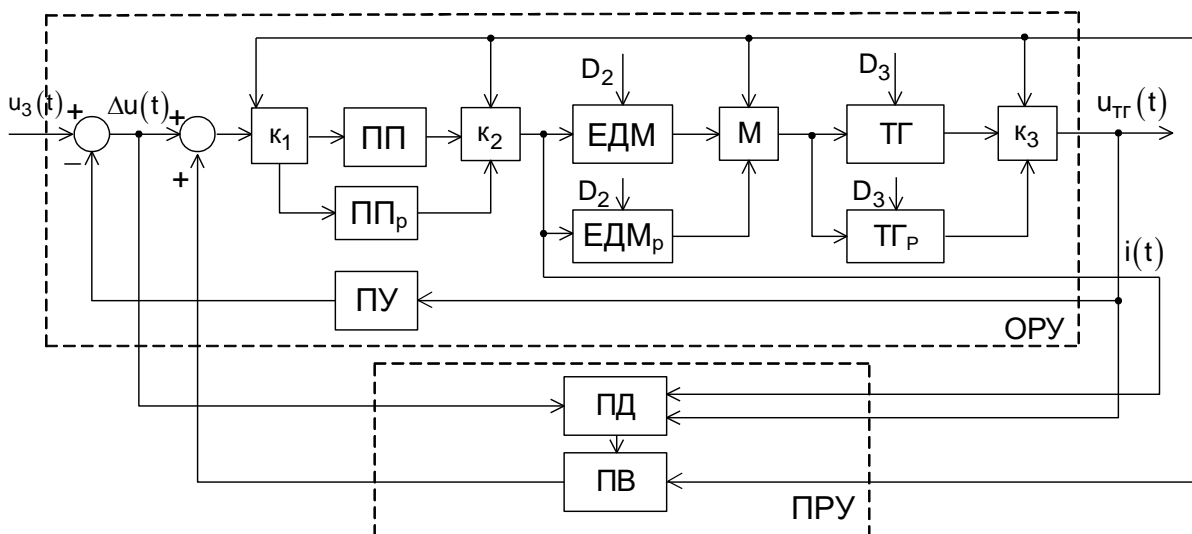


Рисунок 3.10 – Функціональна схема двоконтурної системи раціонального управління

Представлена функціональна схема містить два контури управління. Перший контур управління по сигналу $u_{\text{ТР}}(t)$ за допомогою пристрою управління формує сигнал на негативний вхід суматора, в якому порівнюється із задавальним впливом і формується сигнал відхилення – $\Delta u(t)$.

Другий контур управління за діагнозом формується з використанням сигналів $u_{\text{ТР}}(t)$, $i(t)$ і $\Delta u(t)$, а також процедур ПД і ПВ. Сигнали з ПВ надходять на ОРУ для відновлення його працездатності.

Стосовно функціональних схем рис. 3.8 та рис. 3.9 використання принципу управління за відхиленням призводить до триконтурної системи раціонального управління (рис. 3.11).

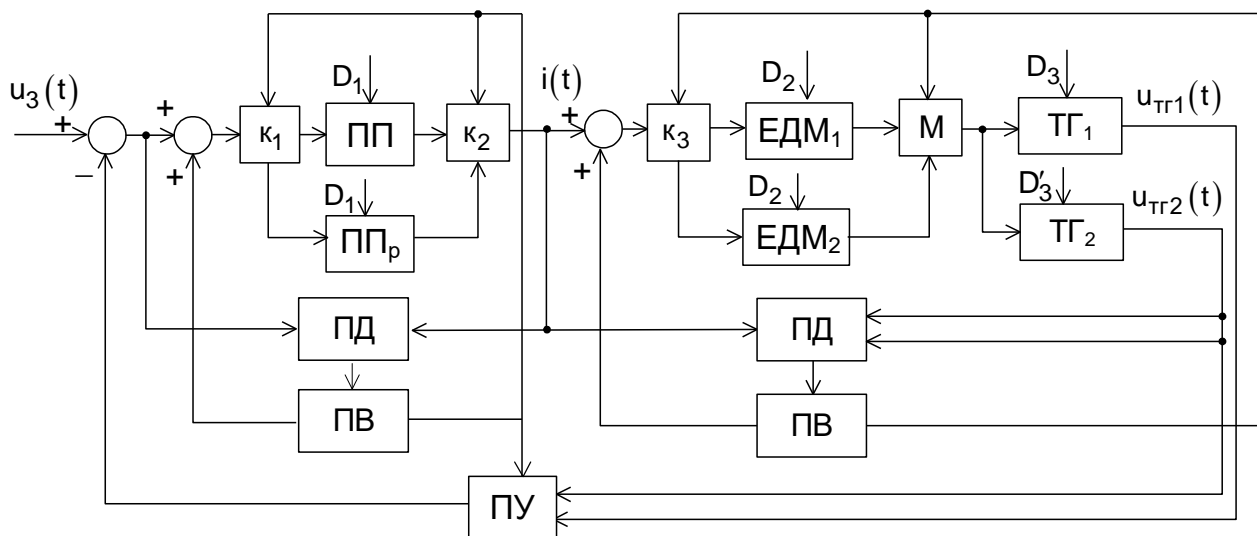


Рисунок 3.11 – Функціональна схема триконтурної системи раціонального управління

У представленій функціональній схемі два внутрішні контури управління за діагнозом працездатністю ПП і ЕДМ, а зовнішній контур управління за відхиленням, утворений за допомогою сигналів $u_{\text{ТР1}}(t)$, $u_{\text{ТР2}}(t)$, пристрій управління – ПУ і суматора.

Наведені функціональні схеми не вичерпують всього різноманіття можливих схем раціонального управління ЕДМ, але є ключовими. На прикладі цих ключових схем будуть розглянуті інструментальні засоби глибокого діагностування та гнучкого відновлення працездатності електромеханічних приводів на базі ЕДМ.

3.3. Моделі номінального функціонування електродвигуна-маховика як об'єкта автоматичного управління

Об'єкт автоматичного управління електромеханічного виконавчого органу складається з підсилювача потужності, електродвигуна-маховика та тахогенератора (рис. 3.6). Центральним функціональним елементом цього з'єднання є ЕДМ, що є безконтактним електродвигуном постійного струму, що перетворює електричну енергію в кінетичний момент. Розглянемо ЕДМ із погляду перетворення енергії. На рис. 3.12 представлено графічну фізичну модель ЕДМ.

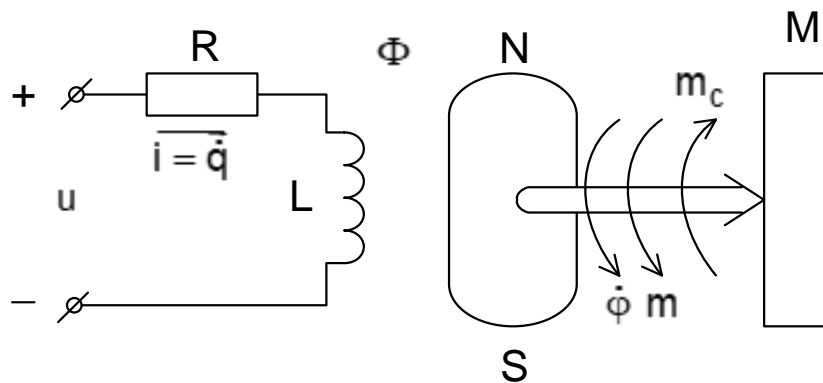


Рисунок 3.12 – Фізична модель електродвигуна-маховика

У моделі використані такі позначення: u – управляюча напруга; $i = \dot{q}$ – струм обмотки збудження; R – опір обмотки збудження; L – індуктивність обмотки збудження; Φ – потік збудження; $\dot{\phi}$ – кутова швидкість обертання ротора; m – момент обертання; m_c – момент опору; M – маховик; N і S – полюси постійного магніту якоря.

Для формалізації процесів перетворення енергії в ЕДМ використовуємо лагранжевий підхід [25] у наступному вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\lambda}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \lambda_i} = Q_i^u + Q_i^f; \quad i = \overline{1, n}, \quad (3.4)$$

де T – кінетична енергія об'єкта моделювання; λ_i – узагальнена координата; Q_i^u – узагальнена сила, що відповідає управляючим впливам; Q_i^f – узагальнена сила, що відповідає збурюючим впливам.

Процес перетворення енергії в ЕДМ має два ступені свободи і характеризується такими узагальненими координатами: кутом повороту ротора – ϕ ; величиною заряду – q .

Кінетична енергія ЕДМ описується наступним виразом:

$$T = \frac{1}{2}I\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}L\dot{q}^2, \quad (3.5)$$

тут I - момент інерції маховика.

Узагальнені сили кожної узагальненої координати описуються так:

$$\begin{aligned} Q_1^u &= m; \quad Q_1^f = m_c; \\ Q_2^u &= u; \quad Q_2^f = -R\dot{q}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Виконавши перетворення відповідно до рівняння (3.4), отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} I\ddot{\phi} = m - m_c; \\ L\ddot{q} = u - R\dot{q}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Моменти та сили у правих частинах рівнянь залежать від узагальнених координат.

Розглянемо якісний вид нелінійних залежностей сил та моментів рівняння (3.7). Обертальний момент $m = f(u)$, тобто нелінійним чином залежить від управляючої напруги u . На рис. 3.13 наведено графік цієї нелінійної залежності.

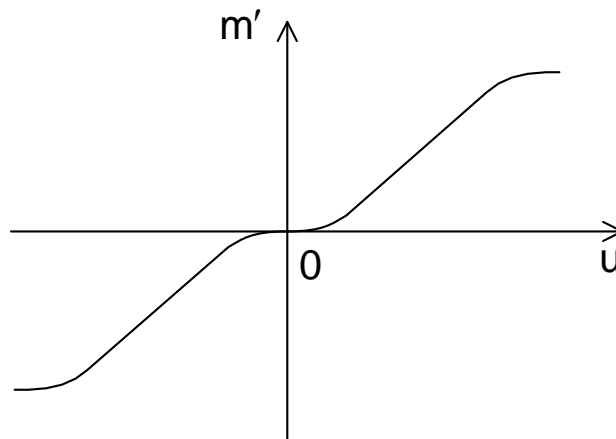


Рисунок 3.13 – Статична характеристика ЕДМ

На представлений нелінійній характеристиці очевидні три ділянки: перша – це зона нечутливості; друга – середня ділянка, близька до лінійної залежності та третя – ділянка насичення.

Обертальний момент нелінійним чином залежить від кутової швидкості ЕДМ. На рис. 3.14 представлено цю залежність.

З характеру механічної характеристики випливає, що поки $\omega \ll \omega_{\max}$ управляючий момент зменшується і при $\omega = \omega_{\max}$ – швидкість насичення ЕДМ втрачає здатність створювати управляючий момент.

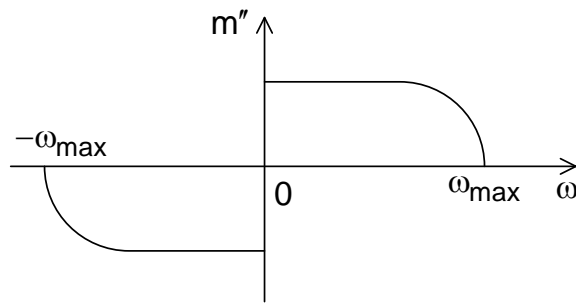


Рисунок 3.14 – Механічна характеристика ЕДМ

Момент опору m_o на валу ЕДМ створюється силами сухого та в'язкого тертя. Момент сухого тертя – m_o' суттєво нелінійним чином залежить від кутової швидкості ЕДМ (рис. 3.15).

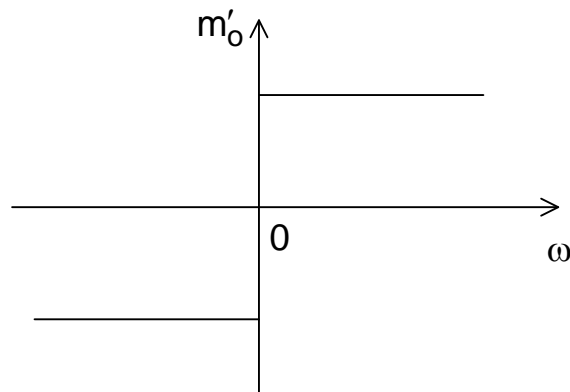


Рисунок 3.15 – Статична характеристика сухого тертя

Момент в'язкого тертя – m_o'' – в залежності від кутової швидкості має лінійний характер з коефіцієнтом передачі k_B .

ЕДМ постійного струму властивий позиційний момент – m_{Π} , що характеризує залежність крутного моменту від кутової швидкості обертання і враховує насичення по кінетичному моменту.

Позиційний момент має складну графічну залежність. Внаслідок апроксимації цієї залежності отримано аналітичний опис [3]. Аналітична залежність цього моменту описується наступним виразом:

$$m_{\Pi} = (1 - a \sin n\varphi) m'' m', \quad (3.8)$$

де a – коефіцієнт, що характеризує амплітуду позиційного моменту;

φ – кут повороту ротора ЕДМ;

n – число пар полюсів магнітної системи.

Нелінійну модель ЕДМ можна подати з допомогою перетворень Лапласа у вигляді структурної схеми (рис. 3.16).

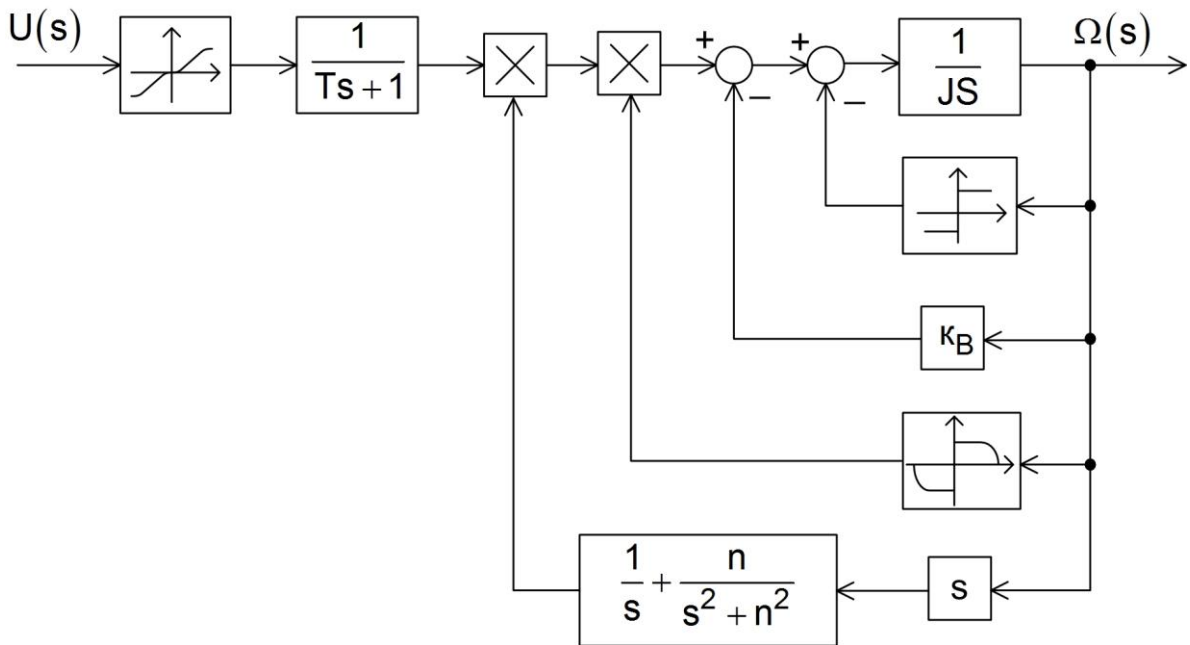


Рисунок 3.16 – Структурна схема нелінійного ЕДМ

Представлена нелінійна модель може бути використана для досліджень в середовищі Simulink. Для аналітичних досліджень цю модель потрібно лінеаризувати та спростити так, щоб отримати залежність у лінійному наближенні у вигляді лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами та у вигляді відповідних передавальних функцій.

За допомогою лінійної апроксимації нелінійних характеристик, нехтуючи такими другорядними малими ефектами як гістерезис, сухе тертя, зосередивши увагу на перетворювальних властивостях ЕДМ поблизу робочої точки отримаємо відповідні лінійні залежності. Ці залежності можна описати аналітично. Так, крутний момент ЕДМ:

$$m = c_m \Phi \dot{q} = k_m \dot{q}, \quad (3.9)$$

де c_m – конструктивна постійна електродвигуна;

k_m – коефіцієнт передачі ЕДМ.

Виконавши певні дії відповідно до рівняння (3.4), отримаємо наступне рівняння для узагальненої координати ϕ :

$$I \ddot{\phi} = k_M \dot{q} - k_B \dot{\phi}. \quad (3.10)$$

Для узагальненої координати q отримаємо таке рівняння:

$$L \ddot{q} = u - R \dot{q}. \quad (3.11)$$

Система спрощених та лінеаризованих рівнянь (3.7), розв'язаних щодо старших похідних, має такий вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} = \frac{k_M}{I} \dot{q} - \frac{k_B}{I} \dot{\phi}; \\ \ddot{q} = \frac{u}{L} - \frac{R}{L} \dot{q}. \end{cases} \quad (3.12)$$

Уявімо отриману систему рівнянь за допомогою змінних простору станів ЕДМ. І тому за допомогою методу простору станів [26, 27] уведемо такі змінні стану: $x_1(t) = \dot{\phi}$; $x_2(t) = \dot{q}$. У результаті відповідних перетворень отримаємо систему рівнянь у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_B}{I} & \frac{k_M}{I} \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} u(t); \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Для автоматичного управління обертанням ЕДМ необхідні датчики його кутової швидкості $\dot{\phi}(t)$ та змін струму $\dot{q}(t)$. Тоді вихідні сигнали датчиків $u_{д1}(t)$ і $u_{д2}(t)$ пов'язані через відповідні коефіцієнти передачі $k_{д1}(t)$ і $k_{д2}(t)$ з вектором стану наступним чином:

$$\begin{bmatrix} u_{д1}(t) \\ u_{д2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{д1} & 0 \\ 0 & k_{д2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Якщо використовувати тільки один датчик – датчик кутової швидкості, то зв'язок вихідного сигналу датчика $u_{д}(t)$ з вектором стану описуватиметься таким чином:

$$u_{д}(t) = \begin{bmatrix} k_{д} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

У більш компактній формі системи рівнянь (3,13) та (3,14) можна записати так:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t); x_1(t_0) = 0; u_{д}(t) = Cx(t), \quad (3.16)$$

$$\text{де } x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} -\frac{k_B}{I} & \frac{k_M}{I} \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix}; \quad (3.17)$$

$$u_{д}(t) = \begin{bmatrix} u_{д1}x_1(t) \\ u_{д2}x_2(t) \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} k_{д1} & 0 \\ 0 & k_{д2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix}; x(t_0) = \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для системи рівнянь (3.13) та (3.15) компактна форма матиме вигляд:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t); \quad x(t_0) = 0; \quad u_d(t) = c^T x(t), \quad (3.18)$$

тут

$$c^T = [c_1 \ 0] = [k_d \ 0]. \quad (3.19)$$

Графічне уявлення математичних описів у просторі станів дозволяє наочно уявити структури перетворювальних процесів для візуальної оцінки їх властивостей.

На рис. 3.17 представлена структурна схема, що відображає перетворювальні процеси в ЕДМ як об'єкті автоматичного управління.

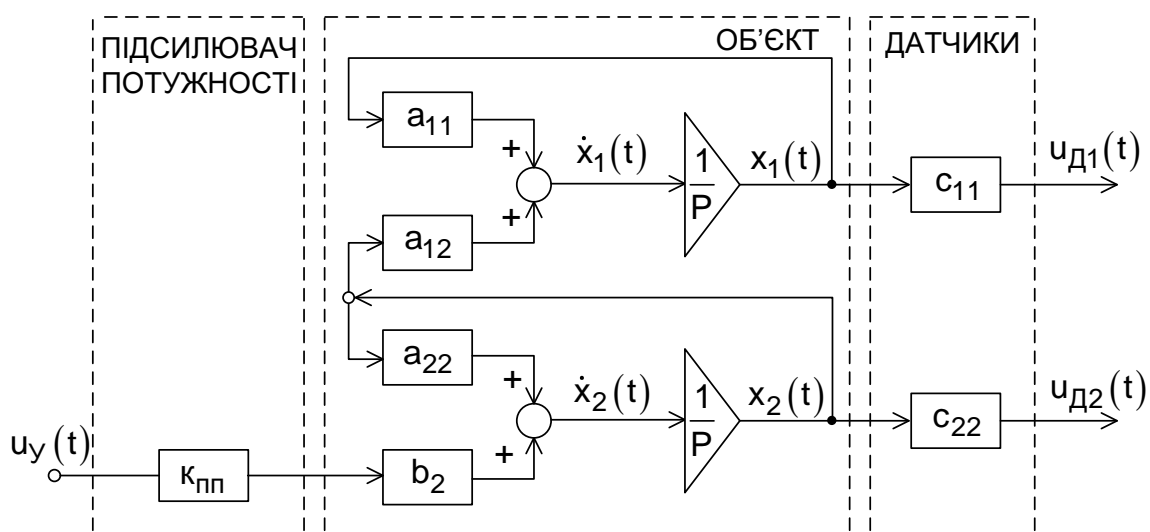


Рисунок 3.17 – Структурна схема об'єкта автоматичного управління у часовій області

Наведена структурна схема відображає як склад перетворювальних елементів математичного опису, так і зв'язки між елементами і характеристиками сигналів.

На рис. 3.18 наведено структурну схему об'єкта автоматичного управління з датчиком кутової швидкості.

Для отримання математичного опису ЕДМ як об'єкта автоматичного управління в частотній області використовуємо перетворення Лапласа для рівнянь (3.13) та (3.14), і в результаті отримуємо наступні операторні рівняння:

$$sX(s) = AX(s) + bU(s); \quad U_d(s) = cX(s), \quad (3.20)$$

де s – змінна перетворень Лапласа;

$X(s)$ – зображення вектору станів $x(t)$;

$U(s)$ – зображення управляючого впливу;

$U_d(s)$ – зображення вектору сигналів датчиків.

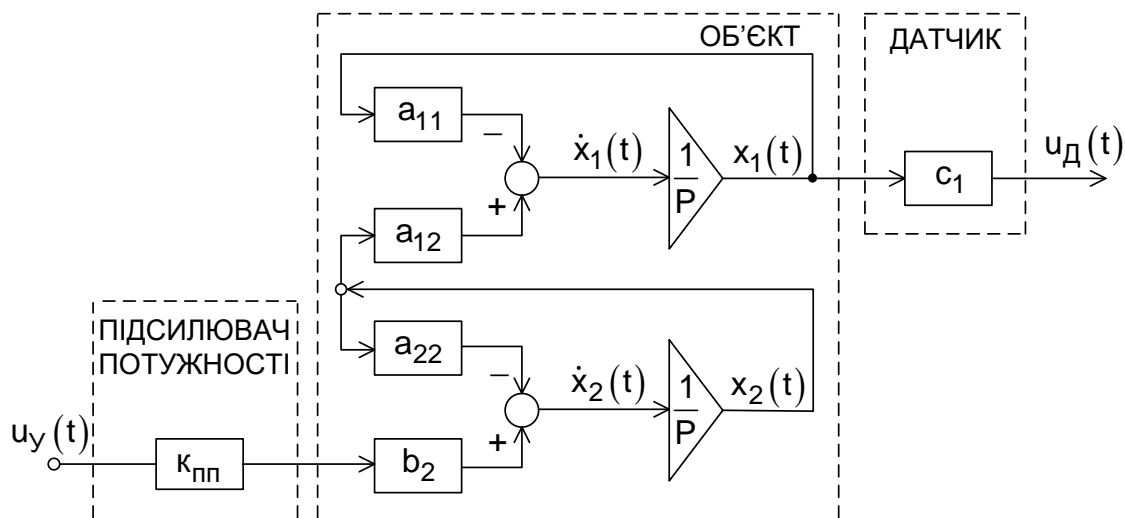


Рисунок 3.18 – Структурна схема об'єкта автоматичного управління з одним датчиком

Операторне рівняння для зображення $U_d(s)$ буде таким:

$$U_d(s) = C[sI - A]^{-1}bU(s), \quad (3.21)$$

тут $I - (2 \times 2)$ – одинична матриця.

Це операторне рівняння дозволяє отримати дві передавальні функції, що відображають зв'язки вихідних і вхідних зображень сигналів ЕДМ як об'єкта автоматичного управління.

$$W_1(s) = \frac{U_{d1}(s)}{U(s)} = \frac{c_{11}a_{22}b_2k_{пп}}{(s - a_{11})(s + a_{22})} = \frac{k_{д1}k_{м}k_{пп}}{k_{в}R \left(\frac{1}{k_{в}}s + 1 \right) \left(\frac{L}{R}s + 1 \right)}, \quad (3.22)$$

$$W_2(s) = \frac{U_{d2}(s)}{U(s)} = \frac{c_{22}(s - a_{11})b_2k_{пп}}{(s - a_{11})(s + a_{22})} = \frac{k_{д2} \left(\frac{1}{k_{в}}s + 1 \right) k_{пп}}{R \left(\frac{1}{k_{в}}s + 1 \right) \left(\frac{L}{R}s + 1 \right)}. \quad (3.23)$$

Позначимо $\frac{L}{R} = T_E$ – електрична постійна ЕДМ, а $\frac{1}{k_{в}} = T_{EM}$ – електромеханічна постійна ЕДМ. Як правило, $T_E \ll T_{EM}$ і тому передавальна функція $W_1(s)$ може бути представлена аперіодичною ланкою

$$W_1(s) = \frac{U_{д1}(s)}{U(s)} = \frac{k_1}{T_{EM}s + 1}, \quad (3.24)$$

де $k_1 = \frac{K_{д1}K_M K_{пп}}{k_B R}$ – коефіцієнт передачі об'єкта автоматичного управління;

$T_{EM} = \frac{I}{k_B}$ – електромеханічна постійна об'єкта автоматичного управління.

Друга передавальна функція $W_2(s)$ з урахуванням, що $T_E \ll T_{EM}$, а також однаковості співмножника $\left(\frac{I}{k_B}s + 1\right)$ в чисельнику та знаменнику може бути представлена безінерційною ланкою

$$W_2(s) = \frac{U_{д2}(s)}{U(s)} = \frac{K_{д2}K_{пп}}{R} = k_2. \quad (3.25)$$

При використанні в об'єкті автоматичного управління одного датчика кутової швидкості – тахогенератора передавальна функція буде наступною:

$$W_3(s) = \frac{U_{д}(s)}{U(s)} = \frac{c_1 a_{22} b_2 K_{пп}}{(s - a_{11})(s + a_{22})} = \frac{K_{д} K_M K_{пп}}{k_B R \left(\frac{I}{k_B}s + 1\right) \left(\frac{L}{R}s + 1\right)}. \quad (3.26)$$

З урахуванням умови, що $T_E \ll T_{EM}$, вираз передавальної функції спроститься до передавальної функції аперіодичного ланки (3.24).

Отримані математичні описи та графічні уявлення перетворювальних властивостей ЕДМ як об'єкта автоматичного управління відображають лише номінальний, штатний стан без урахування впливу дестабілізуючих факторів на працездатність.

3.4. Моделі нештатного функціонування об'єкта автоматичного управління

До нештатного функціонування ЕДМ як об'єкта автоматичного управління призводять різноманітні дестабілізуючі дії. За нештатного функціонування порушується працездатний стан об'єкта автоматичного управління. Для виявлення причин нештатної поведінки необхідні моделі, що відображають вплив дестабілізуючих факторів на вихідні, доступні вимірювання сигнали, що характеризують працездатність

об'єкта автоматичного управління. Такі моделі називаються діагностичними моделями [28].

Як дестабілізуючі впливи розглянемо збурювальні дії такі як сухе і в'язке тертя, коливання напруги мережі живлення, а також дефекти, поломки, несправності, відмови в об'єкті автоматичного управління. Під дією дестабілізуючих впливів в об'єкті математичного управління відбувається збурений рух, що описується наступним рівнянням збуреного руху:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{b}u(t) + \ell f(t); \tilde{x}(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_d(t) = \tilde{C}\tilde{x}(t), \end{cases}, \quad (3.27)$$

тут $\tilde{x}(t)$ – двовимірний вектор стану збуреного руху;

$\tilde{A}, \tilde{b}, \ell, \tilde{C}$ – матриці відповідних розмірностей, що характеризують дестабілізацію;

$\tilde{u}_d(t)$ – вихідний сигнал збуреного руху об'єкта.

Для малих відхилень дестабілізуючих впливів систему рівнянь (3.27) можна подати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = (A + \Delta A)\tilde{x}(t) + (b + \Delta b)u(t) + \ell f(t); \tilde{x}(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_d(t) = (C + \Delta C)\tilde{x}(t). \end{cases}, \quad (3.28)$$

Для вирішення завдання виявлення дестабілізації потрібна еталонна модель. Як найпростішу еталонну модель виберемо систему рівнянь (3.16). Віднімемо із системи рівнянь (3.28) рівняння еталонної моделі. В результаті отримаємо:

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}(t) = A\Delta x(t) + \Delta A\Delta x(t) + \Delta b u(t) + \ell f(t); \Delta x(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_d(t) = C\Delta x(t) + \Delta C\Delta x(t), \end{cases}, \quad (3.29)$$

де $\Delta x(t) = \tilde{x}(t) - x(t)$; $\Delta u_d(t) = \tilde{u}_d(t) - u_d(t)$.

Отримана у відхиленнях система рівнянь являє собою рівняння діагностичної моделі, що пов'язує доступну для виміру непряму діагностичну ознаку $\Delta u_d(t)$ з недоступними діагностичними ознаками дестабілізації $\Delta A, \Delta b, \ell, \Delta C$.

Точність визначення непрямої ознаки дестабілізації об'єкта автоматичного управління можна підвищити використанням еталонної моделі у формі спостерігача Д. Люєнбергера

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Gx(t) + K\tilde{u}_d(t) + bu(t); x(t) = 0; \\ u_d(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (3.30)$$

де матриця $G = A - KC$.

При вирішенні завдань ідентифікації об'єктів управління використовуються статичні еталонні моделі, що описуються системою рівнянь

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + bu(t) + bu(t); \tilde{x}(t_0) = \tilde{x}_0; \\ u_d(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (3.31)$$

З наведених трьох форм еталонних моделей спостерігач Д. Люенбергера можна використовувати як загальну форму еталонних моделей. Дійсно, якщо матриця $K = 0$, а матриця $G = 0$ і можна відновити вектор стану $\tilde{x}(t)$, тобто існує зворотна матриця C^{-1} , тоді виходить статична еталонна модель (3.31).

Діагностична модель для виявлення дестабілізації з використанням спостерігача Люенбергера матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}(t) = G\Delta x(t) + \Delta A\Delta x(t) + bu(t); \tilde{x}(t_0) = 0; \\ \Delta u_d(t) = C\Delta x(t) + \Delta C\Delta x(t), \end{cases} \quad (3.32)$$

Отже, вплив усіх дестабілізуючих факторів, буде проявлятися у векторі вимірювань $\tilde{u}_d(t)$, що представляють собою вихідні сигнали датчиків.

Після вирішення завдання виявлення дестабілізації потрібно знайти місце дестабілізації – конструктивно-закінчену частину об'єкта автоматичного управління ЕДМ. Таких частин три. Це підсилювач потужності, сам ЕДМ та датчики. Для пошуку місця дестабілізації використовуються відповідні діагностичні моделі. Так, для виявлення дестабілізації в підсилювачі потужності, коли

$$\tilde{u}_{пп}(t) = \tilde{k}_{пп}u(t) + u_0, \quad (3.33)$$

де $\tilde{k}_{пп}$ – величина коефіцієнта посилення при дестабілізації;

u_0 – величина дрейфу нуля, еталонна модель, що відображає номінальний режим функціонування

$$u_{пп}(t) = k_{пп}u(t), \quad (3.34)$$

тоді діагностична модель, що відображає дестабілізацію в підсилювачі потужності, буде наступною

$$\Delta u_{пп}(t) = \Delta k_{пп}u(t) + u_0. \quad (3.35)$$

У цій моделі інформація про дестабілізацію підсилювача потужності міститься в доступному для вимірювання відхиленні $\Delta u_{\text{пп}}(t)$.

Збурений рух ЕДМ та датчиків, викликаний дестабілізуючими впливами, описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{b}'u_{\text{пп}}(t) + \ell f(t); \tilde{x}(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_d(t) &= \tilde{C}\tilde{x}(t), \end{aligned} \quad (3.36)$$

тут \tilde{b}' – вектор-стовпець, що відображає зв'язок $u_{\text{пп}}(t)$ із вектором стану.

Для малих відхилень дестабілізуючих впливів діагностична модель, що описує дестабілізацію в цій частині об'єкта автоматичного управління буде такою:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x}(t) &= G\Delta x(t) + \Delta A\Delta x(t) + \Delta b'u_{\text{пп}}(t) + \ell f(t); \Delta x(t_0) = 0; \\ \Delta u_d(t) &= C\Delta x(t) + \Delta C\Delta x(t). \end{aligned} \quad (3.37)$$

За допомогою цієї моделі формується доступний вимірювання вектор сигналів $\Delta u_d(t)$, в якому відображається вплив дестабілізуючих діянь на функціонування ЕДМ+датчики.

Для пошуку конкретного функціонального елемента, у якому відбулася дестабілізація, потрібні глибші діагностичні моделі. Так, якщо дестабілізація відбулася в ЕДМ, тоді збурений рух описуватиметься системою рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \Delta\tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{b}'u_{\text{пп}}(t) + \ell'f(t); \tilde{x}(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_d(t) &= C\tilde{x}(t), \end{aligned} \quad (3.38)$$

тут ℓ' – вектор-рядок, що відображає вплив збурюючої дії на ЕДМ.

При використанні еталонної моделі у формі спостерігача Д. Люенбергера отримуємо діагностичну модель

$$\begin{aligned} \Delta\dot{x}(t) &= G\Delta x(t) + \Delta A\Delta x(t) + \Delta b'u_{\text{пп}}(t) + \ell'f(t); \Delta x(t_0) = 0; \\ \Delta u_d(t) &= C\Delta x(t), \end{aligned} \quad (3.39)$$

у вихідному сигналі якої міститься інформація про дестабілізацію функціонування ЕДМ.

Порушення працездатності датчика кутової швидкості κ_{d1} описується за допомогою діагностичної моделі такої конструкції:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + b'u_{\text{пп}}(t); x(t_0) = 0; \\ \Delta u_{d1}(t) = \Delta\kappa_{d1}x_1(t) + u_{01}, \end{cases} \quad (3.40)$$

де $\Delta u_{д1}(t)$ – відхилення сигналу датчика кутової швидкості від еталонного сигналу; $\Delta k_{д1}$ – відхилення коефіцієнта перетворення датчика, викликане дестабілізацією; u_{01} – величина дрейфу нуля датчика; $x_1(t)$ – перша компонента вектора стану.

Порушення у функціонуванні датчика струму $\Delta k_{д2}$ можна представити за допомогою діагностичної моделі такого виду:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + b'u_{пп}(t); x(t_0) = 0; \\ \Delta u_{д2}(t) = \Delta k_{д2}x_2(t) + u_{02}, \end{cases} \quad (3.41)$$

тут $\Delta u_{д2}(t)$ – відхилення сигналу датчика струму від еталонного значення; Δk_2 – відхилення коефіцієнта перетворення датчика при дестабілізації; $x_2(t)$ – друга компонента вектору стану $x(t)$; u_{02} – величина помилки виміру.

Використання діагностичних моделей (3.40) та (3.41) дозволяє знайти в якому з датчиків відбулося порушення працездатності, викликане дестабілізуючими впливами на ці функціональні елементи об'єкта автоматичного управління.

При використанні двох датчиків кутової швидкості $ТГ_1$ та $ТГ_2$ (рис. 3.9) обурений рух, спричинений порушеннями у їх функціонуванні, у загальному випадку описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + b'u_{пп}(t); x(t_0) = 0; \\ \tilde{u}_д(t) = C\Delta\chi(t) + \Delta Cx(t) + u_0, \end{cases} \quad (3.42)$$

тут u_0 – двовимірний вектор дрейфів нуля датчиків.

Діагностична модель порушень працездатності $ТГ_1$ матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + b'u(t); x(t_0) = 0; \\ \Delta u_{д1}(t) = \Delta k_1x_1(t) + u_{01}, \end{cases} \quad (3.43)$$

де $\Delta u_{д1}(t)$ – відхилення напруги $ТГ_1$ від еталонної напруги; Δk_1 – відхилення коефіцієнта перетворення $ТГ_1$ при дестабілізації; $x_1(t)$ – перша компонента вектору стану $x(t)$; u_{01} – величина дрейфу нуля $ТГ_1$.

При порушенні працездатності $ТГ_2$ діагностична модель матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + b'u(t); x(t_0) = 0; \\ \Delta u_{d2}(t) &= \Delta k_2 x_2(t) + u_{02}, \end{aligned} \quad (3.44)$$

де $\Delta u_{d2}(t)$ – відхилення напруги ТГ₂ от еталонного функціонування ТГ₂; Δk_2 – відхилення коефіцієнта перетворення ТГ₂, викликане дестабілізуючими впливами; $x_2(t)$ – друга компонента вектору стану $x(t)$; u_{02} – величина дрейфу нуля ТГ₂.

Отже, при дестабілізації працездатності датчиків ТГ₁ и ТГ₂ встановити непрацездатний датчик можна за допомогою представлених діагностичних моделей (3.43) та (3.44), що відображають причинно-наслідкові зв'язки між прямими та непрямыми діагностичними ознаками.

Для встановлення типу дестабілізації потрібні відповідні діагностичні моделі, котрі пов'язують непрямі діагностичні ознаки з прямими діагностичними ознаками класу. Типи дестабілізації для підсилювача потужності формуються з множини D_1 – видів дестабілізуючих впливів. Для підсилювача потужності розглянемо такі види дестабілізуючих впливів: d_{11} – відновлюване зменшення коефіцієнта посилення; d_{12} – невідновлюване зменшення коефіцієнта посилення; d_{13} – відновлюваний дрейф нуля; d_{14} – невідновлюваний дрейф нуля; d_{15} – невідомий вид дестабілізації. Отже, множина D_1 містить п'ять видів дестабілізації:

$$D_1 = \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{15}\}. \quad (3.45)$$

Прямою діагностичною ознакою видів дестабілізації d_{11} и d_{12} буде поточне значення коефіцієнта посилення $\tilde{k}_{пп}$. Таким чином, тип зменшення $k_{пп}$ складатиметься з двох видів відновлюваної та невідновлюваної дестабілізації. І ознакою, що характеризує цей клас, буде поточне значення $\tilde{k}_{пп}$. Другий тип дрейфів містить види d_{13} і d_{14} , а ознакою класу буде поточне значення зміщення статичної характеристики підсилювача потужності u_0 . Третій тип включає вид дестабілізації і діагностичною ознакою цього типу буде відсутність ознак першого та другого типу. Діагностична модель для цих двох типів описується такою ж моделлю, як і для виявлення дестабілізації у підсилювачі потужності (3.35).

При формуванні для ЕДМ діагностичних моделей типів необхідно спочатку сформуванати множину D_2 – видів дестабілізуючих впливів.

Нехай множина D_2 буде включати такі дестабілізуючі впливи: d_{21} – порушення у функціонуванні ЕДМ, що призводять до відновлюваного зменшення коефіцієнта k_M , d_{22} – невідновлюване зменшення коефіцієнта перетворення; d_{23} – відновлюване збільшення часу перехідного процесу; d_{24} – невідновлюваний час перехідного процесу; d_{25} – невідомий вид дестабілізації. Таким чином, множина D_2 буде складатися з п'яти видів дестабілізуючих впливів

$$D_2 = \{d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}, d_{25}\}. \quad (3.46)$$

Види дестабілізації d_{21} і d_{22} можна об'єднати в один тип, який буде характеризуватись параметром \tilde{k}_M (3.1). Види дестабілізації d_{23} і d_{24} залежать від параметра \tilde{k}_B (3.10), тому увійдуть до другого типу дестабілізації. Третій тип – це вид d_{25} , діагностичною ознакою якого буде відсутність діагностичних ознак першого та другого типів.

Діагностична модель, що описує ці типи дестабілізації у розгорнутій формі, матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1(t) \\ \Delta \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sigma_1 & 0 \\ 0 & -\sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta k_B}{l} & \frac{\Delta k_B}{l} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ l \end{bmatrix} u_{yM}(t); \\ \begin{bmatrix} \Delta x_1(t_0) \\ \Delta x_2(t_0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \Delta u_{d1}(t) \\ \Delta u_{d2}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(t) \\ \Delta x_2(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.46)$$

тут $-\sigma_1$ і $-\sigma_2$ – коефіцієнти матриці спостерігача Д. Люенбергера.

На працездатність датчиків об'єкта автоматичного управління впливають дестабілізуючі дії з множини D_3 . Для конкретизації видів дестабілізації розглянемо такі: d_{31} – відновлюване зменшення коефіцієнта перетворення першого датчика; d_{32} – невідновлюване зменшення коефіцієнта перетворення першого датчика; d_{33} – відновлювана величина дрейфу нуля першого датчика; d_{34} – невідновлювана величина дрейфу нуля першого датчика, d_{35} – відновлюване зменшення коефіцієнта перетворення другого датчика; d_{36} – невідновлюване зменшення коефіцієнта перетворення другого датчика; d_{37} – відновлювана величина дрейфу нуля другого датчика, d_{39}

– невідомий вид дестабілізації. При таких видах дестабілізації множина D_3 складатиметься з дев'яти елементів:

$$D_3 = \{d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}, d_{35}, d_{36}, d_{37}, d_{38}, d_{39}\}. \quad (3.47)$$

Види дестабілізації d_{31} і d_{32} становлять перший тип с діагностичною ознакою $\tilde{k}_{д1}$. До типу дрейфів нуля увійдуть види d_{33} і d_{34} з ознакою u_{01} . Аналогічно третій тип – це види d_{35} і d_{36} з ознакою $\tilde{k}_{д2}$. Четвертий тип включає види d_{37} і d_{38} з ознакою u_{02} . П'ятий тип – це вид дестабілізації із попередніх класів.

Діагностична модель, що відображає типи дестабілізації датчиків матиме наступну структуру:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{д1}(t) \\ \Delta u_{д2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta k_{д1} & 0 \\ 0 & \Delta k_{д2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{01} \\ u_{02} \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Наведені конструкції діагностичних моделей є моделями нештатного функціонування ЕДМ як об'єкта автоматичного управління. Ці моделі необхідні для реалізації принципу управління по діагнозу, який полягає у виявленні причин порушення працездатності функціональних елементів, тобто у встановленні повного діагнозу непрацездатного об'єкта автоматичного управління.

Розділ IV. ДІАГНОСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТА РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

Нічого не відбувається без причини. Якщо щось сталося, можна бути впевненим, що для цього була причина.

Гіпократ (460-370 до н.е.) – знаменитий давньогрецький лікар, «батько медицини».

Діагностування – це технологічний процес виявлення причин порушення працездатності об'єкта раціонального управління. Для формування процесу діагностування потрібно вирішити ряд послідовних і взаємопов'язаних завдань: виявлення дестабілізації, пошуку місця її виникнення, визначення типу дестабілізації та ідентифікація її виду. Діагностичне забезпечення включає сукупність інструментальних засобів і послідовність їх використання для встановлення машинного діагнозу об'єкту раціонального управління, схильному до дестабілізуючих впливів.

4.1. Виявлення дестабілізації

В об'єкті раціонального управління дестабілізація працездатності може відбутися в будь-який момент часу, оскільки види дестабілізації є невизначеними подіями з множини

$$D = D_1 \cup D_2 \cup D_3, \quad (4.1)$$

тут \cup – символ диз'юнкції.

У зв'язку з реалізацією алгоритмів раціонального управління на мікропроцесорних засобах цифрової обробки сигналів доцільно перейти від диференціальних рівнянь (3.16) до математичних рівнянь дискретного простору станів за допомогою теореми Котельникова-Шенона. Тоді

$$\begin{cases} x[(k+1)T_0] = Ax(kT_0) + bu(kT_0); x(kT_0) = x_0; \\ u_d(kT_0) = Cx(kT_0), \end{cases} \quad (4.2)$$

де T_0 – період квантування;

$$k = 0, 1, 2, \dots;$$

A , b і C – матриці коефіцієнтів дискретного подання системи (3.16), що відрізняються структурою та коефіцієнтами.

У наступному викладі для спрощення запису змінних T_0 опускатимемо.

Суть процесу виявлення дестабілізації в об'єкті раціонального управління представимо функціональною схемою (рис.4.1).

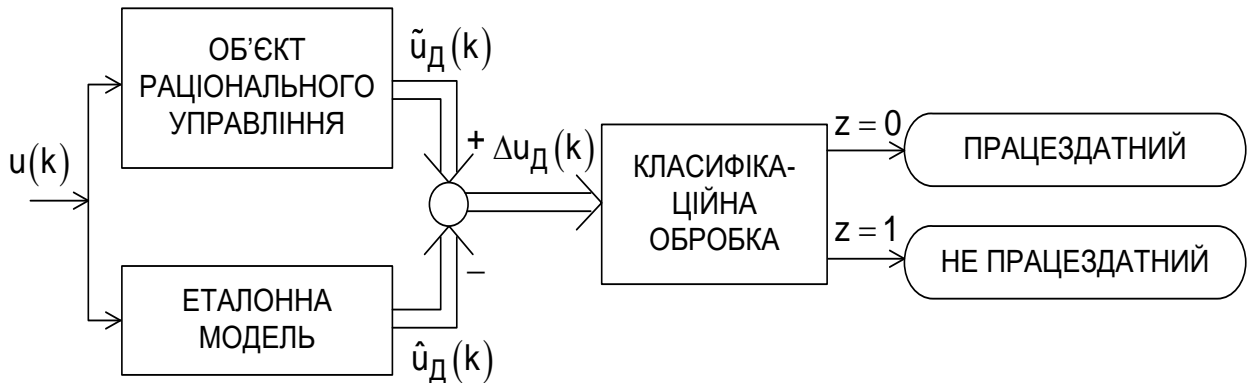


Рисунок 4.1 – Функціональна схема процесу виявлення дестабілізації

Вибравши як еталонну модель систему кінцево-різницевого виду:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + bu(k); \hat{x}(k_0) = 0; \\ \hat{u}_d(k) = C\hat{x}(k), \end{cases} \quad (4.4)$$

тут символ $\hat{}$ – символ оціночних значень змінних, отримаємо різницевого сигнал $\Delta u_d(k)$, у якому буде міститися інформація про поточний функціональний стан об'єкта раціонального управління.

Розгорнута форма еталонної моделі (4.3) може бути представлена таким чином:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k+1) \\ \hat{x}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{k_B T_0}{I} & \frac{k_M T_0}{I} \\ 0 & \frac{R T_0}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0}{L} \end{bmatrix} u(k); \quad \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k_0) \\ \hat{x}_2(k_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} u_{d1}(k) \\ u_{d2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 \\ 0 & k_{d1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix}.$$

Якщо використати статичну еталонну модель виду

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + bu(k); \hat{x}(k_0) = \tilde{x}_0; \\ \hat{u}_d(k) = C\hat{x}(k), \end{cases} \quad (4.7)$$

то розгорнута форма цієї моделі описуватиметься так:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1(k+1) \\ \hat{x}_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I - k_B T_0}{I k_{D1}} & \frac{k_M T_0}{I k_{D2}} \\ 0 & \frac{R T_0}{L k_{D2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_{D1}(k) \\ \tilde{u}_{D2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_0}{L} \end{bmatrix} u(k); \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k_0) \\ \hat{x}_2(k_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{10}(k_0) \\ \tilde{x}_{20}(k_0) \end{bmatrix}; \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_{D1}(k) \\ \hat{u}_{D2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{D1} & 0 \\ 0 & k_{D2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix}.$$

Використання будь-якої з розглянутих еталонних моделей дозволяє відповідно до функціональної схеми (рис. 4.1) отримати різницевий сигнал $\Delta u_D(k)$. Цей різницевий сигнал є дискретною функцією часу, в якому міститься інформація про поточний функціональний стан об'єкта раціонального управління, схильного до впливу дестабілізуючих діянь з множини D . Для класифікації різницевого сигналу $\Delta u_D(k)$ потрібна відповідна цифрова обробка в реальному масштабі часу. Таким чином, класифікаційна обробка пов'язана з формалізацією знань про дестабілізуючі діяння.

Відомо кілька способів формалізації знань, в теорії штучного інтелекту [29, 30]. Найбільш продуктивним для завдань діагностування, як свідчить досвід використання експертних систем, є спосіб формалізації за допомогою продукції або моделювання. Цей метод базується на правилах, що дозволяють представляти знання у вигляді пропозиції типу «якщо ..., то ...». Для формування набору продукції будемо використовувати двозначні предикатні рівняння загального виду [31]:

$$z = S_2(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \in \Omega; \\ 0, & \text{якщо } x \notin \Omega, \end{cases} \quad (4.9)$$

де Ω – числова множина.

Більш детальні двозначні предикатні рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} z_1 = S_2(x - a) &= \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \geq a; \\ 0, & \text{якщо } x < a; \end{cases} \\ z_2 = S_2(b - x) &= \begin{cases} 1, & \text{якщо } x \leq b; \\ 0, & \text{якщо } x > b; \end{cases} \\ z_3 = z_1 \wedge z_2 &= \begin{cases} 1, & \text{якщо } a \leq x \leq b; \\ 0, & \text{якщо } x < a \text{ и } x > b, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

тут a і b – постійні числа і $b > a$.

При формуванні апріорних та апостеріорних знань про дестабілізуючі впливи будемо виходити з наступного:

1) дестабілізуючі впливи – це невизначені події за часом появи, місцем локації, класом та видом прояву;

2) знання про конкретний вид можна отримати на підставі інформації про наявність в об'єкті діагностування дестабілізації, місце локалізації та клас дестабілізуючого впливу;

3) дестабілізуючі дії – це дії, які змінюють умови нормального функціонування об'єкта діагностування. Тому будь-які відхилення від номінальних статичних та динамічних характеристик об'єкта діагностування є видами дестабілізації;

4) апріорні знання про ознаки дестабілізуючого впливу будуть неповними. Тому в процесі всього життєвого циклу систем раціонального управління при появі нових дестабілізуючих впливів необхідно формувати про них нові апостеріорні знання, які уточнюють або доповнюють апріорні;

5) для комп'ютерної реалізації знань як апріорних, так і апостеріорних найбільш продуктивною формою їх формалізації служать двозначні предикатні рівняння.

Знання про прямі ознаки дестабілізуючих впливів $d_i \in D$, $i = \overline{1, q}$ представляються у формі булевих змінних z_j , $j = \overline{1, \tau}$. Використовувати ці знання для отримання діагнозу доцільно за допомогою дихотомічних дерев [32].

Завдання формування дихотомічного дерева полягає у систематизації предикатних знань відповідно до принципу послідовного зняття невизначеності позаштатних ситуацій, спричинених дестабілізуючими впливами.

Булева форма уявлення знання про прямі ознаки дестабілізації дозволяє сформувати деревоподібну дихотомічну структуру швидкого пошуку виду дестабілізуючого впливу.

Дихотомічна структура – це ієрархічна структура знань, де кожен вузол має значення та посилання на ліві та праві нащадки. Вузол, що знаходиться на самій вершині, називається коренем. Вузли, які не мають нащадків, – листя.

Для оперативного пошуку дихотомічні дерева балансують за різними критеріями, що дозволяє сформувати структуру дерева, що відповідає вимогам швидкодії процесів діагностування.

За допомогою отриманих на етапі проектування предикатних рівнянь знання прямих ознак дестабілізуючих впливів формується опорне дерево пошуку діагнозу. На наступних етапах життєвого циклу раціональної системи управління опорне дерево доповнюється новими гілками з листя невизначеності ситуацій, що виникли при локалізації, визначенні класу та встановленні конкретного виду дестабілізуючого впливу.

При формуванні двозначних предикатних рівнянь використовується припущення про квазістаціонарність прямих ознак дестабілізуючих впливів на інтервалах діагностування та відновлення.

Інформація про дестабілізацію об'єкта раціонального управління (рис.4.1) міститься в різницевому сигналі $\Delta u_d(k)$. Різницевий сигнал є векторною дискретною функцією часу. Для перетворення цієї функції часу в булеву функцію потрібно сформуувати двозначне предикатне рівняння з областю визначення $\forall k \in [k_0, k_1]$. Компоненти вектору $\Delta u_d(k)$: $\Delta u_{d1}(k)$ і $\Delta u_{d2}(k)$ містять пов'язану інформацію про дестабілізацію, тому вони повинні використовуватися як аргументи в двозначному предикатному рівнянні. Ці компоненти можуть бути як більшими, так і меншими за нуль. Тому предикатне рівняння може бути наступної структури:

$$z_0 = S_2 \left\{ \left[|\Delta u_{d1}(k)| + |\Delta u_{d2}(k)| \geq \delta_0 \right] \right\}, \quad (4.11)$$

де δ_0 – допуск для сумарної зміни відхилень сигналів датчиків від еталонних значень. Предикат обчислюється для $\forall k \in [k_0, k_1]$. Після k_1 проведених порівнянь здійснюється остаточне «виявлення», якщо виконується задана кількість збігів $k_T \geq k_1 \rho_0$, тут ρ_0 – коефіцієнт довіри, що дозволяє відкинути помилкові виміри, нульові точки, ігнорувати похибки, випадкові впливи та інші фактори.

Отже, для виявлення дестабілізації працездатності об'єкта раціонального управління необхідно:

- 1) сформуувати масив різниць $\Delta u_d(k)$, $k = \overline{k_0, k_1}$ для номінального режиму функціонування об'єкта та обчислити δ_0 і ρ_0 ;
- 2) занести отримані значення допуску та коефіцієнта довіри у файл бази даних та надалі використовувати для виявлення дестабілізації;
- 3) сформуувати масив поточних різниць $\Delta u_d(k)$, $k = \overline{k_0, k_1}$;

4) обчислити для $\forall k \in [k_0, k_1]$ предикат (4.11), підрахувавши кількість одиниць за допомогою лічильника k_1 ;

5) порівняти вміст лічильника k_T з добутком загальної кількості вимірювань k_1 на коефіцієнт довіри ρ_0 та повідомити один із можливих діагнозів:

- а) працездатний;
- б) непрацездатний.

При використанні в об'єкті раціонального управління одного датчика – датчика кутової швидкості (рис. 3.18) виявити дестабілізацію, що спричинила порушення працездатності можна за допомогою двозначного предикату виду:

$$z_0 = S_0 \left\{ \left[\left| \Delta u_{д1}(k) \right| \geq \delta_0 \right] \right\}; k = \overline{k_0, k_1}; \rho_0. \quad (4.12)$$

При використанні надмірного датчика кутової швидкості з коефіцієнтом передачі $k'_{д1}$ класифікаційну обробку різницевих цифрових даних з датчиків можна за допомогою двозначного предикату

$$z_0 = S_2 \left\{ \left[\left| \Delta u_{д1}(k) \right| + \left| \Delta u'_{д1}(k) \right| \right] \geq \delta_0 \right\}; k = \overline{k_0, k_1}; \rho_0. \quad (4.13)$$

де $\Delta u'_{д}(k)$ – відхилення сигналу з надлишкового датчика кутової швидкості щодо дискретного сигналу еталонної моделі.

Отже, для вирішення завдання діагностичного забезпечення процесу виявлення дестабілізації в об'єкті раціонального управління потрібно спочатку на першому етапі сформувавши структуру, а потім підібрати параметри еталонної моделі, що задовольняє тактико-технічним вимогам щодо швидкодії та адекватності динаміці сигналів датчиків. На другому етапі виробляється формування двозначного предикатного рівняння та його атрибутів, які забезпечують необхідну класифікацію різницевих сигналів $\Delta u_{д}(k)$ на працездатний і непрацездатний функціональний стан об'єкта раціонального управління. Третій етап пов'язаний з розробкою та налагодженням програм виявлення дестабілізації.

4.2. Пошук дестабілізуючих функціональних елементів

При виявленні дестабілізації в об'єкті раціонального управління потрібно зробити наступний логічний з погляду діагностування крок –

знайти функціональний елемент, що вносить дестабілізацію у працездатність.

Об'єкт раціонального управління складається з чотирьох функціонально-необхідних елементів (рис. 4.2).

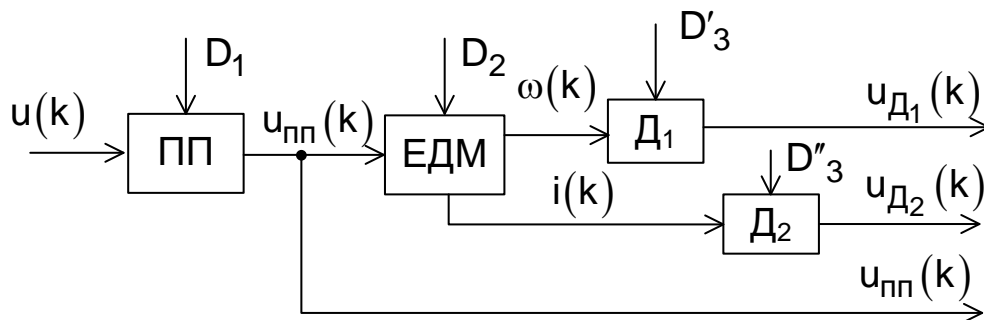


Рисунок 4.2 – Функціональна схема об'єкта раціонального управління

На кожен з цих функціональних елементів діє відповідна множина дестабілізуючих впливів D_1 , D_2 , D_3' і D_3'' , що порушують працездатність як елементів, так і об'єкта в цілому. В об'єкті раціонального управління припущення можлива на інтервалі діагностування дестабілізація лише одного функціонального елемента. Для пошуку дестабілізуючого функціонального елемента потрібно сформулювати відповідні ознаки дестабілізації функціональних елементів за допомогою доступних вимірювань сигналів $u(k)$, $u_{ym}(k)$, $u_{Д1}(k)$ і $u_{Д2}(k)$. Для формування ознак застосовуються відповідні діагностичні моделі. Так, для ПП – діагностична модель (3.39), для D_1 – діагностична модель (3.40), а для D_2 – діагностична модель (3.41). В результаті обробки різницевих сигналів за допомогою предикатів:

1) для ПП:

$$z_1 = S_2 \{ |\Delta u_{пп}(k)| \geq \delta_1 \}; k = \overline{k_1, k_2}; \rho_1; \quad (4.14)$$

2) для D_1 :

$$z_2 = S_2 \{ |\Delta u_{Д1}(k)| \geq \delta_3 \}; k = \overline{k_1, k_2}; \rho_3; \quad (4.15)$$

3) для D_2 :

$$z_3 = S_2 \{ |\Delta u_{Д2}(k)| \geq \delta_4 \}; k = \overline{k_1, k_2}; \rho_4; \quad (4.16)$$

4) для ЕДМ:

$$z_4 = z_2 \wedge z_3 \quad (4.17)$$

отримуємо двозначні ознаки дестабілізації. Формування булевих ознак $z_1 \div z_4$ проводиться на інтервалі дискретних значень $k \in (k_1, k_2]$. Це не є

обов'язковою умовою. Предикатні рівняння можна застосовувати і до масиву даних виявлення дестабілізації, тобто $\forall k \in (k_0, k_1]$, а також інших масивах даних по мірі використання булевих ознак для пошуку дестабілізуючого функціонального елемента.

Складемо таблицю впливу дестабілізації функціональних елементів (ФЕ) на булеві ознаки (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

ФЕ	Ознаки дестабілізації			
	z_1	z_2	z_3	z_4
ПП	1	0	0	0
ЕДМ	0	1	1	1
D_1	0	1	0	0
D_1	0	0	1	0

Невеликий розмір таблиці дозволяє без застосування формальних інструментальних засобів аналізу помітності рядків зробити візуальний аналіз. Отже, в результаті аналізу табл. 4.1 можна встановити очевидну структурну відмінність рядків між собою, що означає можливість однозначного визначення дестабілізуючого функціонального елемента за допомогою булевих ознак $z_1 \dots z_4$.

На рис. 4.3 представлено функціональну схему формування булевих ознак для пошуку дестабілізуючого функціонального елемента в об'єкті раціонального управління.

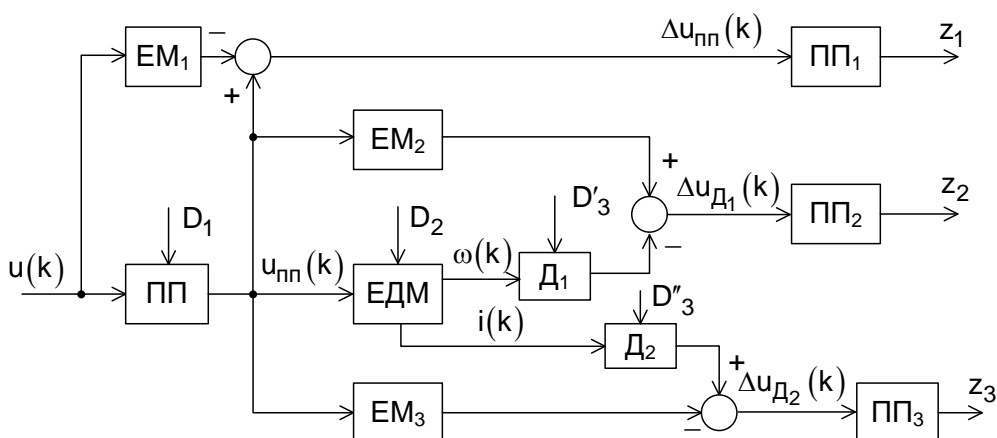


Рисунок 4.3 – Функціональна схема формування булевих ознак

У схемі використані еталонні моделі EM_1 , EM_2 , EM_3 . Різницеві сигнали перетворюються за допомогою предикатних перетворювачів $ПП_1$, $ПП_2$ і $ПП_3$ в ознаки дестабілізації z_1 , z_2 , z_3 .

За допомогою ознак дестабілізації функціональних елементів можна сформулювати правила пошуку елементів (ППЕ). Найпростіше правило - використання принципу прямого перебору всіх ознак і порівняння з табл. 4.1. Очевидною є трудомісткість та витратність таких правил. Другий підхід до формування ППЕ базується на принципі паралельного пошуку, що дозволяє отримати безумовні ППЕ.

Для формування безумовних ППЕ використовують табл. 4.1. Кожному рядку цієї таблиці відповідає свій набір булевих змінних (бінарний код), що відрізняється від інших. Тому для кожного функціонального елемента можна записати булеву функцію ρ_i як кон'юнкцію ознак, що містять «1» у даному рядку, та їх заперечень, якщо ознака дорівнює «0». Сукупність таких булевих функцій буде структурою безумовного ППЕ. Якщо в об'єкті раціонального управління порушено працездатність, за якої i -а булева функція $\rho_i = 1$, тобто істина, то це означає, що дестабілізація відбулася в i -му функціональному елементі. Запишемо безумовні ППЕ, виходячи з табл. 4.1:

$$\Phi_1[z_i] = \begin{cases} \rho_1 = z_1 \wedge \overline{z_2} \wedge \overline{z_3} \wedge \overline{z_4}; \\ \rho_2 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge z_3 \wedge z_4; \\ \rho_3 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge \overline{z_3} \wedge z_4; \\ \rho_4 = \overline{z_1} \wedge \overline{z_2} \wedge z_3 \wedge z_4. \end{cases} \quad (4.18)$$

Оскільки ознака z_4 є кон'юнкцією ознак z_2 і z_3 , то структуру безумовного ППЕ можна спростити, тоді

$$\Phi_2[z_i] = \begin{cases} \rho_1 = z_1 \wedge \overline{z_2} \wedge \overline{z_3}; \\ \rho_2 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge z_3; \\ \rho_3 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge \overline{z_3}; \\ \rho_4 = \overline{z_1} \wedge \overline{z_2} \wedge z_3. \end{cases} \quad (4.19)$$

Більше того, узявши до уваги, що ознака z_1 приймає значення «1» лише для функції ρ_1 , можна спростити структуру ППЕ до виду

$$\Phi_3[z_i] = \begin{cases} \rho_1 = z_1; \\ \rho_2 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge z_3; \\ \rho_3 = \overline{z_1} \wedge z_2 \wedge \overline{z_3}; \\ \rho_4 = \overline{z_1} \wedge \overline{z_2} \wedge z_3. \end{cases} \quad (4.20)$$

У наведених безумовних ППЕ використовуються всі ознаки z_1, z_2, z_3 і тому принцип паралельного пошуку є різновидом принципу прямого перебору.

Третій підхід формування ППЕ базується на принципі послідовного пошуку [28]. Використання цього принципу призводить до отримання умовних ППЕ. Розглянемо суть методу стосовно табл. 4.1. Кожен рядок таблиці відбиває якісний зв'язок конкретного ФЕ з булевими ознаками. Будь-яка булева ознака z_i поділяє всю множину ознак на дві підмножини. До першої входять такі ФЕ, для яких $z_i=1$, друга включає залишкові ФЕ з ознакою $z_i=0$. Використання цієї обставини дозволяє подати табл. 4.1 у вигляді графових деревоподібних схем – дихотомічних дерев. Дихотомічні дерева відрізнятимуться довжинами шляхів пошуку дестабілізуючого ФЕ. Бажано вибрати таке дихотомічне дерево з усіх можливих, щоб довжини шляхів, які залежать від кількості булевих ознак $z_i=1$, що використовуються, були приблизно однаковими. Іншими словами, дихотомічне дерево було збалансоване за ознаками.

Структура дихотомічного дерева залежить від вибору базової ознаки z_i . Розглянемо дихотомічні дерева, вибираючи як базові ознаки z_1, z_2 і z_3 . На рис. 4.4 представлено дихотомічне дерево для базової ознаки ПП – z_1 .

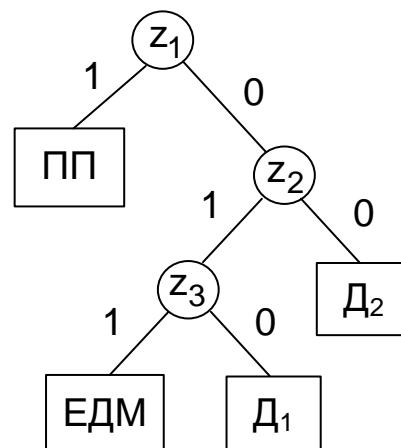


Рисунок 4.4 – Дихотомічне дерево для базової ознаки z_1

Отже, під час обчислення ознаки z_1 відповідно до предикату (4.14), якщо отримано значення $z_1=1$, то це означає, що дестабілізуючий функціональний елемент – це ПП. При нульовому значенні ознаки $z_1=0$ обчислюється ознака z_2 за формулою (4.15) та за її значенням $z_2=0$

знаходимо дестабілізуючий функціональний елемент D_2 . Якщо $z_2 = 1$, необхідно обчислити ознаку z_3 з допомогою виразу (4.16) і тоді при $z_3 = 1$ – це ЕДМ, а при $z_3 = 0$ – D_1 . Довжина шляхів у цьому дихотомічному дереві для пошуку дестабілізуючого функціонального елемента різна. Середня довжина шляху $\ell_{cp} = 2,25$. Так за допомогою цього дихотомічного дерева здійснюється пошук дестабілізуючого функціонального елемента в об'єкті раціонального управління.

Виберемо як базову ознаку z_2 . На рис. 4.5 представлено відповідне дихотомічне дерево.

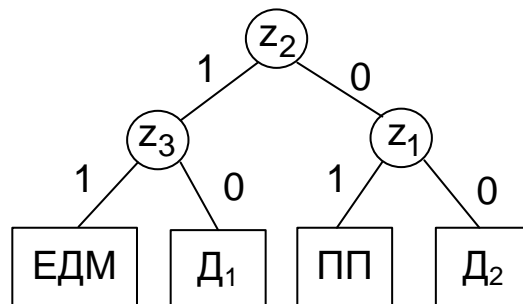


Рисунок 4.5 – Дихотомічне дерево для базової ознаки z_2

Ознака z_2 розбиває всю множину ознак на два рівносильні підмножини. У першій підмножині за допомогою ознаки z_3 визначаються дестабілізуючі функціональні елементи ЕДМ або D_1 . У другій підмножині ознака z_1 дозволяє встановити непрацездатні елементи ПП або D_2 . Довжина шляхів у цьому дихотомічному дереві однакова $\ell = 2$.

Ознака z_3 в якості базового породжує таке дихотомічне дерево (рис. 4.6).

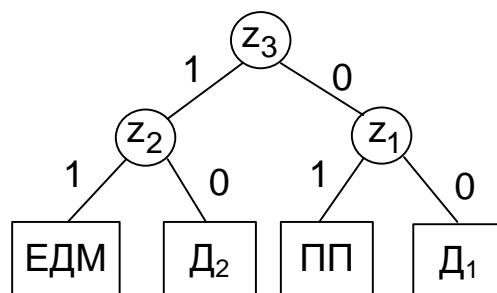


Рисунок 4.6 – Дихотомічне дерево для базової ознаки z_3

Ознака z_3 , як і в попередньому дихотомічному дереві, породжує дві рівносильні підмножини. У першій підмножині ознака z_2 дозволяє

встановити який із двох функціональних елементів непрацездатний ЕДМ або D_2 . У другій підмножині за допомогою ознаки z_1 визначається непрацездатність функціональних елементів ПП або D_1 . Довжина шляхів пошуку непрацездатного функціонального елемента у цьому дихотомічному дереві однакова і $\ell = 2$.

З розглянутих дихотомічних дерев збалансованими вийшло два: для базових ознак z_2 і z_3 . У представлених дихотомічних деревах можна скоротити обчислювальні витрати, відповідно і час пошуку несправного функціонального елемента у вигляді виключення ознаки z_1 . Використання ознак z_2 і z_3 дозволяє однозначно знайти будь-який непрацездатний функціональний елемент в об'єкті раціонального управління. Уявімо мінімізоване дихотомічне дерево для базової ознаки z_2 (рис. 4.7).

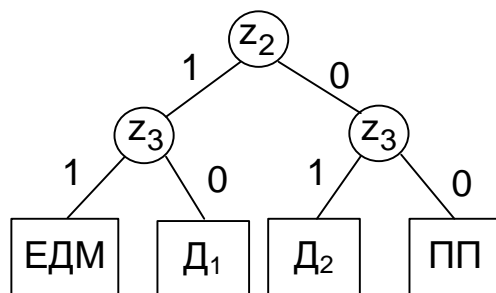


Рисунок 4.7 – Мінімізоване дихотомічне дерево

Отже, за допомогою обчислення значень двох ознак z_2 і z_3 можна однозначно знайти в об'єкті раціонального управління непрацездатний функціональний елемент. Аналогічне мінімізоване дихотомічне дерево можна сформулювати і для ознаки z_3 .

Пошук дестабілізуючого функціонального елемента проводиться після того, як виявлено непрацездатність об'єкта раціонального управління. Представимо дихотомічне дерево виявлення непрацездатності об'єкта та пошуку дестабілізуючих функціональних елементів (рис. 4.8).

Отже, для виявлення та пошуку дестабілізації в об'єкті раціонального управління використано три булеві ознаки z_0 , z_2 і z_3 . Ці ознаки обчислюються за допомогою відповідних двоцифрових предикатних рівнянь на певних вибірках дискретних значень відповідних різницевого сигналів об'єкта раціонального управління.

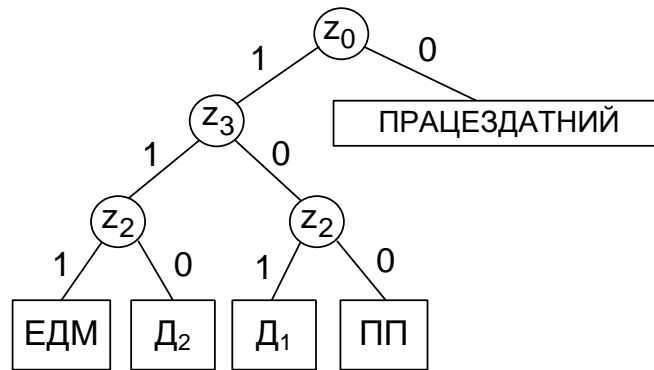


Рисунок 4.8 – Дихотомічне дерево виявлення та пошуку дестабілізації

Після знаходження дестабілізуючого функціонального елемента для повного діагнозу потрібно встановити причину, що спричинила порушення його працездатності.

4.3. Визначення типів дестабілізуючих впливів

На функціональні елементи об'єкта раціонального управління діють різні множини дестабілізуючих впливів. Серед цих впливів є однотипні, що призводять до зміни одного параметра функціональної діагностичної моделі. Так, на ПП діють дії з множини D_1 . Розглянемо конкретний склад видів дестабілізації множини D_1 :

$$D_1 = \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{15}, d_{16}, d_{17}\}, \quad (4.21)$$

де d_{11} – компенсоване зменшення коефіцієнта посилення; d_{12} – некомпенсоване зменшення коефіцієнта посилення; d_{13} – позитивний компенсований дрейф нуля; d_{14} – позитивний некомпенсований дрейф нуля; d_{15} – від'ємний компенсований дрейф нуля; d_{16} – від'ємний некомпенсований дрейф нуля; d_{17} – обриви сигнальних та живильних проводів.

Види дестабілізуючих впливів d_{11} , d_{12} , і d_{17} характеризуються зміною коефіцієнта посилення ПП і тому належать до одного типу дестабілізуючих впливів. Параметр $\tilde{\kappa}_{\text{ум}}$ характеризує цей тип дестабілізуючих впливів.

Види дестабілізуючих впливів d_{13} , d_{14} , d_{15} і d_{16} призводять до дрейфу нуля ПП. Параметр u_0 відповідає цьому типу впливів. Отже, всю множину із семи видів дестабілізуючих впливів можна представити

двома типами, що описуються параметрами $k_{пп}$ і u_0 . Діагностична функціональна модель ПП описуватиметься наступним алгебраїчним рівнянням:

$$\Delta u_{пп}(k) = \Delta k_{пп} u(k) + u_0 \quad (4.22)$$

де $\Delta k_{пп} = \Delta \tilde{k}_{пп} - k_{пп}$.

Для визначення типів необхідно сформулювати двозначні ознаки за допомогою відповідних двозначних предикатних рівнянь. Використовуючи припущення про одноразовість появи видів дестабілізації, а воно поширюється і на типи, а також припущення про квазістаціонарність діагностичних ознак під час діагностування та відновлення працездатності, розглянемо можливі конструкції предикатних рівнянь.

Для першого типу видів дестабілізуючих впливів діагностична функціональна модель буде наступною:

$$\Delta u_{пп}(k) = \Delta k_{пп} u(k). \quad (4.23)$$

Пряму діагностичну ознаку типу $\Delta k_{пп}$ можна визначити як

$$\Delta k_{пп} = \frac{\Delta u_{пп}(k)}{u(k)}. \quad (4.24)$$

Як випливає з виразу визначення оцінного значення прямої ознаки $\Delta k_{пп}$ використовується операція поділу на дискретні значення сигналу управління $u(k)$. Цей сигнал може приймати як нульові значення, так і малі близькі нулю. Для виключення таких ситуацій скористаємося припущенням про квазістаціонарність прямої діагностичної ознаки та отримаємо наступне співвідношення

$$\frac{\Delta u_{пп}(k)}{u(k)} \approx \frac{\Delta u_{пп}(k+1)}{u(k+1)}, \quad (4.25)$$

з якого випливає, що

$$\Delta u_{пп}(k) u(k+1) \approx \Delta u_{пп}(k+1) u(k). \quad (4.26)$$

Тоді двозначне предикатне рівняння для булевої ознаки першого типу матиме такий вигляд

$$z_{11} = S_2 \left\{ \delta_{11} - \left| \Delta u_{пп}(k) u(k+1) - \Delta u_{пп}(k+1) u(k) \right| \right\}; \quad (4.27)$$

$$k = \overline{k_2, k_3}; \rho_{11},$$

де δ_{11} – величина допуску для ознаки першого типу.

Для другого типу видів дестабілізуючих впливів діагностична функціональна модель набуде такого вигляду:

$$\Delta u_{пп}(k) = u_0. \quad (4.28)$$

Умова квазістаціонарності прямої ознаки u_0 дозволяє сформулювати такий аргумент для предикатного рівняння:

$$\delta_{12} = |\Delta u_{пп}(k+1) - \Delta u_{пп}(k)|. \quad (4.29)$$

Тоді двозначна ознака дрейфів визначатиметься за допомогою рівняння:

$$z_{12} = S_2 \{ \delta_{12} - |\Delta u_{пп}(k+1) - \Delta u_{пп}(k)| \}; \quad (4.30)$$

$$k = \overline{k_2, k_3}; \rho_{12},$$

тут δ_{12} – величина допуску для ознаки другого типу.

Отже, z_{12} і z_{17} служать ознаками двох типів видів дестабілізуючих впливів з множини D_1 . Якщо $z_{11} = 0$ і $z_{12} = 0$, то це ознака наявності виду дестабілізації z_{17} .

Працездатність ЕДМ порушують п'ять видів дестабілізуючих впливів з множини D_2 (3.45). Види дестабілізуючих впливів d_{21} і d_{22} , пов'язані зі зміною коефіцієнта передачі, однотипні та характеризуються параметром k_M . Види дестабілізуючих впливів d_{23} і d_{24} призводять до збільшення часу перехідного процесу і належать до другого типу дестабілізації ЕДМ з відповідним коефіцієнтом k_B . Третій тип включає вид дестабілізації d_{25} та характеризується відсутністю ознак першого та другого типів.

Діагностичну функціональну модель у цифровій формі, що відображає ці типи дестабілізуючих впливів, отримаємо із загального опису (3.46), прийнявши, що матриця $G = A$, тоді

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{k_B T_0}{I} & \frac{k_M T_0}{I} \\ 0 & \frac{R T_0}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta k_B T_0}{I} & \frac{\Delta k_M T_0}{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix}; \quad (4.31)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_1(k_0) \\ \Delta \hat{x}_2(k_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{д1}(k) \\ \Delta u_{д2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{д1} & 0 \\ 0 & k_{д2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix}.$$

Діагностичну функціональну модель у цифровій формі, що відображає ці типи дестабілізуючих впливів, отримуємо із загального опису (3.46), прийнявши, що матриця:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1(k+1) \\ \Delta x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\kappa_B T_0}{I} & \frac{\kappa_M T_0}{I} \\ 0 & \frac{RT_0}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta \kappa_B T_0}{I} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_2(k) \end{bmatrix}; \quad (4.32)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_1(k) \\ \Delta \hat{x}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{d1}(k) \\ \Delta u_{d2}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \kappa_{d1} & 0 \\ 0 & \kappa_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1(k) \\ \Delta x_2(k) \end{bmatrix}.$$

Дестабілізуючі види впливів першого типу не впливають на змінну стану $x_2(k)$ і за нульових початкових умов $x_2(k_0) = 0$ друга компонента стану діагностичної функціональної моделі $\Delta x_2(k) = 0$, тому

$$\Delta u_{d1}(k+1) = \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k) - \frac{\kappa_{d1} \Delta \kappa_B T_0}{I} \hat{x}_1(k). \quad (4.33)$$

Для формування аргументу двозначного предикату вирішимо отримане рівняння щодо $\Delta \kappa_B$.

$$\Delta \kappa_B = - \frac{\left[\Delta u_{d1}(k+1) - \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k) \right]}{\kappa_{d1} \Delta \kappa_B T_0}. \quad (4.34)$$

З умов квазістаціонарності діагностичної ознаки $\Delta \kappa_B$ отримуємо таке співвідношення.

$$\begin{aligned} \Delta \kappa_B &= \frac{\left[\Delta u_{d1}(k+2) - \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k+1) \right]}{\hat{x}_1(k+1)} \approx \\ &\approx \frac{\Delta u_{d1}(k+1) - \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k)}{\hat{x}_1(k)}, \end{aligned} \quad (4.35)$$

за допомогою якого сформуємо такий аргумент

$$\delta_{21} = \left| \frac{\left[\Delta u_{d1}(k+2) - \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k+1) \right] \hat{x}_1(k) - \left[\Delta u_{d1}(k+1) - \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{I}\right) \Delta u_{d1}(k) \right] \hat{x}_1(k+1)}{\hat{x}_1(k) \hat{x}_1(k+1)} \right|. \quad (4.36)$$

Двобзначне предикатне рiвняння для першого типу буде таким:

$$z_{21} = S_2 \left\{ \delta_{21} - \left[\begin{array}{l} [\Delta u_{d1}(k+2) - a\Delta u_{d1}(k+1)] \Delta \hat{x}_1(k) - \\ - [\Delta u_{d1}(k+1) - a\Delta u_{d1}(k)] \Delta \hat{x}_1(k+1) \end{array} \right] \right\}; \quad (4.37)$$

$$k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{21},$$

де $a = \left(1 - \frac{k_B T_0}{I} \right)$.

Дiагностична функцiональна модель для другого типу дестабiлізуючих впливiв буде наступною:

$$\Delta u_{d1}(k+1) = \left(1 - \frac{k_B T_0}{I} \right) \Delta u_{d1}(k) + \frac{k_{d1} k_M T_0}{I} \hat{x}_2(k) - \frac{k_{d1} \Delta k_M T_0}{I} \hat{x}_2(k). \quad (4.38)$$

Розв'язавши це рiвняння щодо Δk_M отримаємо

$$k_M = \frac{\left[\Delta u_{d1}(k+1) - \left(1 - \frac{k_B T_0}{I} \right) \Delta u_{d1}(k) - \frac{k_{d1} k_M T_0}{I k_{d2}} \Delta u_{d2}(k) \right] I}{k_{d1} T_0 \hat{x}_2(k)}. \quad (4.39)$$

Тодi двобзначне предикатне рiвняння буде наступним

$$z_{22} = S_2 \left\{ \delta_{22} - \left[\begin{array}{l} [\Delta u_{d1}(k+2) - a\Delta u_{d1}(k+1) - b\Delta u_{d2}(k+1)] \hat{x}_2(k) - \\ - [\Delta u_{d1}(k+1) - a\Delta u_{d1}(k) - b\Delta u_{d2}(k)] \Delta \hat{x}_2(k+1) \end{array} \right] \right\}; \quad (4.40)$$

$$k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{22},$$

де $b = \frac{k_{d1} k_M T_0}{J k_{d2}}$.

Ознакою третього типу буде умова

$$z_{23} = \bar{z}_{21} \wedge \bar{z}_{22}. \quad (4.41)$$

Таким чином, отриманi булевi ознаки z_{21} i z_{22} дозволяють однозначно встановити кожен з трьох типiв дестабiлiзацiї працездатностi ЕДМ.

На датчик кутової швидкостi D_1 дiє пiдмножина видiв дестабiлiзацiї D'_3 .

Сформуємо цю пiдмножину з множини D_3 (3.47). Тодi

$$D'_3 = \{d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}, d_{39}\}. \quad (4.42)$$

Як було описано раніше (п. 3.4), види дестабілізації d_{31} і d_{32} призводять до зменшення коефіцієнта передачі $k_{д1}$, а види дестабілізації d_{33} і d_{34} однотипні, так як пов'язані з дрейфом нуля u_{01} . Діагностична функціональна модель для типів дестабілізації першого датчика може бути представлена таким рівнянням:

$$\Delta u_{д1}(k) = \Delta k_{д1} \hat{x}_1(k) + u_{01}. \quad (4.43)$$

Припущення про одноразовість видів дестабілізації дозволяє подати діагностичну функціональну модель кожного типу дестабілізації. Так, для першого типу дестабілізації

$$\Delta u_{д1}(k) = \Delta k_{д1} \hat{x}_1(k). \quad (4.44)$$

Відхилення коефіцієнта передачі

$$\Delta k_{д1} = \frac{\Delta u_{д1}(k)}{\hat{x}_1(k)}. \quad (4.45)$$

На інтервалі діагностування та відновлення $\Delta k_{д1}$, за припущенням, квазістаціонарний, тому справедливе наступне співвідношення:

$$\frac{\Delta u_{д1}(k+1)}{\hat{x}_1(k+1)} \approx \frac{\Delta u_{д1}(k)}{\hat{x}_1(k)}, \quad (4.46)$$

з якого можна сформулювати аргумент для двозначного предикатного рівняння у такому вигляді:

$$\delta_{31} = |\Delta u_{д1}(k+1) \hat{x}_1(k) - \Delta u_{д1}(k) \hat{x}_1(k+1)|. \quad (4.47)$$

Тоді

$$z_{31} = S_2 \left\{ \delta_{31} - |\Delta u_{д1}(k+1) \hat{x}_1(k) - \Delta u_{д1}(k) \hat{x}_1(k+1)| \right\}; \quad (4.48)$$

$$k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{31}.$$

При $z_{31} = 1$ отримуємо висновок про перший тип дестабілізації, а при $z_{31} = 0$ – про його відсутність.

Діагностична функціональна модель для другого типу дестабілізації, пов'язаного з дрейфом нуля датчика, набуде такого вигляду:

$$\Delta u_{д1}(k) = u_{01}. \quad (4.49)$$

Квазіпростір ознаки u_{01} дозволяє сформулювати таку умову

$$\Delta u_{д1}(k+1) - \Delta u_{д1}(k) \approx 0, \quad (4.50)$$

за допомогою якої структура двозначного предикатного рівняння буде такою:

$$z_{32} = S_2 \left\{ \delta_{32} - |\Delta u_{д1}(k+1) - \Delta u_{д1}(k)| \right\}; k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{32}. \quad (4.51)$$

Це рівняння дозволяє однозначно встановити дестабілізацію датчика, викликану дрейфом нуля.

При $z_{31} = 0$ та $z_{32} = 0$ в датчику D_1 невідомий вид дестабілізуючого впливу.

На датчик струму D_2 діють види дестабілізації з підмножини $D_3'' \subset D_3$ (3.47). Підмножина D_3'' складається із п'яти видів дестабілізуючих впливів. А саме:

$$D_3'' = \{d_{35}, d_{36}, d_{37}, d_{38}, d_{39}\}. \quad (4.52)$$

Однотипні види впливів d_{35} і d_{36} характеризуються зменшенням коефіцієнта передачі k_{D_2} , види дестабілізуючих впливів d_{37} і d_{38} описуються параметром дрейфу u_{02} , а третій вид d_{39} пов'язаний з відсутністю перерахованих конкретних видів дестабілізації в датчиках D_1 і D_2 .

Діагностична функціональна модель для двох типів дестабілізації другого датчика може бути отримана (3.48) для дискретних аргументів у наступному вигляді:

$$\Delta u_{D_2}(k) = \Delta k_{D_2} \hat{x}_2(k) + u_{02}. \quad (4.53)$$

Перший тип дестабілізації другого датчика описується таким рівнянням алгебри:

$$\Delta u_{D_2}(k) = \Delta k_{D_2} \hat{x}_2(k), \quad (4.54)$$

з котрого

$$\Delta k_{D_2} = \frac{\Delta u_{D_2}(k)}{\hat{x}_2(k)}. \quad (4.55)$$

Через квазістаціонарність діагностичної ознаки Δk_{D_2} маємо, що

$$\frac{\Delta u_{D_2}(k+1)}{\hat{x}_2(k+1)} = \frac{\Delta u_{D_2}(k)}{\hat{x}_2(k)}, \quad (4.56)$$

тоді двозначне предикатне рівняння для встановлення факту наявності в датчику D_2 першого типу дестабілізації буде таким:

$$z_{33} = S_2 \left\{ \delta_{33} - \left| \Delta u_{D_2}(k+1) \hat{x}_2(k) - \Delta u_{D_2}(k) \hat{x}_2(k+1) \right| \right\}; k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{33}. \quad (4.57)$$

Для другого типу дестабілізації діагностична функціональна модель описуватиметься наступним рівнянням:

$$\Delta u_{D_2}(k) = u_{02}, \quad (4.58)$$

з якого випливає, що

$$\Delta u_{D_2}(k+1) - \Delta u_{D_2}(k) \approx 0. \quad (4.59)$$

Тоді для встановлення наявності в D_2 другого типу дестабілізації необхідна обробка дискретного різницевого сигналу $\Delta u_{D_2}(k)$ відповідно до рівняння

$$z_{34} = S_2 \left\{ \delta_{34} - \left| \Delta u_{D_2}(k+1) - \Delta u_{D_2}(k) \right| \right\}; k = \overline{k_3, k_4}; \rho_{34}. \quad (4.60)$$

При $z_{34} = 1$ підтверджується наявність у D_2 другого типу дестабілізації, а при $z_{34} = 0$ його відсутності.

Отримані булеві ознаки типів дестабілізації дозволяють доповнити дихотомічне дерево (рис. 4.8) процесом діагностування типів дестабілізації (рис. 4.9).

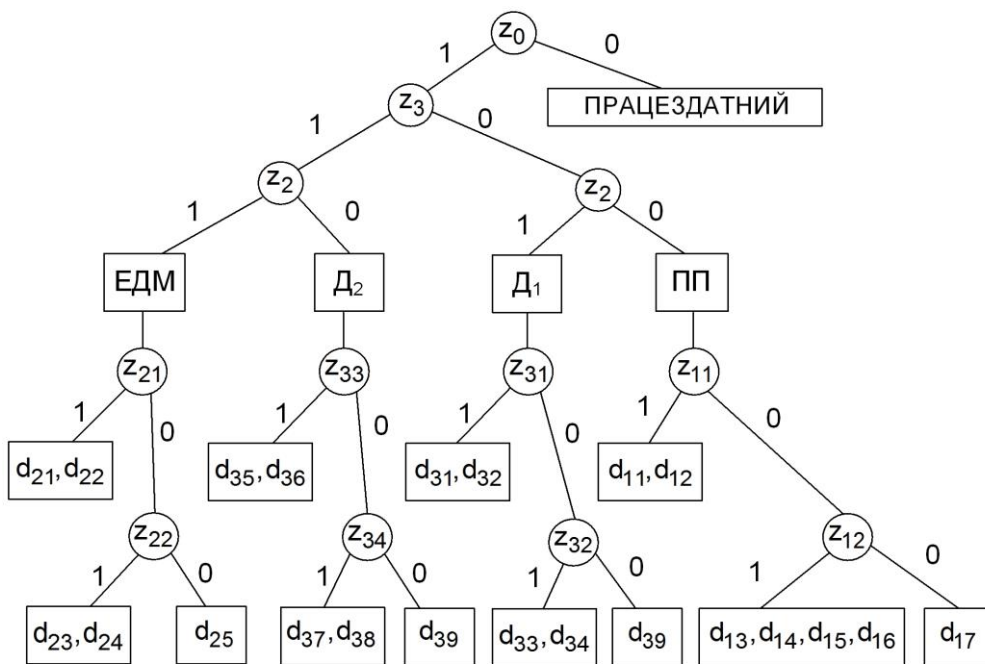


Рисунок 4.9 – Дихотомічне дерево встановлення типів дестабілізації

Представлене дихотомічне дерево дозволяє провести діагностування об'єкта раціонального управління з глибиною до типів дестабілізації. Очевидна реалізація в дереві ієрархічного принципу послідовного зняття невизначеності в непрацездатному об'єкті раціонального управління. Використання на першому рівні булевої ознаки дозволяє виявити непрацездатний стан. За допомогою ознак z_3 та z_2 на другому рівні знаходиться непрацездатний функціональний елемент об'єкта. Використання булевих ознак третього рівня дозволяє встановити тип дестабілізації, що спричинила порушення працездатності функціонального елемента об'єкта раціонального управління.

Визначення конкретного виду дестабілізуючого впливу проводиться на четвертому рівні діагностування за допомогою відповідних булевих ознак.

4.4. Визначення видів дестабілізації

У кожному типі дестабілізації, зазвичай, може бути кілька видів. Для повного діагнозу працездатного об'єкта раціонального управління потрібно визначити конкретну причину – вид дестабілізації функціонального елемента. Розглянемо для кожного з функціональних елементів процедури визначення його видів дестабілізації.

В ПП види дестабілізації d_{11} і d_{12} характеризуються зменшенням коефіцієнта підсилення та діагностична функціональна модель

$$\Delta u_{\text{пп}}(k) = \Delta k_{\text{пп}} u(k) \quad (4.61)$$

відбиває зв'язок сигналів з діагностичним параметром $\Delta k_{\text{пп}}$. Для того, щоб з'ясувати, який вид дестабілізації в даний момент відбувся в ПП, необхідно отримати чисельну оцінку параметра $\Delta k_{\text{пп}}$. Оскільки при вимірюванні сигналів $\Delta u_{\text{пп}}(k)$ і $u(k)$ можливі помилки вимірювання і перешкоди, а числове значення $k_{\text{пп}}$, що використовується в розрахунках, отримано в результаті лінеаризації, то для отримання чисельної оцінки $\Delta k_{\text{пп}}$ використовуємо відомі методи ідентифікації діагностичних параметрів [28]. У результаті вимірювання $m+1$ дискретних значень сигналів отримуємо таке векторне рівняння:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{\text{пп}}(k) \\ \Delta u_{\text{пп}}(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta u_{\text{пп}}(k+m) \end{bmatrix} = \Delta k_{\text{ум}} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ u(k+m) \end{bmatrix} \quad \text{або } v(k) = \Delta k_{\text{пп}} s(k). \quad (4.62)$$

Відповідно до методу найменших квадратів при пакетній обробці значень сигналів отримуємо такий алгоритм чисельної оцінки ознаки $\Delta k_{\text{пп}}$:

$$\Delta \hat{k}_{\text{пп}} = [s^T(k)]^{-1} s^T(k) v(k), \quad (4.63)$$

де t – символ транспонування вектору. Оцінка, отримана за допомогою алгоритму, буде оптимальною за квадратичним критерієм нев'язки рівняння (4.61).

Рекурентний метод найменших квадратів дозволяє отримувати поточні значення чисельної оцінки ознаки $\Delta k_{пп}$ за допомогою наступного алгоритму:

$$\Delta \hat{k}_{пп}(k+1) = \Delta \hat{k}_{пп}(k) + \gamma(k) [\Delta u_{пп}(k+1) - \Delta \hat{k}_{пп}(k)u(k)], \quad (4.64)$$

де $\gamma(k)$ – вектор корекції збіжності алгоритму.

Простіші алгоритми отримання чисельних значень оцінки можна отримати, використовуючи співвідношення

$$\frac{\Delta u_{пп}(k+1)}{u(k+1)} = \frac{\Delta u_{пп}(k)}{u(k)}, \quad (4.65)$$

з якого випливає, що

$$\Delta \hat{k}_{пп} = \frac{\Delta u_{пп}(k+1)u(k)}{u(k+1)\Delta u_{пп}(k)}. \quad (4.66)$$

Цей алгоритм попарної обробки дискретних вимірювань можна розширити на весь інтервал вимірювань.

Хороші оцінки можна отримати і за допомогою середньоарифметичного алгоритму

$$\Delta \hat{k}_{пп} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta u_{пп}(k)}{u(k)} \quad (4.67)$$

у режимі пакетної обробки дискретних значень вимірювань сигналів.

Після отримання чисельної оцінки діагностичної ознаки $\Delta \hat{k}_{пп}$ формується аргумент для двозначного предикатного рівняння. Використовуючи граничне значення діагностичної ознаки – $\Delta \bar{k}_{пп}$, що розділяє види дестабілізації d_{11} і d_{12} , можна сформулювати два вирази для предикатного рівняння

$$\Delta \bar{k}_{пп} - \Delta \hat{k}_{пп} \text{ и } \Delta \hat{k}_{пп} - \Delta \bar{k}_{пп}.$$

Тоді для визначення виду d_{11}

$$z_{111} = S_2 \{ \Delta \bar{k}_{пп} - \Delta \hat{k}_{пп} \}, \quad (4.68)$$

а для визначення виду d_{12}

$$z_{122} = S_2 \{ \Delta \hat{k}_{пп} - \Delta \bar{k}_{пп} \}. \quad (4.69)$$

Так як видів дестабілізації два, то можна використовувати одне двозначне предикатне рівняння, що дає два значення булевої ознаки, що достатньо для визначення d_{11} або d_{12} .

Для видів дестабілізації d_{13} , d_{14} , d_{15} та d_{16} діагностична функціональна модель ПП буде наступною:

$$\Delta u_{\text{пп}}(k) = u_0. \quad (4.70)$$

Визначити види дестабілізації можна лише за допомогою чисельної оцінки дрейфу \hat{u}_0 та граничного значення дрейфу \bar{u}_0 , що поділяє два види дестабілізації. Числове значення оцінки дрейфу можна отримати за допомогою середньоарифметичного алгоритму

$$\hat{u}_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_{\text{пп}}(k) \quad (4.71)$$

у режимі пакетної обробки дискретних значень різницевого сигналу $\Delta u_{\text{пп}}(k)$.

Отримане чисельне значення оцінки дрейфу \hat{u}_0 і граничне значення дрейфу \bar{u}_0 дозволяють сформулювати аргументи відповідних двозначних предикатних рівнянь. Так, для видів некомпенсованого дрейфу нуля d_{14} і d_{16} : $\bar{u}_0 - |\hat{u}_0|$, а для видів компенсованого дрейфу d_{13} і d_{15} : $\hat{u}_0 > \delta_0$.

Тоді двоцифрові предикатні рівняння для булевих ознак визначення видів d_{14} і d_{16}

$$z_{121} = S_2 \{ \bar{u}_0 - |\hat{u}_0| \}, \quad (4.72)$$

а для видів d_{13} та d_{15}

$$z_{122} = S_2 \{ \hat{u}_0 > \delta_0 \}, \quad (4.73)$$

де δ_0 – порогове значення.

Вид дестабілізуючого впливу d_{17} визначається за умови, що булева ознака $z_{12} = 0$.

В ЕДМ визначено три типи дестабілізації. Для визначення видів дестабілізуючих впливів d_{23} та d_{24} першого типу потрібне чисельне значення діагностичного параметра Δk_B . Чисельне значення оцінки $\Delta \hat{k}_B$ можна отримати за допомогою ідентифікаційної обробки дискретних сигналів рівняння

$$\Delta u_{d1}(k+1) - \left(1 - \frac{k_B T_0}{J} \right) \Delta u_{d1}(k) = -\Delta k_B \frac{k_{d1} T_0}{J} \hat{x}_1(k). \quad (4.74)$$

Якщо використовувати m дискретних значень сигналів, то отримаємо m рівнянь. Позначивши векторний масив лівої частини рівняння символом $p(k)$, а масив у правій – $q(k)$, тоді

$$p(k) = -\Delta\kappa_B q(k). \quad (4.75)$$

Для пакетної обробки отриманих масивів застосуємо метод найменших квадратів, відповідно до якого

$$\Delta\hat{\kappa}_B = [q^T(k)q(k)]^{-1} q^T(k)p(k). \quad (4.76)$$

Поточне значення чисельної оцінки діагностичної ознаки $\Delta\hat{\kappa}_B(k)$ можна отримати за допомогою рекурентного алгоритму

$$\Delta\hat{\kappa}_B(k+1) = \Delta\hat{\kappa}_B(k) + \gamma(k)[p_1(k) + \Delta\hat{\kappa}_B(k)q_1(k)], \quad (4.77)$$

де $p_1(k)$ і $q_1(k)$ – перші компоненти векторів $p(k)$ та $q(k)$.

Для отримання середньоарифметичної оцінки діагностичної ознаки $\Delta\kappa_B$ слід скористатися формулою для отримання дискретних оцінок

$$\Delta\kappa_B(k+1) = \frac{[\Delta u_{D1}(k+1) - a\Delta u_{D1}(k)]J}{\hat{u}_{D1}(k)T_0}, \quad (4.78)$$

де $a = \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{J}\right)$; $\hat{u}_{D1}(k) = \kappa_{D1} \hat{x}(k)$.

Тоді середньоарифметична оцінка

$$\Delta\hat{\kappa}_B = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta\kappa_B(k+1). \quad (4.79)$$

Знання граничного значення $\Delta\bar{\kappa}_B$, що розділяє види дестабілізації d_{23} і d_{24} , та поточної оцінки діагностичної ознаки $\Delta\hat{\kappa}_B$ дозволяє сформулювати двозначні предикатні рівняння для відповідних булевих ознак.

$$z_{223} = S_2 \{\Delta\bar{\kappa}_B - \Delta\hat{\kappa}_B\}; \quad z_{224} = S_2 \{\Delta\hat{\kappa}_B - \Delta\bar{\kappa}_B\}. \quad (4.80)$$

Для визначення видів дестабілізації d_{21} і d_{22} першого типу необхідні числові оцінки зміни коефіцієнта передачі $\Delta\kappa_M$. Ці оцінки можна отримати, використовуючи такий вираз

$$\Delta u_{D1}(k+1) - a\Delta u_{D1}(k) - b\Delta u_{D2}(k) = c\Delta\kappa_M \hat{u}_{D2}(k), \quad (4.81)$$

де $a = \left(1 - \frac{\kappa_B T_0}{J}\right)$; $b = \frac{\kappa_{D1} \kappa_M T_0}{J \kappa_{D2}}$; $c = \frac{\kappa_{D1} T_0}{\kappa_{D2} J}$;

$\hat{u}_{D2}(k)$ – вихідний сигнал з датчика D_2 еталонної моделі.

При використанні m значень сигналів отримуємо m рівнянь. Якщо позначити векторний масив лівої частини рівняння як $g(k)$, а масив правої частини – $h(k)$, то отримуємо векторне рівняння

$$g(k) = \Delta k_M h(k). \quad (4.82)$$

Метод найменших квадратів дозволяє отримати оцінку діагностичної ознаки за допомогою такого виразу

$$\Delta \hat{k}_M = [h^T(k)h(k)]^{-1} h^T(k)g(k) \quad (4.83)$$

або за допомогою рекурентного алгоритму

$$\Delta k_M(k+1) = \Delta k_M(k) + \gamma(k)[g_1(k) - \Delta k_M h_1(k)], \quad (4.84)$$

де $g_k(k)$ і $h_k(k)$ – покрокові компоненти векторів $g(k)$ та $h(k)$.

Для отримання середньоарифметичної оцінки діагностичної ознаки Δk_M , виходячи з рівняння (4.74) обчислюються його значення $\Delta k_M(k+1)$ і тоді

$$\Delta \hat{k}_M = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta k_M(k+1). \quad (4.85)$$

Види дестабілізації поділяє граничне значення діагностичної ознаки $\Delta \bar{k}_M$. Отриману оцінку ознаки $\Delta \hat{k}_M$ можна віднести до виду d_{21} або d_{22} за допомогою булевих ознак:

$$z_{211} = S_2 \{ \Delta \bar{k}_M - \Delta \hat{k}_M \}; \quad z_{212} = S_2 \{ \Delta \hat{k}_M - \Delta \bar{k}_M \}. \quad (4.86)$$

Невідомий вид дестабілізації d_{25} встановлюється тоді, коли $z_{211} = z_{212} = z_{223} = z_{224} = 0$.

Непрацездатність датчика D_1 викликають види дестабілізуючих впливів з множини D'_3 (4.42). Перший тип цих впливів пов'язаний із зменшенням коефіцієнта передачі k_{D1} та описується рівнянням

$$\Delta u_{D1}(k) = \Delta k_{D1} \hat{x}_1(k). \quad (4.87)$$

Для розпізнавання видів дестабілізації d_{31} і d_{32} необхідно чисельне значення діагностичної ознаки цього типу, тобто Δk_{D1} . Оцінку ознаки можна отримати, опрацьовуючи масиви доступних цифрових сигналів за допомогою відповідних методів ідентифікації. Так, в результаті одержання $m+1$ дискретних значень сигналів можна записати наступне рівняння

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{d_1}(k) \\ \Delta u_{d_1}(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta u_{d_1}(k+m) \end{bmatrix} = \Delta k_{d_1} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(k) \\ \hat{x}_1(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{x}_1(k+m) \end{bmatrix} \quad \text{або } a(k) = \Delta k_{d_1} b(k). \quad (4.88)$$

При обробці цих масивів за допомогою методу найменших квадратів отримуємо

$$\Delta \hat{k}_{d_1} = [b^T(k)b(k)]^{-1} b^T(k)a(k). \quad (4.89)$$

Рекурентний метод найменших квадратів дозволяє отримати покрокові взаємопов'язані оцінки за допомогою такого алгоритму

$$\Delta \hat{k}_{d_1}(k+1) = \Delta \hat{k}_{d_1}(k) + \gamma(k) [\Delta u_{d_1}(k+1) - \Delta \hat{k}_{d_1}(k) \hat{x}_1(k)]. \quad (4.90)$$

Покрокові не пов'язані оцінки $\Delta k_{d_1}(k)$ можна отримати розподілом $\Delta u_{d_1}(k)$ на $\hat{x}_1(k)$, і тоді середньоарифметична оцінка обчислюватиметься так:

$$\Delta \hat{k}_{d_1} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta k_{d_1}(k). \quad (4.91)$$

Розпізнати види дестабілізації d_{31} і d_{32} можна за допомогою наступних булевих ознак:

$$z_{311} = S_2 \{ \Delta \bar{k}_{d_1} - \Delta \hat{k}_{d_1} \}; \quad z_{312} = S_2 \{ \Delta \hat{k}_{d_1} - \bar{k}_{d_1} \}, \quad (4.92)$$

тут \bar{k}_{d_1} – граничне значення.

Другий тип дестабілізації включає види дестабілізації d_{33} і d_{34} та описується рівнянням

$$\Delta u_{d_1}(k) = u_{01}. \quad (4.93)$$

Найпростішу чисельну оцінку діагностичної ознаки u_{01} можна отримати як середньоарифметичне значення різницевого сигналу

$$\hat{u}_{01} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_{d_1}(k). \quad (4.94)$$

Для розпізнавання невідновлюваної величини дрейфу нуля – виду d_{34} можна використовувати булеву ознаку

$$z_{321} = S_2 \{ \hat{u}_{01} - \bar{u}_{01} \}, \quad (4.95)$$

де \bar{u}_{01} – граничне значення.

Для відновлюваного виду d_{33} необхідне знання знаку дрейфу за допомогою булевої ознаки

$$z_{322} = S_2 \{ \hat{u}_{01} > \delta_{01} \}, \quad (4.96)$$

тут δ_{01} – граничне значення.

Вид дестабілізації d_{39} фіксується, коли не встановлені види дестабілізації d_{31} , d_{32} , d_{33} і d_{34} .

Види дестабілізації з множини D'_3 (4.52) характеризують непрацездатність датчика D_2 . Перший тип дестабілізації описується рівнянням

$$\Delta u_{D_2}(k) = \Delta k_{D_2} \hat{x}_2(k), \quad (4.97)$$

за допомогою якого можна отримати оцінку діагностичної ознаки Δk_{D_2} , обробляючи $m+1$ дискретних значень сигналів рівняння з векторним поданням масивів даних

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{D_2}(k) \\ \Delta u_{D_2}(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta u_{D_2}(k+m) \end{bmatrix} = \Delta k_{D_2} \begin{bmatrix} \hat{x}_2(k) \\ \hat{x}_2(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{x}_2(k+m) \end{bmatrix} \quad \text{або } c(k) = \Delta k_{D_2} d(k). \quad (4.98)$$

При пакетній обробці масивів методом найменших квадратів

$$\Delta \hat{k}_{D_2} = [d^T(k) d(k)]^{-1} d^T(k) c(k). \quad (4.99)$$

При покроковій обробці

$$\Delta \hat{k}_{D_2}(k+1) = \Delta \hat{k}_{D_2}(k) + \gamma(k) [\Delta u_{D_2}(k+1) - \Delta \hat{k}_{D_2} \hat{x}_2(k)]. \quad (4.100)$$

Середньоарифметична оцінка

$$\Delta \hat{k}_{D_2} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta u_{D_2}(k)}{\hat{x}_2(k)}. \quad (4.101)$$

Види дестабілізації d_{35} і d_{36} розпізнаються за допомогою таких булевих ознак

$$z_{331} = S_2 \{ \Delta \bar{k}_{D_2} - \Delta \hat{k}_{D_2} \}; \quad z_{332} = S_2 \{ \Delta \hat{k}_{D_2} - \Delta \bar{k}_{D_2} \}. \quad (4.102)$$

Дрейф нуля входить у другий тип дестабілізації та описується рівняннями

$$\Delta u_{D_2}(k) = u_{02}, \quad (4.103)$$

з якого середньоарифметична оцінка діагностичної ознаки

$$\hat{u}_{02} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_{d_2}(k). \quad (4.104)$$

Булева ознака z_{341} дозволяє визначити види d_{37} і d_{38} .

$$z_{341} = S_2 \{ \hat{u}_{02} - \bar{u}_{02} \}. \quad (4.105)$$

Знак дрейфу нуля встановлюється за допомогою булевої ознаки

$$z_{342} = S_2 \{ \hat{u}_{02} > \delta_{02} \}. \quad (4.106)$$

Вид дестабілізації d_{39} визначається за умови, що $z_{34} = 0$.

Отримані булеві ознаки видів дестабілізації функціональних елементів об'єкта раціонального управління дозволяють доповнити дихотомічне дерево (рис. 4.9) та отримати дихотомічне дерево повного діагнозу об'єкта (рис. 4.10).

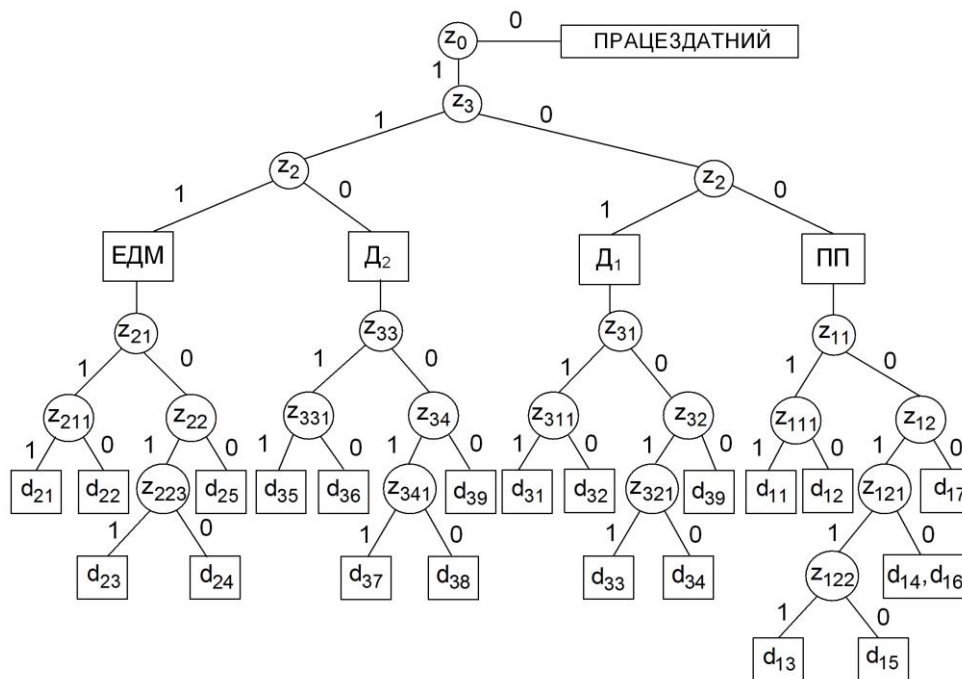


Рисунок 4.10 – Дихотомічне дерево повного діагнозу об'єкта раціонального управління

Сформоване дихотомічне дерево дозволяє з допомогою двадцяти булевих ознак визначити кожен із двадцяти одного видів дестабілізуючих впливів у об'єкті раціонального управління у вигляді умовних переходів по збалансованим гілкам.

Отримані в результаті діагнозу знання конкретних видів дестабілізуючих впливів дозволяють перейти до наступної процедури раціонального управління – відновлення працездатності об'єкта раціонального управління.

Розділ V. РЕАБІЛІТАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТА РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ

*Bene dignoscitur, bene curatur. –
Добре розпізнається, добре лікується
Крилатий латинський вираз*

Слово *реабілітація* походить від пізньолатинського *rehabilitatio*, що означає відновлення. Реабілітаційне забезпечення включає інструментальні засоби та процедури парирування видів дестабілізуючих впливів з метою відновлення працездатності об'єкта раціонального управління.

5.1. Відновлення працездатності підсилювача потужності

Підсилювач потужності входить до складу об'єкта раціонального управління і його дестабілізуючі впливи з множини D_1 викликають порушення працездатності як самого ПП, так і об'єкта раціонального управління. Унаслідок процедур глибокого діагностування (рис. 4.10) вдається діагностувати всі види дестабілізуючих впливів. Завдання відновлення працездатності ПП полягає у виборі таких засобів та процедур, які дозволили б нейтралізувати причини дестабілізації так, щоб оперативно перейти з непрацездатного стану до працездатного.

Для відновлення працездатності ПП можна використовувати такі засоби відновлення працездатності. Перше – це використання додаткового сигналу $u_c(k)$ до вхідного сигналу управління $u(k)$. Величина сигналу $u_c(k)$ залежить від величини оціночного значення відповідної діагностичної ознаки. Такий спосіб відновлення називається сигнальним підстроюванням. За допомогою сигнального підстроювання можна парирувати такі види дестабілізації ПП як d_{11} , d_{13} і d_{15} , пов'язані з компенсованою зміною діагностичних параметрів $\Delta k_{\text{ПП}}$ і u_0 .

Другий засіб відновлення працездатності пов'язаний з використанням коефіцієнта $k_{\text{ПП}}$, що підстроюється, по сигналу $u_{\text{П}}(k)$, що формується виходячи з оцінки діагностичної ознаки $\Delta \hat{k}_{\text{ПП}}$. Такий спосіб відновлення працездатності називається параметричним

підстроюванням. Отже, за допомогою параметричного підстроювання можна нейтралізувати такі види дестабілізації як d_{11} , d_{13} і d_{15} .

Третій засіб відновлення працездатності полягає у використанні резервного ПП за результатами діагнозу, коли неможливо використовувати як сигнальну, так і параметричні підстроювання для нейтралізації видів дестабілізації. Такий засіб відновлення називається реконфігурацією апаратури. Реконфігурація апаратури застосовна для видів дестабілізації d_{12} , d_{14} , d_{16} і d_{17} .

Розподіл засобів відновлення за видами дестабілізації та кількісну оцінку відновлюваності ПП можна подати за допомогою наступної таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

d_{ij}	Засоби відновлення			Рівень
	v_1	v_2	v_3	
d_{11}	1	1		2
d_{12}			1	1
d_{13}	1	1		2
d_{14}			1	1
d_{15}	1	1		2
d_{16}			1	1
d_{17}			1	1
Ранг	3	3	4	

В таблиці: v_1 – засіб сигнального підстроювання; v_2 – засіб параметричного підстроювання та v_3 – реконфігурація апаратури. Символ «1» означає, що вид дестабілізації може бути парируваний засобом v_i , $i = \overline{1,3}$. Кількість «1» у стовпці характеризує ранг засобів відновлення. Кількість «1» у рядку характеризує рівень відновлюваності ПП при появі виду дестабілізації d_{ij} . Чим більший рівень, тим більшою кількістю засобів можна нейтралізувати вид дестабілізації d_{ij} .

Вибір засобу відновлення для поточного діагнозу здійснюється шляхом аналізу рангів засобів відновлення з метою знаходження мінімального [33]. Засіб відновлення з мінімальним рангом і вибирається для парирування поточного виду дестабілізації d_{ij} . Види дестабілізації d_{11} , d_{13} і d_{15} можуть парируватися як засобом v_1 – сигнальним підстроюванням, так і засобом v_2 – параметричним підстроюванням. Розглянемо докладніше особливості сигнального підстроювання.

Отже, при отриманні діагнозу, що працездатність ПП порушено через вид дестабілізації d_{11} , необхідно сформулювати додатковий сигнал

$u_c(k)$. Додатковий сигнал формується на підставі отриманої в результаті діагностування оцінки $\Delta\hat{k}_{\text{ПП}}$ за допомогою рівняння

$$u_c(k) = \Delta\hat{k}_{\text{ПП}} u_y(k) = \Delta u_{\text{ПП}}(k). \quad (5.1)$$

На рис. 5.1 представлена функціональна схема сигнальної компенсації виду дестабілізації d_{11} .

При порушенні працездатності ПП від виду d_{13} формується додатковий сигнал $u_c(k) = -\hat{u}_0$, який чисельно дорівнює різницевому сигналу $-\Delta u_{\text{ПП}}(k)$.

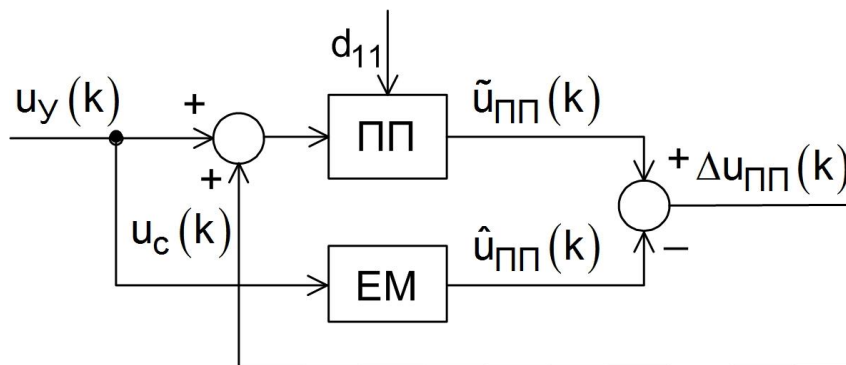


Рисунок 5.1 – Функціональна схема сигнальної компенсації виду дестабілізації d_{11}

На рис. 5.2 зображена функціональна схема сигнального підстроювання ПП при позитивному дрейфі нуля.

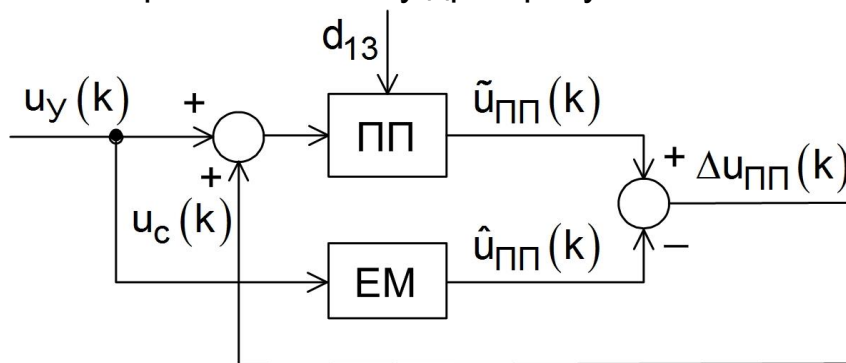


Рисунок 5.2 – Функціональна схема сигнального підстроювання ПП при d_{13}

Якщо вид d_{15} спричинив порушення працездатності, то компенсувати його вплив можна за допомогою додаткового сигналу $u_c(k) = \Delta u_{\text{ПП}}(k)$ відповідно до функціональної схеми (рис. 5.3).

Вид дестабілізації d_{11} може бути компенсований за допомогою параметричного підстроювання. Для реалізації такої схеми необхідно, щоб в ПП була можливість підстроювання коефіцієнта $k_{\text{ПП}}$.

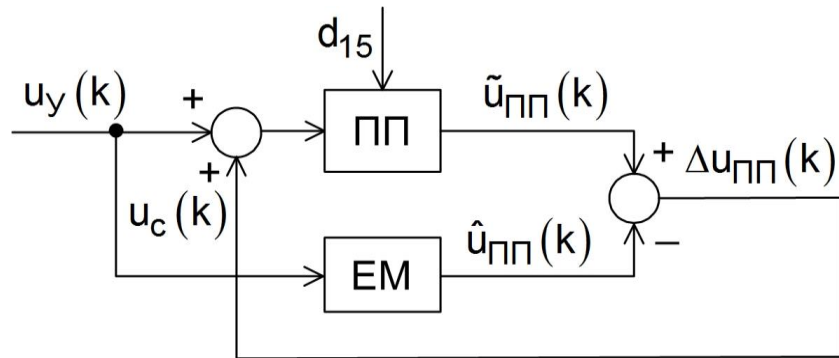


Рисунок 5.3 – Функціональна схема сигнальної компенсації d_{15}

Тоді на схему підстроювання подається різницеий сигнал $\Delta u_{\text{ПП}}(k)$, який забезпечить таке збільшення $k_{\text{ПП}}$, що призведе до відновлення вихідного сигналу $\tilde{u}_{\text{ПП}}(k)$ до значення $\hat{u}_{\text{ПП}}(k)$ (рис. 5.4).

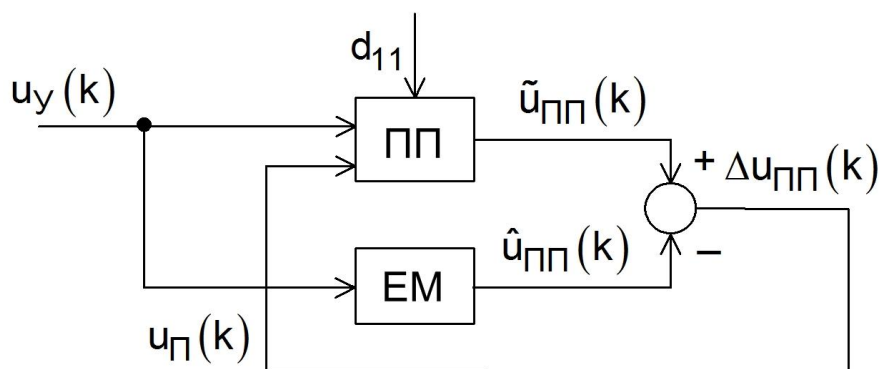


Рисунок 5.4 – Функціональна схема параметричної компенсації d_{11}

Аналогічно виглядатимуть функціональні схеми параметричної компенсації видів дестабілізації d_{13} і d_{15} .

При видах дестабілізації d_{12} , d_{14} , d_{16} і d_{17} використовують третій засіб відновлення працездатності – реконфігурація апаратури.

Для забезпечення відновлюваності об'єкта раціонального управління при відмові ПП передбачено наявність резервних ПП, які можуть функціонувати як у «гарячому», так і в «холодному» режимах. При відмові основного ПП проводиться відключення його живлення, а також вхідних і вихідних сигналів, тобто, виконується ізоляція від контуру управління. Після цього підключається резервний підсилювач потужності

ПП_Р. Можлива функціональна схема такої реконфігурації представлена на рис. 5.5.

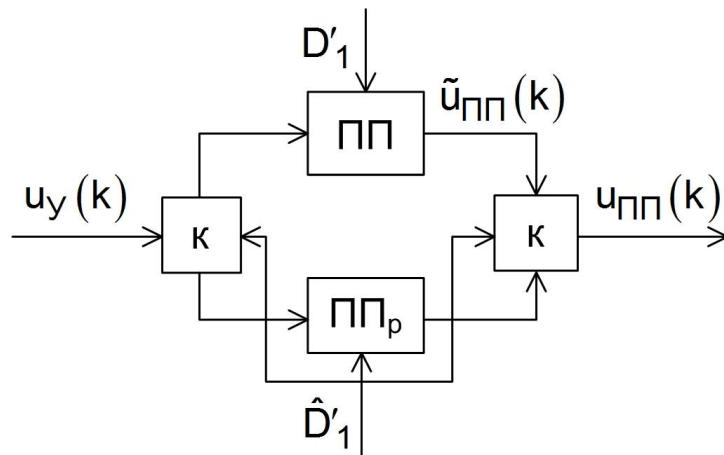


Рисунок 5.5 – Функціональна схема реконфігурації ПП

У представленій схемі множина $D'_1 = \{d_{12}, d_{14}, d_{16}, d_{17}\}$; К – комутатори. Входом для к є результат діагнозу про види дестабілізуючих впливів d_{12} , d_{14} , d_{16} і d_{17} , що свідчить про невідновлювану працездатність ПП за допомогою засобів сигнального та параметричного підстроювань.

Представимо загальну функціональну схему відновлення працездатності ПП для всіх видів дестабілізації з множини D'_1 (рис. 5.6).

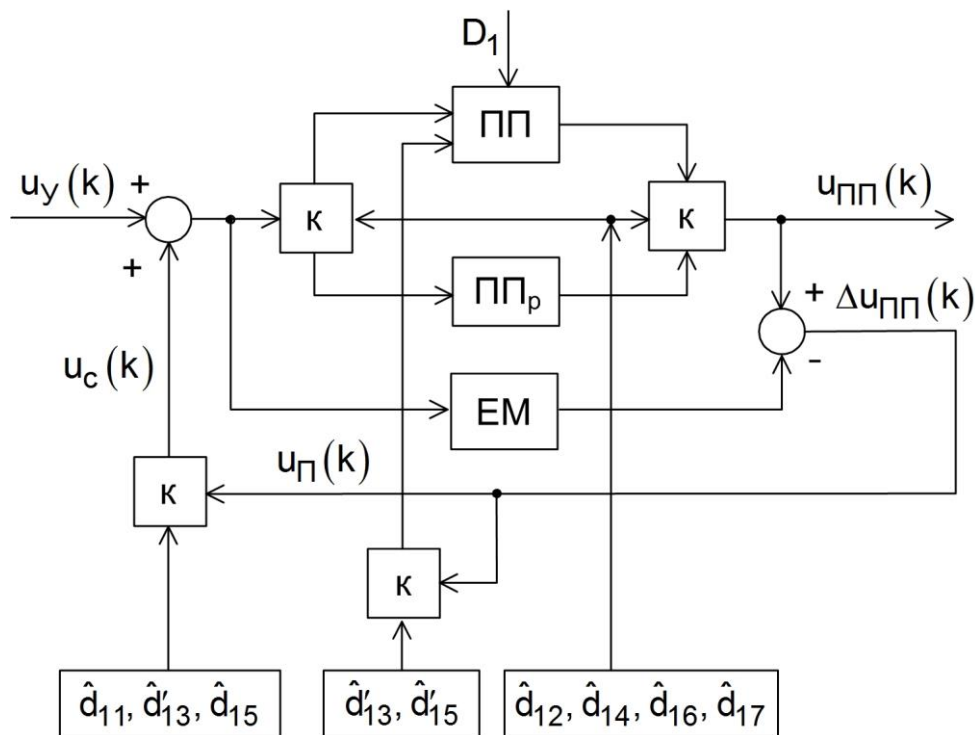


Рисунок 5.6 – Функціональна схема відновлення працездатності ПП за результатами діагнозу

Комутатори К підключають відповідні сигнали для відновлення працездатності ПП за результатами діагнозу. Так, коли в результаті діагностування буде встановлений вид дестабілізації d_{11} , або d_{13} , або d_{15} , підключається різницевий сигнал $\Delta u_{\text{ПП}}(k)$ до другого входу суматора $u_C(k)$ для сигнального підстроювання ПП. При цьому для виду d'_{13} потрібно інвертувати різницевий сигнал.

При діагностуванні видів d_{13} и d_{15} підключається різницевий сигнал $\Delta u_{\text{ПП}}(k)$ для параметричної компенсації порушення працездатності ПП. При некомпенсованих видах дестабілізації працездатності ПП d_{12} , d_{14} , d_{16} , d_{17} за допомогою комутаторів К проводиться заміна основного ПП на резервний ПП_Р і таким чином здійснюється відновлення працездатності цього функціонального елемента об'єкта раціонального управління.

Після процедур відновлення працездатності ПП проводиться його глибоке діагностування як підтвердження факту повного відновлення його працездатності, так і виявлення причин не повного парирування видів дестабілізації. Іншими словами, процес відновлення працездатності може мати ітераційний характер.

5.2. Відновлення працездатності електродвигуна-маховика

Порушення працездатності ЕДМ викликано видами дестабілізації з множини D_2 . Це зменшення коефіцієнта передачі – види d_{21} і d_{22} , збільшення часу перехідного процесу – види d_{23} і d_{24} , а також невідомий вид дестабілізації d_{25} . Процес глибокого діагностування дозволяє визначити усі види дестабілізації з множини D_2 . Відновлення працездатності ЕДМ полягає у нейтралізації причин видів дестабілізації надлишковими засобами, а у випадках їх некомпенсованості – відключення ЕДМ.

Розглянемо засоби та процедури відновлення працездатності ЕДМ для кожного виду дестабілізації за допомогою таблиці відновлюваності.

В таблиці представлені такі засоби відновлення. v_1 – сигнальне підстроювання зменшення коефіцієнта k_M ; v_2 – реконфігурація алгоритму управління ЕДМ; v_3 – реконфігурація апаратури.

Таблиця 5.2

d_{ij}	Засоби відновлення			Рівень
	v_1	v_2	v_3	
d_{21}	1			1
d_{22}			1	1
d_{23}		1		1
d_{24}			1	1
d_{25}			1	1
Ранг	1	1	3	

Рівень представлених засобів відновлення працездатності ЕДМ низький і дорівнює 1. Найвищий ранг дорівнює 3 та пов'язаний з відключенням ЕДМ. Для забезпечення умов тривалого функціонування ЕДМ необхідно розширювати кількість засобів відновлення і підвищувати їх ранг. У пірамідальній схемі розміщення ЕДМ такі можливості існують. У цьому поданні розглядається лише

один канал управління вектором кінетичної енергії.

Необхідності вибору засобів відновлення в даній ситуації немає, оскільки засоби відновлення v_1 і v_2 мають однаковий ранг рівний 1.

Розглянемо можливість відновлення працездатності ЕДМ при виявленому у процесі діагностування вигляді дестабілізації d_{21} . Зменшення коефіцієнта k_M можна компенсувати, якщо дозволяє діапазон зміни управляючого сигналу, за допомогою додаткового сигналу. Додатковий сигнал управління можна визначити, скориставшись передавальними функціями об'єкта автоматичного управління (3.22), (3.23), (3.26). Отже, передавальна функція (3.22) при умові, що $\frac{L}{R} \ll \frac{J}{K_B}$,

буде наступною:

$$W_1(s) = \frac{U_{D_1}(s)}{U_y(s)} = \frac{k_{D_1} k_M k_{ПП}}{k_B R \left(\frac{J}{k_B} s + 1 \right)}. \quad (5.1)$$

У часовій області зв'язок сигналів описується таким рівнянням:

$$\dot{u}_{D_1}(t) = -\frac{k_B}{J} u_{D_1}(t) + \frac{k_{D_1} k_M k_{ПП}}{JR} u_y(t). \quad (5.2)$$

При квантуванні сигналів отримаємо рівняння виду:

$$u_{D_1}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J} \right) u_{D_1}(k) + \frac{k_{D_1} k_M k_{ПП} T_0}{JR} u_y(k). \quad (5.3)$$

Управління збуреного руху при $\tilde{k}_M = k_M - \Delta k_M$ буде наступним

$$\Delta u_{D_1}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J} \right) \Delta u_{D_1}(k) - \frac{k_{D_1} \Delta k_M k_{ПП} T_0}{JR} u_y(k). \quad (5.4)$$

Для розуміння можливості відновлення працездатності ЕДМ при виді дестабілізації d_{21} за допомогою сигнального підстроювання, розглянемо фрагменти статичних характеристик об'єкта раціонального управління на інтервалі можливого відновлення (рис. 5.7).

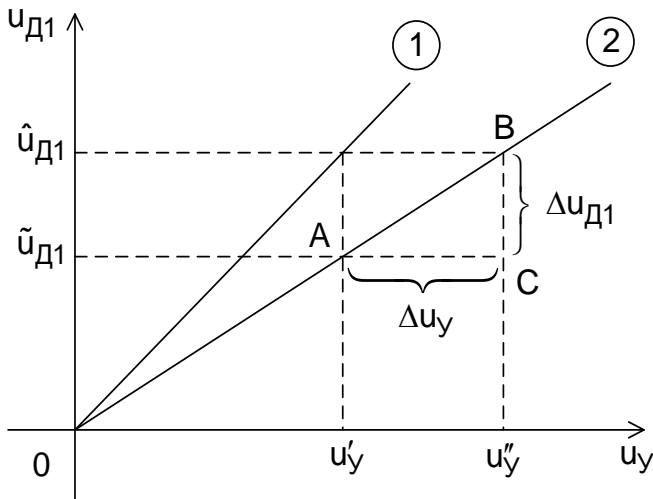


Рисунок 5.7 – Фрагмент статичних характеристик ОРУ

На рисунку під номером 1 представлено штатну номінальну статичну характеристику ОРУ, а під номером 2 – нештатну статичну характеристику. Для відновлення робочої точки (u_y', \hat{u}_{D1}) необхідно подати додатковий сигнал управління величиною Δu_{D1} . Додатковий сигнал управління пов'язаний з доступним сигналом Δu_{D1} таким співвідношенням у

прямокутному трикутнику ABC:

$$\Delta u_y = \frac{\Delta u_{D1}}{\tilde{k}}, \quad (5.5)$$

де \tilde{k} – коефіцієнт передачі послідовного з'єднання ПП+ЕДМ+ D_1 у нештатному режимі, викликаним видом дестабілізації d_{21} . Виходячи з рівняння (5.4), сигнал підстроювання можна сформулювати з урахуванням співвідношення (5.5) за допомогою такого рівняння:

$$u_C(k+1) = \frac{\left[\Delta u_{D1}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J} \right) \Delta u_{D1}(k) \right] J R}{k_{D1} \tilde{k}_M k_{ПП} T_0}. \quad (5.6)$$

Функціональну схему сигнального підстроювання ЕДМ при d_{21} можна представити наступним чином (рис. 5.8).

У представленій схемі ПЕ – перетворювальний елемент, що реалізує рівняння (5.6).

Вид дестабілізації ЕДМ d_{23} призводить до зміни діагностичного параметра k_B . Перетворювальні властивості об'єкта автоматичного управління описуються в термінах передавальних функцій таким виразом:

$$W_1(s) = \frac{U_{D_1}(s)}{U_y(s)} = \frac{\kappa}{Ts + 1}, \quad (5.7)$$

$$\text{де } \kappa = \frac{\kappa_{D_1} \kappa_M \kappa_{ПП}}{\kappa_B R}; \quad T = \frac{J}{\kappa_B}.$$

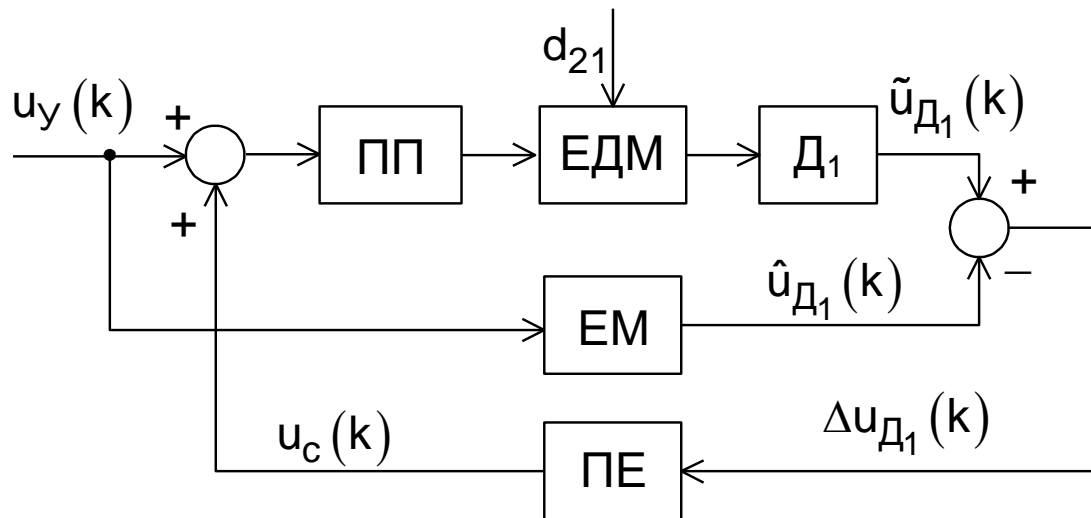


Рисунок 5.8 – Функціональна схема сигнального підстроювання ЕДМ при d_{21}

Зміна діагностичного параметра κ_B спричиняє зміни інерційних властивостей об'єкта управління. Постійна часу T нелінійним чином залежить від κ_B . Розкладемо у ряд Тейлора цю нелінійну функцію:

$$\tilde{T} = T - \frac{J}{\kappa_B^2} \Delta \kappa_B + \frac{2J}{\kappa_B^3} \Delta \kappa_B^2 + \dots \quad (5.8)$$

Обмежившись членами першого порядку малості, отримаємо:

$$\Delta T = -\frac{J}{\kappa_B^2} \Delta \kappa_B. \quad (5.9)$$

Тоді збурений рух об'єкта управління можна описати передавальною функцією

$$\tilde{W}_1(s) = \frac{U_{D_1}(s)}{U_y(s)} = \frac{\kappa}{(T + \Delta T)s + 1}. \quad (5.10)$$

Якщо поліном знаменника уявити добутком таких біноміальних виразів

$$(Ts + 1)(\Delta Ts + 1), \quad (5.11)$$

добуток яких

$$T\Delta Ts^2 + (T + \Delta T)s + 1 \quad (5.12)$$

можна спростити з урахуванням того, що $T\Delta T \ll T + \Delta T$. При цьому передавальну функцію збуреного руху об'єкта управління можна представити як

$$\tilde{W}_1(s) = \frac{\tilde{U}_{Д1}(s)}{U_y(s)} = \frac{k}{(Ts + 1)(\Delta Ts + 1)}. \quad (5.13)$$

Виходячи з виразу цієї передавальної функції очевидно, що для відновлення функціональних властивостей об'єкта раціонального управління необхідно ввести в контур управління форсуючий коригуючий елемент першого порядку з передавальною функцією

$$W_{кЭ}(s) = \frac{U_1(s)}{U_y(s)} = \Delta Ts + 1. \quad (5.14)$$

Добуток передавальних функцій (5.13) и (5.14)

$$\tilde{W}_1(s)W_{кЭ}(s) = \frac{U_{Д1}(s)}{U_y(s)} = \frac{k(\cancel{\Delta Ts + 1})}{(Ts + 1)(\cancel{\Delta Ts + 1})} = \frac{k}{(Ts + 1)} \quad (5.15)$$

свідчить про можливість відновлення працездатності об'єкта раціонального управління при виді дестабілізації d_{23} .

При цифровій реалізації формуючого коригуючого елемента першого порядку необхідно використовувати рекурентне рівняння виду

$$u_1(k + 2) = \frac{\Delta T}{T_0} u_y(k + 1) + \left(1 - \frac{\Delta T}{T_0}\right) u_y(k) \quad (5.16)$$

або з урахуванням величини оцінки діагностичної ознаки

$$u_1(k + 2) = \frac{\Delta T}{T_0} u_y(k + 1) + \left(1 - \frac{J\Delta\hat{k}_B}{T_0 k_B^2}\right) u_y(k). \quad (5.17)$$

Оціночні значення $\Delta\hat{k}_B$, описані формулами (4.76), (4.77) і (4.79) та виходять на етапі діагностування при визначенні видів дестабілізації.

Відновлення працездатності об'єкта раціонального управління, що пов'язане зі зміною алгоритму управління, є таким засіб відновлення як реконфігурація алгоритмів.

Відобразимо особливості такого відновлення працездатності за допомогою функціональної схеми (рис. 5.9).

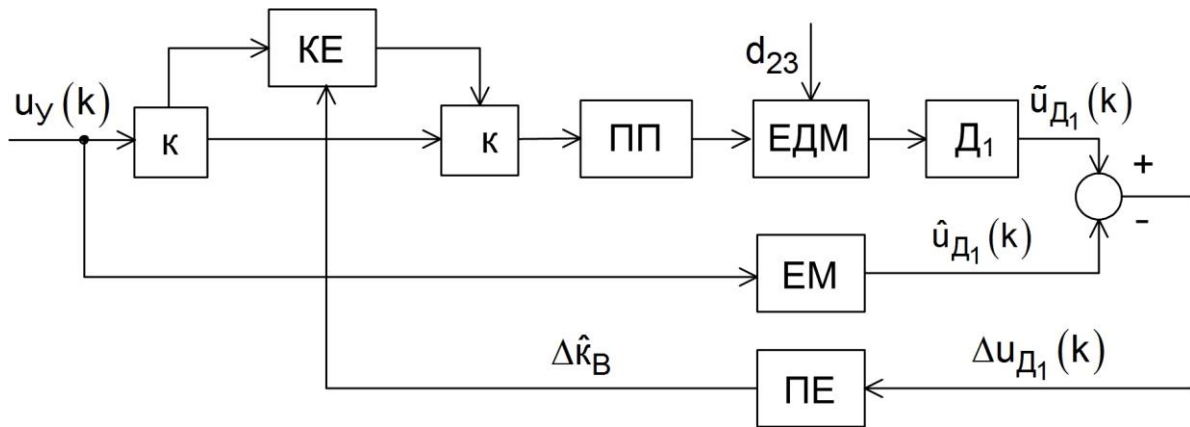


Рисунок 5.9 – Функціональна схема реконфігурації алгоритмів управління ЕДМ при d_{23}

У представленій функціональній схемі використовуються комутатори $к$ для підключення коригуючого алгоритму управління. Формування оцінки $\Delta \hat{k}_B$ проводиться за допомогою перетворювального елемента ПЕ, що перетворює різницевий сигнал $\Delta u_{D_1}(k)$ в оцінювальне значення діагностичної ознаки. Через кілька ітерацій відповідно до рівняння (5.17) відбудеться повна компенсація наслідків від виду дестабілізації d_{23} .

Види дестабілізації d_{22} , d_{24} і d_{25} пов'язані з такими непрацездатним станом ЕДМ, який не можна відновити за допомогою засобів відновлення v_1 – сигнальним підстроюванням і v_2 – реконфігурацією алгоритмів. Наявність цих видів дестабілізації в об'єкті раціонального управління призводить до необхідності його виведення із процесу функціонування в блоці ЕДМ. Для виведення об'єкта раціонального управління з експлуатації необхідно перш за все відключити сигнал управління $u_y(k)$ та сигнал виходу $u_{D_1}(k)$, а потім відключити живлення функціональних елементів. На рис. 5.10 укрупнено представлено функціональну схему відключення об'єкта раціонального управління від процесу функціонування в блоці ЕДМ.

Для ухвалення іншого рішення щодо відновлення працездатності ЕДМ при виявленому виді дестабілізації \hat{d}_{25} потрібна додаткова інформація. Ця інформація може бути отримана під час аналізу величини $\Delta u_{D_1}(k)$.

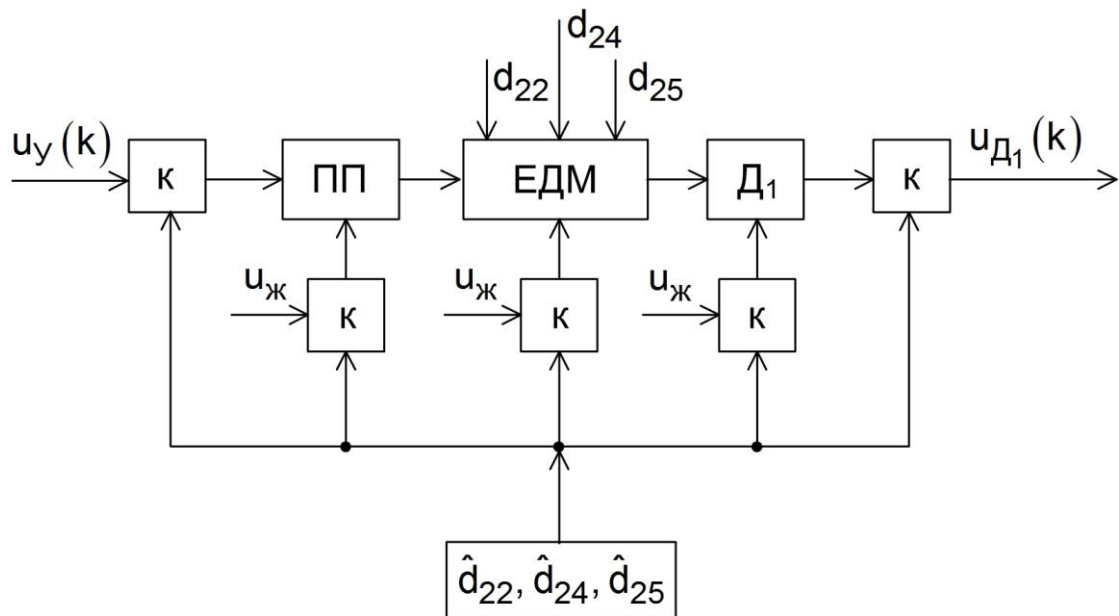


Рисунок 5.10 – Функціональна схема відключення об'єкта раціонального управління при d_{22} і d_{24}

Для встановлення величини $\Delta \hat{u}_{D1}(k)$ можна скористатися середньоарифметичною оцінкою

$$\Delta \hat{u}_{D1} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_D(k). \quad (5.18)$$

Виходячи з функціональних можливостей сигнального підстроювання, встановлюється порогове значення $\Delta \bar{u}_{D1}$, при якому, якщо $\Delta \hat{u}_{D1} \leq \bar{u}_{D1}$, тоді підключається контур додаткового сигналу, що компенсує поточну різницю $\Delta u_D(k)$.

Якщо $\Delta \hat{u}_{D1} > \bar{u}_{D1}$, тоді об'єкт раціонального управління виводиться з експлуатації. Таку класифікацію невизначеного виду дестабілізації d_{25} можна проводити за допомогою двозначного предикату.

$$z_{251} = S_2 \{ \Delta \bar{u}_{D1} - \Delta \hat{u}_D \}. \quad (5.19)$$

При $z_{251} = 1$ відновлення проводиться за допомогою додаткового сигналу

$$u_C(k) = \Delta \hat{u}_D \quad (5.20)$$

відповідно до функціональної схеми (рис. 5.11).

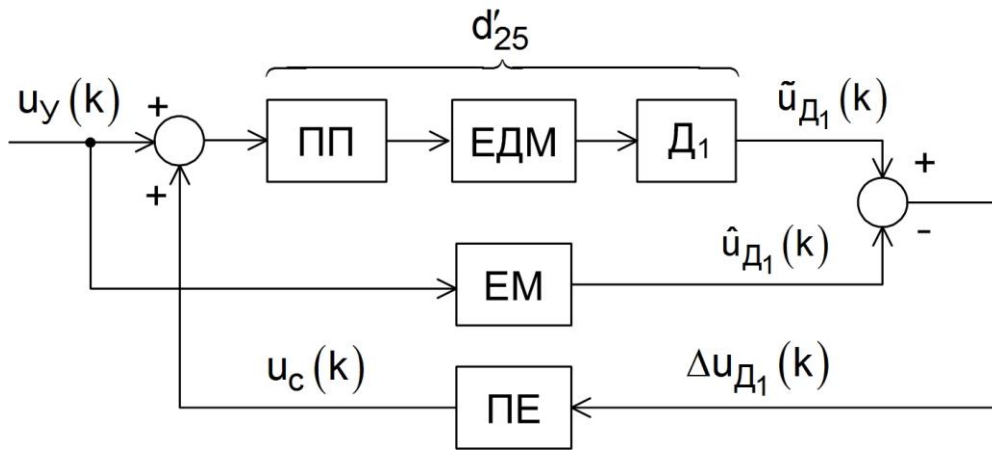


Рисунок 5.11 – Функціональна схема сигнального підстроювання об'єкта раціонального управління при d'_{25}

Вид дестабілізації d'_{25} – це компенсований вид дестабілізації. ПЕ – перетворювальний елемент, у даному випадку здійснює обробку різницевого сигналу $\Delta u_{D_1}(k)$ відповідно до виразів (5.18), (5.19) и (5.20).

При $z_{251} = 0$ виконується виведення ЕДМ з експлуатації за допомогою відключення сигналів управління $u_y(k)$ та виходу датчика $\tilde{u}_{D_1}(k)$, а також відключенням живлення всіх функціональних елементів об'єкта раціонального управління відповідно до функціональної схеми (рис. 5.12).

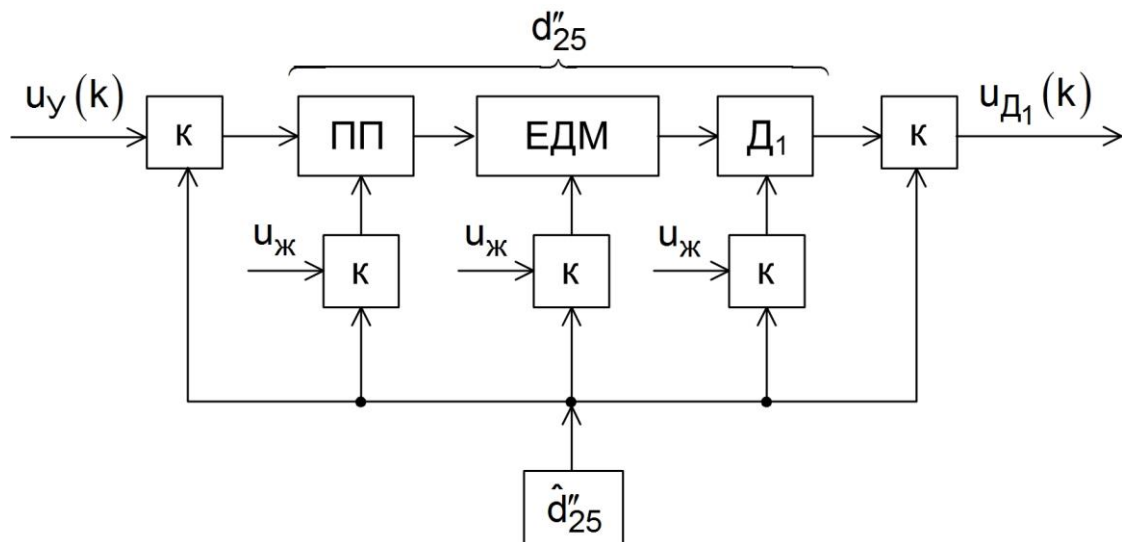


Рисунок 5.12 – Функціональна схема виведення з експлуатації об'єкта раціонального управління при d''_{25}

У представленій схемі d''_{25} – це некомпенсований вид дестабілізації.

За допомогою часткових функціональних схем відновлення для окремих видів дестабілізації (рис. 5.8–рис. 5.10) представимо загальну функціональну схему відновлення працездатності ЕДМ (рис. 5.13).

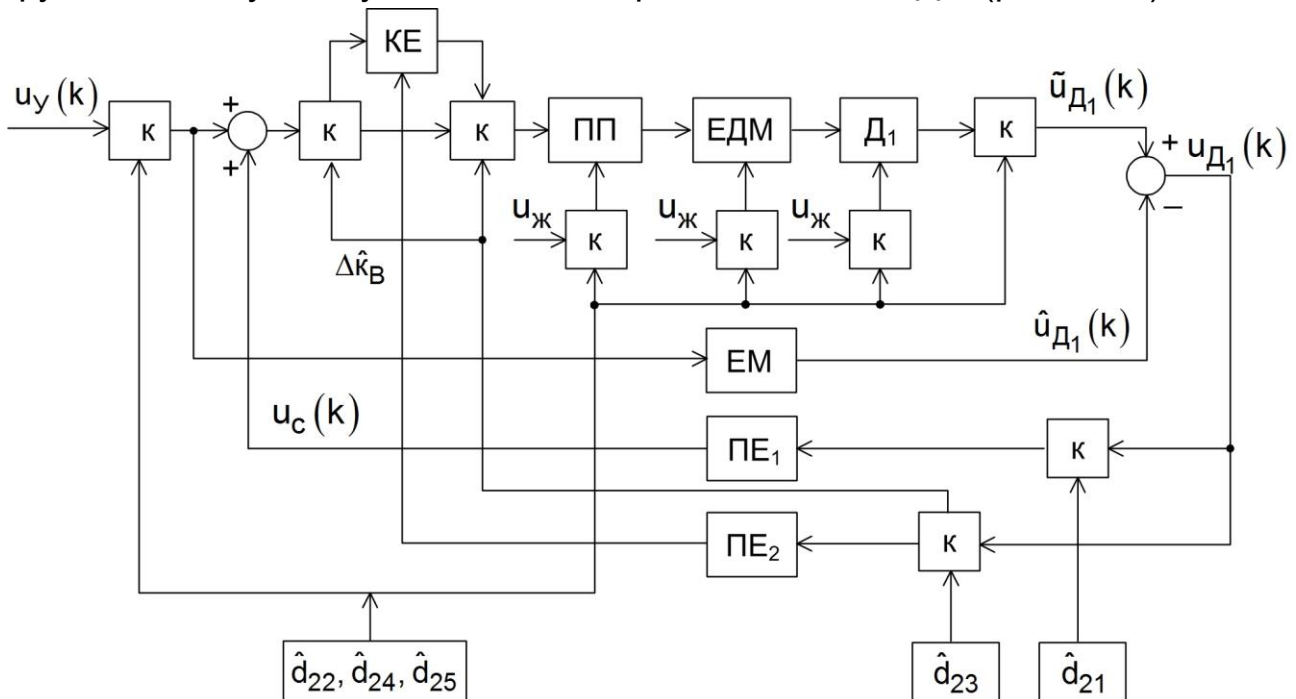


Рисунок 5.13 – Функціональна схема відновлення працездатності ЕДМ за результатами діагнозу

У загальній функціональній схемі комутатори здійснюють комутацію сигналів і живильної напруги у відповідності з результатами діагнозу і процедурами відновлення працездатності для кожного виду дестабілізації.

Після відновлення працездатності ЕДМ засобами v_1 і v_2 проводиться цикл глибокого діагностування ЕДМ, при якому підтверджується повне відновлення працездатності ЕДМ або причина неповного відновлення його функцій з метою подальшого відпрацювання циклу гнучкого відновлення.

5.3. Відновлення працездатності датчика кутової швидкості

Порушують працездатність датчика кутової швидкості D_1 п'ять видів дестабілізації: d_{31} і d_{32} , пов'язані зі зменшенням коефіцієнта передачі; d_{33} и d_{34} призводять до дрейфу нуля; d_{39} – невідомий вид дестабілізації.

Для відновлення працездатності датчика D_1 можна використовувати такі засоби відновлення як v_1 – сигнальне підстроювання, v_2 – параметричне підстроювання, v_3 – реконфігурацію алгоритмів, v_4 – реконфігурацію апаратури. Розподіл засобів відновлення за видами дестабілізації можна подати за допомогою таблиці відновлення (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

d_{ij}	Засоби відновлення				Рівень
	v_1	v_2	v_3	v_4	
d_{31}	1	1			2
d_{32}			1	1	2
d_{33}	1	1			2
d_{34}			1	1	2
d_{39}			1	1	2
Ранг	2	2	3	3	

Як випливає з таблиці, рівень представлених засобів відновлення однаковий і дорівнює 2. Це свідчить про рівномірний розподіл засобів. Ранги засобів відновлення різні. Найвищий дорівнює 3 для засобів v_3 та v_4 .

Розглянемо можливість відновлення працездатності D_1 при появі виду дестабілізації d_{31} .

Зменшення кое-фіцієнта передачі датчика \tilde{k}_{D_1} можна компенсувати за допомогою додаткового сигналу підстроювання сигналу виходу датчика $\tilde{u}_{D_1}(k)$. Рівняння збуреного руху об'єкта раціонального управління при $\tilde{k}_{D_1} = k_{D_1} - \Delta k_{D_1}$ буде наступним:

$$\Delta u_{D_1}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J}\right) \Delta u_{D_1}(k) - \frac{\Delta k_{D_1} k_{Mkпп} T_0}{JR} u_y(k). \quad (5.21)$$

Відповідно до формули (5.5) сигнал підстроювання виходу датчика описується рівнянням

$$u_C(k+1) = \frac{\left[\Delta u_{D_1}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J}\right) \Delta u_{D_1}(k) \right] JR}{\tilde{k}_{D_1} k_{Mkпп} T_0}. \quad (5.22)$$

Функціональну схему сигнального підстроювання D_1 можна подати так (рис. 5.14).

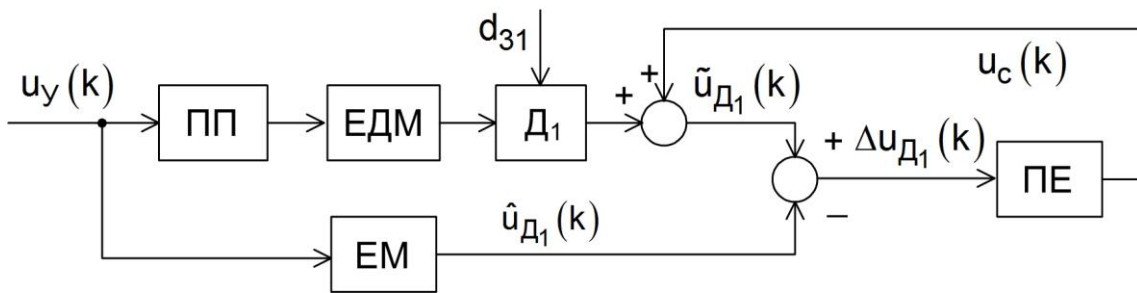


Рисунок 5.14 – Функціональну схему сигнального підстроювання D_1 при d_{31}

Перетворювальний елемент ПЕ у цій схемі реалізує рівняння (5.22).

При використанні параметричного підстроювання відновлення працездатності D_1 необхідно знання величини відхилення коефіцієнта Δk_{D_1} . Оціночні значення $\Delta \hat{k}_{D_1}$ можна використовувати з діагностичної бази знань щодо видів дестабілізації. Це формули (4.89), (4.90) чи (4.91). У датчику для параметричного підстроювання має бути передбачене схемне рішення підстроювання коефіцієнта передачі. Тоді при встановленні виду d_{31} проводиться збільшення коефіцієнта передачі на величину $\Delta \hat{k}_{D_1}$. Оціночне значення Δk_{D_1} можна також отримати з рівняння (5.21).

$$\Delta k_{D_1} = \frac{\left[\Delta u_{D_1}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0 k_B}{J} \right) \Delta u_{D_1}(k) \right] J R}{k_M k_{ПП} T_0 u_y(k)} \quad (5.23)$$

або використовувати рекурентне рівняння для отримання поточного значення відхилення коефіцієнта $\Delta k_{D_1}(k+2)$ та використовувати його для параметричного підстроювання відповідно до схеми (рис. 5.15).

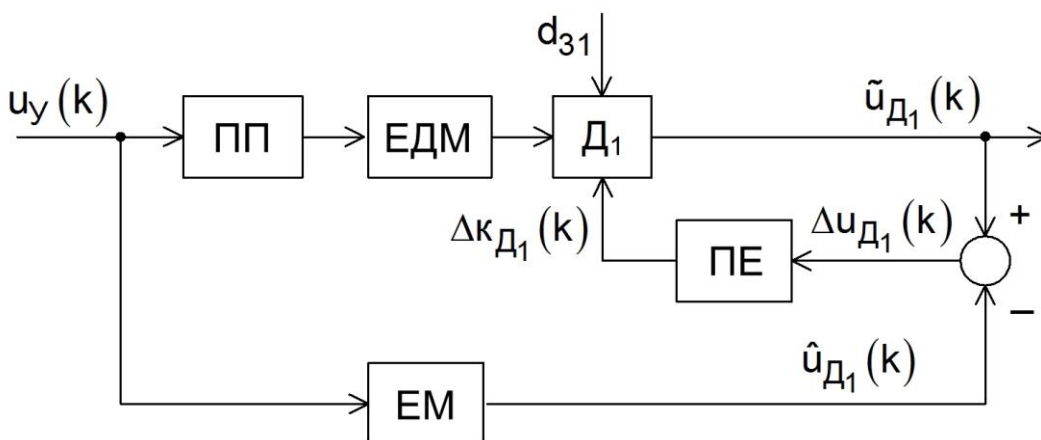


Рисунок 5.15 – Функціональна схема параметричного підстроювання D_1 при d_{31}

У перетворювальному елементі формується поточне значення $\Delta u_{D_1}(k)$ за допомогою рівняння (5.23).

При появі компенсованого дрейфу нуля в D_1 – це вид дестабілізації d_{33} , відновити працездатність можна як за допомогою сигнального підстроювання v_1 , так і за допомогою параметричного підстроювання v_2 . При використанні сигнального підстроювання потрібно скористатися рівнянням збуреного руху

$$\Delta u_{D_1}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0 K_B}{J}\right) \Delta u_{D_1}(k) - \frac{u_{01} K_M K_{ПП} T_0}{JR} u_y(k), \quad (5.24)$$

з якого поточна величина дрейфу нуля

$$u_{01}(k+2) = \frac{\left[\Delta u_{D_1}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0 K_B}{J}\right) \Delta u_{D_1}(k)\right] JR}{K_M K_{ПП} T_0 u_y(k)}. \quad (5.25)$$

Сигнальне підстроювання D_1 можна реалізувати відповідно до функціональної схеми (рис. 5.16).

У перетворювальному елементі формується сигнал корекції за допомогою рівняння (5.25).

При використанні параметричного підстроювання v_2 можна скористатися перетворювальним елементом алгоритму (5.24), адаптованим під схему підстроювання коефіцієнта передачі \tilde{k}_{D_1} .

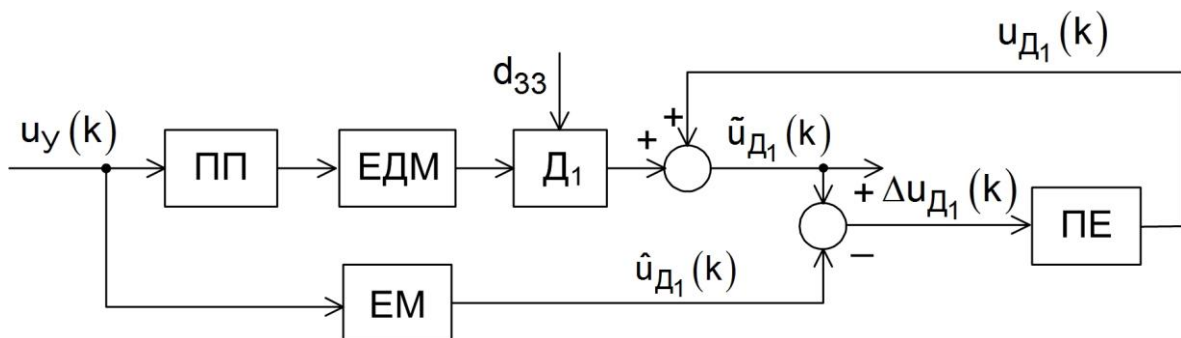


Рисунок 5.16 – Функціональна схема сигнального підстроювання D_1 при d_{33}

Можливу функціональну схему параметричного підстроювання подано на рис. 5.17.

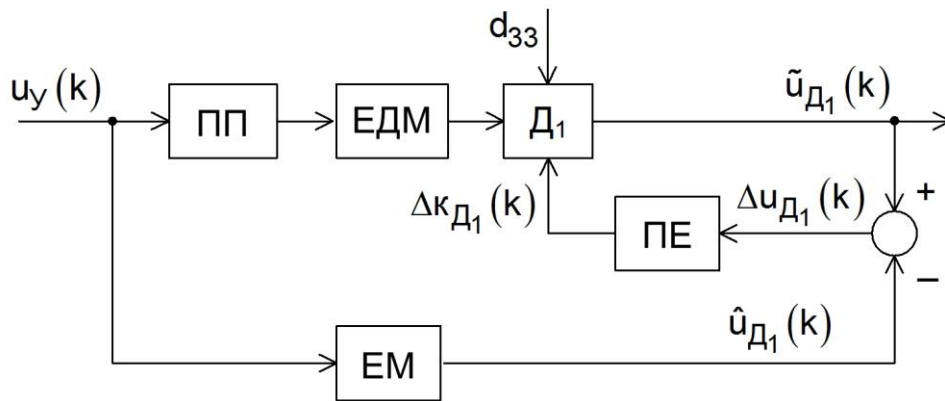


Рисунок 5.17 – Функціональна схема параметричного підстроювання D_1 при d_{33}

У перетворювальному елементі формується сигнал підстроювання $\Delta k_{D_1}(k)$ коефіцієнта передачі датчика.

Розглянемо тепер види дестабілізації d_{32} , d_{34} і d_{39} , які не можуть бути нейтралізовані засобами відновлення v_1 і v_2 . Для нейтралізації цих видів дестабілізації придатним є засіб відновлення v_3 , що дозволяє за допомогою реконфігурації алгоритмів забезпечити відновлення працездатності об'єкта раціонального управління. Отже, при некомпенсованих видах дестабілізації можна скористатися оцінкою еталонної моделі $\hat{u}_{D_1}(k)$, яка опосередковано відображає стан ПП+ЕДМ і буде використана в процесі формування управління. На рис. 5.18 представлена функціональна схема такого процесу відновлення.

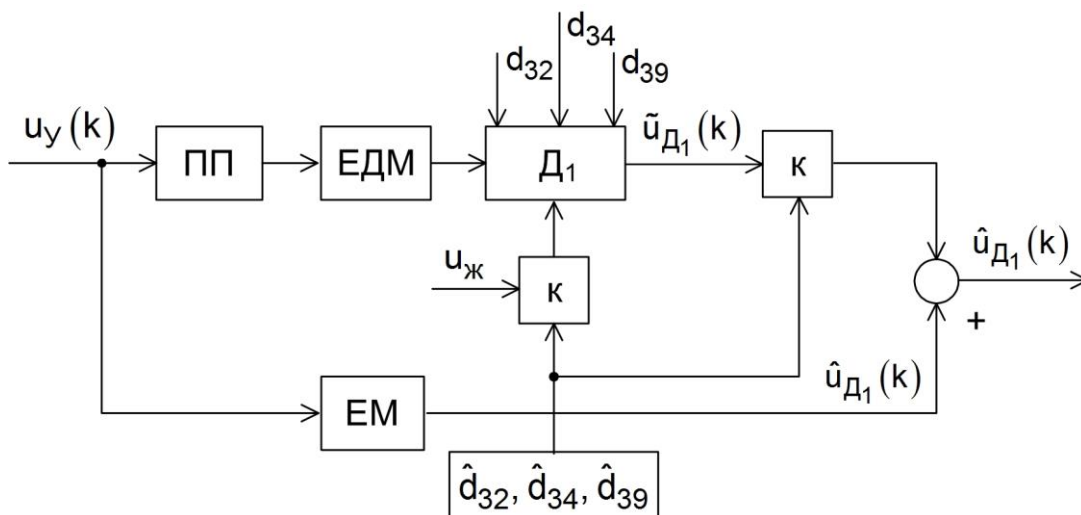


Рисунок 5.18 – Функціональна схема реконфігурації алгоритмів

Комутатори К в цій схемі виводять датчик кутової швидкості D_1 з експлуатації і забезпечують заміну вихідного сигналу об'єкта

раціонального управління $\tilde{u}_{D_1}(k)$ на $\hat{u}_{D_1}(k)$, що сприяє відновленню вимірювання кутової швидкості ЕДМ.

Можливим засобом відновлення працездатності D_1 , а вірніше відновлення вимірювань при видах дестабілізації d_{32} , d_{34} і d_{39} може бути v_4 – реконфігурація апаратури.

У цій ситуації реконфігурація апаратури є підключенням резервного датчика D_{1P} замість основного D_1 . Резервний датчик може бути як у «гарячому» резерві, і у «холодному». При знаходженні датчика D_{1P} в «гарячому» резерві процес відновлення вимірювань кутової швидкості ЕДМ можна представити за допомогою функціональної схеми (рис. 5.19).

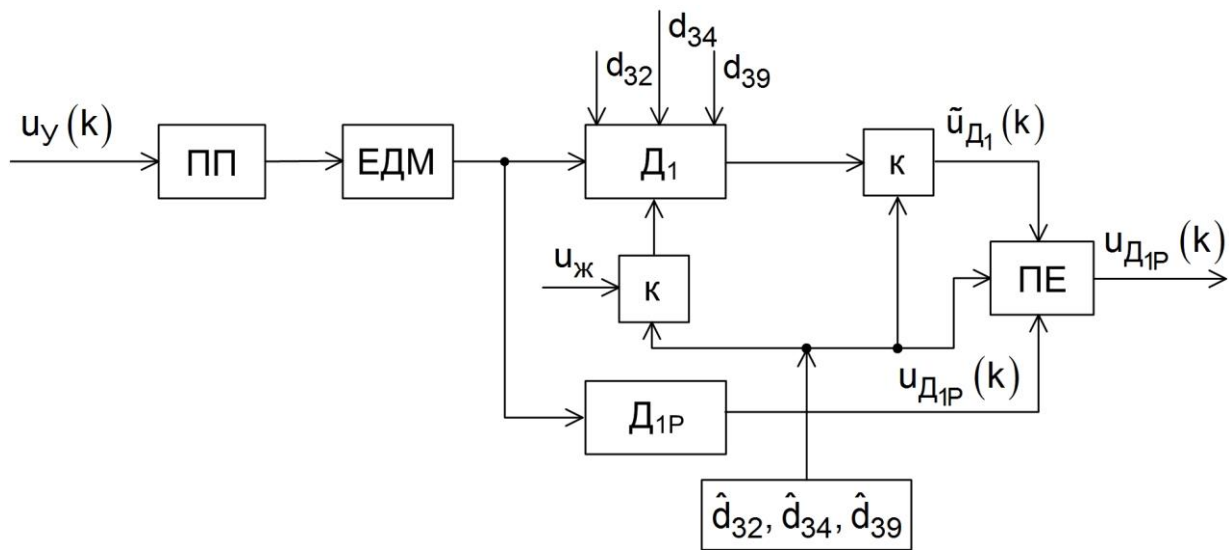


Рисунок 5.19 – Функціональна схема відновлення вимірів за допомогою «гарячого» резерву

Результати вимірів кутової швидкості ЕДМ надходять з двох датчиків на перетворювальний елемент, в якому при справних датчиках формується середньоарифметичне значення виміру.

При появі діагнозу \hat{d}_{32} або \hat{d}_{34} або \hat{d}_{39} комутаторами виводиться з експлуатації основний датчик D_1 і ПЕ транслює тільки вимірювання $u_{D_{1P}}(k)$.

При використанні D_{1P} як «холодного» резерву при появі інформації про \hat{d}_{32} або \hat{d}_{34} або \hat{d}_{39} необхідно зробити відключення непрацездатного датчика D_1 і підключення резервного D_{1P} за допомогою комутації ланцюгів. На рис. 5.20 функціональна схема відображає основні особливості цього процесу відновлення вимірювань кутової швидкості ЕДМ.

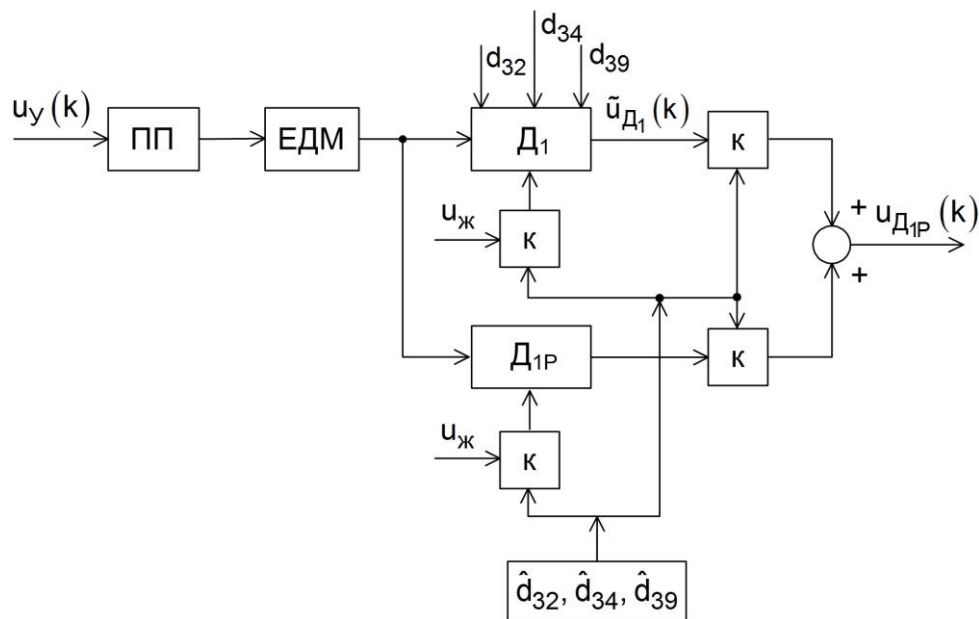


Рисунок 5.20 – Функціональна схема відновлення вимірів за допомогою «холодного» резерву

У схемі використовуються комутатори, що перерозподіляють $u_{\text{пит}}$ датчиків, і комутатори, що перемикають сигнали вимірювань кутової швидкості ЕДМ.

За допомогою часткових функціональних схем сигнального підстроювання та реконфігурації алгоритмів сформуємо загальну функціональну схему відновлення працездатності D_1 (рис. 5.21).

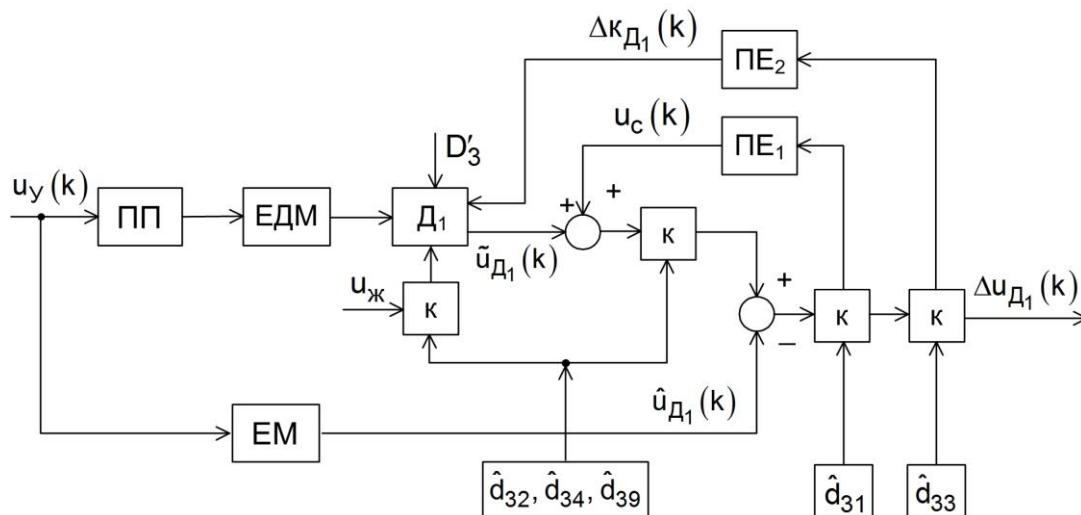


Рисунок 5.21 – Функціональна схема відновлення працездатності D_1 за результатами діагнозу

$ПЕ_1$ і $ПЕ_2$ – перетворювальні елементи, що реалізують відповідно алгоритм сигнального підстроювання та алгоритм параметричного підстроювання.

Після процедури відновлення працездатності D_1 – датчика кутової швидкості ЕДМ виконується повторна контрольна процедура діагностування. У разі не повного відновлення працездатності того чи іншого виду дестабілізації проводиться повторна процедура відновлення вимірювань датчика кутової швидкості ЕДМ до необхідної точності.

Можливі інші комбінації розглянутих раніше функціональних схем відновлення, що забезпечують у конкретних умовах необхідне відновлення вимірювань датчика кутової швидкості ЕДМ.

5.4. Відновлення працездатності датчика струму

В об'єкті раціонального управління (рис. 4.2) використовується другий датчик D_2 – датчик струму. Порушення працездатності датчика струму може бути обумовлено видами дестабілізації з множини $D''_3 = \{d_{35}, d_{36}, d_{37}, d_{38}, d_{39}\}$. Види дестабілізації d_{35} і d_{36} зумовлені зменшенням коефіцієнта перетворення датчика k_{D_2} . Види дестабілізації d_{37} і d_{38} пов'язані з дрейфом нуля датчика u_0 . Невизначений вид дестабілізації – це d_{39} .

Для нейтралізації видів дестабілізації множини D''_3 можна використовувати такі засоби: v_1 – сигнальне підстроювання, v_2 – параметричне підстроювання, v_3 – реконфігурацію алгоритмів та v_4 – реконфігурацію апаратури. Розподіл цих засобів за видами дестабілізації наведено у таблиці відновлюваності (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

d_{ij}	Засоби відновлення				Рівень
	v_1	v_2	v_3	v_4	
d_{35}	1	1			2
d_{36}			1	1	2
d_{37}	1	1			2
d_{38}			1	1	2
d_{39}			1	1	2
Ранг	2	2	3	3	

Засоби відновлення розподілені поступово за видами дестабілізації, що впливає з чисельних значень рівня. Ранг таблиці відновлюваності не рівномірний. Нижнім рангом характеризуються засоби v_1 та v_2 . Більш високим рангом мають засоби відновлення v_3 і v_4 .

Розглянемо послідовно можливості та особливості використання засобів відновлення $v_1 \div v_4$.

Отже, при діагностуванні в непрацездатному датчику D_2 виду дестабілізації d_{35} можна скористатися для відновлення його працездатності сигнальним підстроюванням – засіб v_1 .

Для формування сигналу підстроювання скористаємося структурною схемою (рис. 3.17). Зв'язок вихідного сигналу датчика D_2 з сигналом управління $u_y(t)$ описується наступним диференціальним рівнянням:

$$\dot{u}_{D_2}(t) = a_{22} u_{D_2}(t) + c_{22} k_{\text{ПП}} b_2 u_y(t) \quad (5.26)$$

або в термінах конкретних параметрів об'єкта управління

$$\dot{u}_{D_2}(t) = -\frac{R}{L} u_{D_2}(t) + \frac{k_{D_2} k_{\text{ПП}}}{L} u_y(t). \quad (5.27)$$

Помноживши обидві частини рівняння на $\frac{L}{R}$, отримаємо

$$\frac{L}{R} \dot{u}_{D_2}(t) = -u_{D_2}(t) + \frac{k_{D_2} k_{\text{ПП}}}{R} u_y(t). \quad (5.28)$$

Відношення $\frac{L}{R} = T_E$ характеризує постійну електричну часу ЕДМ, виходячи з виразу передавальної функції $W_2(s)$ (3.23). Тому що $T_E \ll T_{EM}$, отже, її можна вважати нескінченно малою величиною і тоді рівняння (5.28) можна спростити до наступного виду:

$$u_{D_2}(t) = \frac{k_{D_2} k_{\text{ПП}}}{R} u_y(t). \quad (5.29)$$

Рівняння збуреного руху, викликане видом дестабілізації d_{35} , буде для дискретних значень часу наступним:

$$\tilde{u}_{D_2}(k) = \frac{\tilde{k}_{D_2} k_{\text{ПП}}}{R} u_y(k). \quad (5.30)$$

Рівняння еталонної моделі зв'язку цих сигналів

$$\hat{u}_{D_2}(k) = \frac{k_{D_2} k_{\text{ПП}}}{R} u_y(k). \quad (5.31)$$

Віднімаючи з рівняння збуреного руху (5.30) рівняння еталонної моделі (5.31), отримаємо рівняння для відхилення вихідного сигналу датчика D_2 :

$$\Delta u_{D_2}(k) = \frac{\Delta k_{D_2} k_{\text{ПП}}}{R} u_y(k). \quad (5.32)$$

Отже, вид дестабілізації d_{35} призводить до пропорційного зменшення сигналу датчика струму D_2 . Для компенсації цієї

дестабілізації потрібно до вихідного сигналу несправного датчика $\tilde{u}_{D_2}(k)$ додати додатковий сигнал величиною $\Delta u_{D_2}(k)$. Графічно принцип сигнального підстроювання можна подати за допомогою функціональної схеми (рис. 5.22).

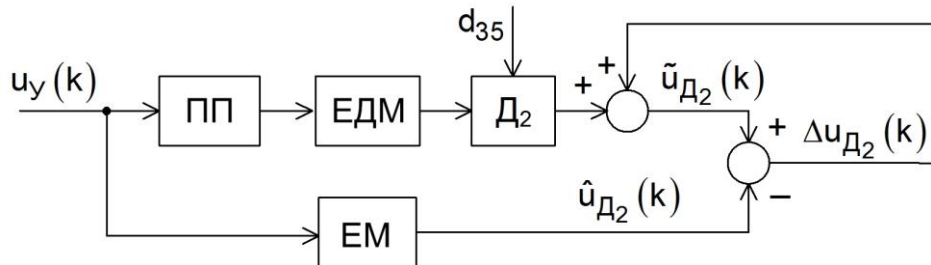


Рисунок 5.22 – Функціональна схема сигнального підстроювання D_2 при d_{35}

Функціональний елемент схеми ЕМ – еталонна модель перетворює сигнал управління відповідно до рівняння (5.31). У суматорі виробляється корекція вихідного сигналу D_2 що забезпечує нейтралізацію дії виду дестабілізації d_{35} .

При використанні засобу відновлення v_2 – параметричного підстроювання необхідно з різницевого сигналу $\Delta u_{D_2}(k)$, відповідного зменшення коефіцієнта перетворення датчика (5.32), сформувати сигнал параметричного підстроювання. У найпростішому випадку цей сигнал дорівнюватиме Δk_{D_2} :

$$\Delta k_{D_2}(k) = \frac{R \Delta u_{D_2}(k)}{k_{ПП} u_y(k)}. \quad (5.33)$$

Тоді особливості параметричної компенсації виду дестабілізації d_{35} можна подати за допомогою функціональної схеми (рис. 5.23).

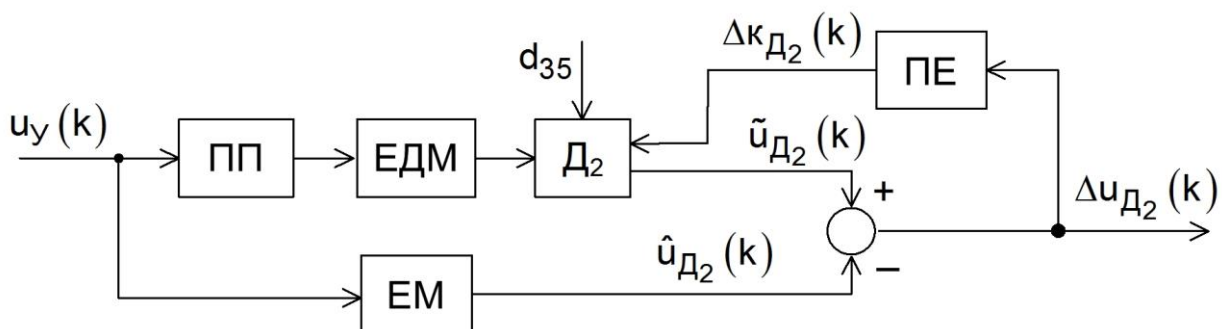


Рисунок 5.23 – Функціональна схема параметричного підстроювання D_2 при d_{35}

Вид дестабілізації d_{37} характеризує усунутий дрейф нуля датчика струму, який можна парировати засобом відновлення як v_1 , так і v_2 . Розглянемо особливості сигнального підстроювання.

Різницевий сигнал у цьому випадку буде рівним величині дрейфу u_{02} . При позитивній величині дрейфу $u_{02} > 0$ різницевий сигнал $\Delta u_{D_2}(k)$ потрібно відняти з вихідного сигналу датчика $\tilde{u}_{D_2}(k)$, а за негативного $u_{02} < 0$ – скласти. На рис. 5.24 наведено функціональну схему такого сигнального підстроювання.

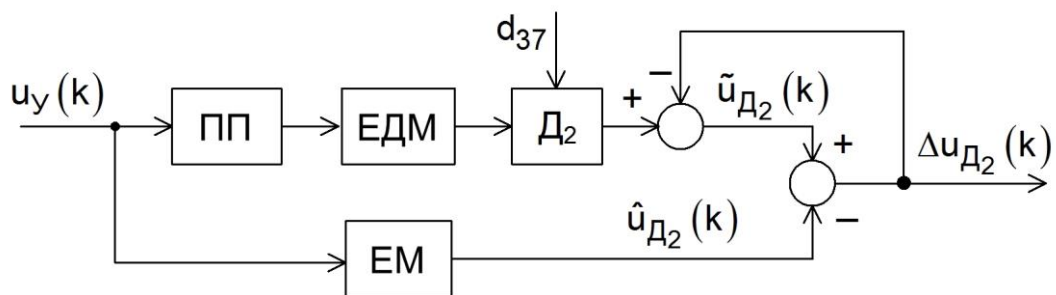


Рисунок 5.24 – Функціональна схема сигнального підстроювання D_2 при d_{37}

При використанні параметричного підстроювання для відновлення вимірювань датчика струму при дрейфі його нуля різницевий сигнал $\Delta u_{D_2}(k)$ необхідно перетворити у відповідну зміну коефіцієнта перетворення. Функціональна схема (рис. 5.25) відображає відповідний склад функціональних елементів та їх зв'язок.

Види дестабілізації d_{36} , d_{38} і d_{39} можуть бути нейтралізовані відповідно до табл. 5.4 двома засобами v_3 – реконфігурацією алгоритмів або v_4 – реконфігурація апаратури. Розглянемо особливості використання відновлення вимірювань, отже і працездатності D_2 реконфігурації алгоритмів.

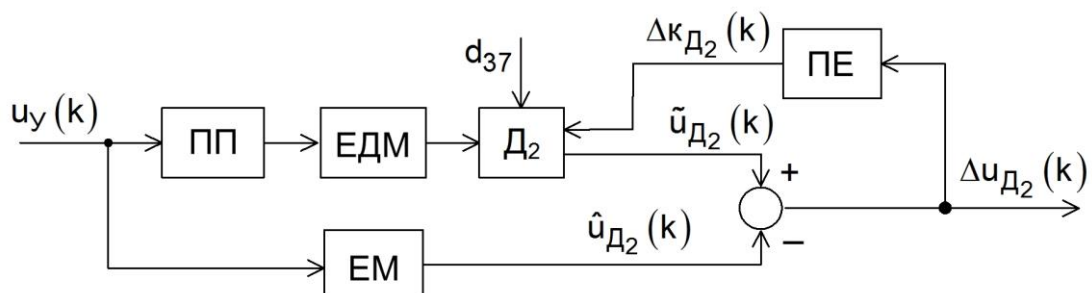


Рисунок 5.25 – Функціональна схема параметричного підстроювання D_2 при d_{37}

Надлишковим ресурсом у складі об'єкта раціонального управління є еталонна модель, яка генерує оцінне значення вихідного сигналу датчика $\hat{u}_{D_2}(k)$. Так як дестабілізація датчика при видах d_{36} , d_{38} і d_{39} така, що відновити його працездатність неможливо засобами v_1 і v_2 , то необхідно виводити його з експлуатації відключенням напруги живлення $u_{\text{пит}}$ і відключенням сигналу виходу $\tilde{u}_{D_2}(k)$. А замість показань відключеного датчика використовувати вихід еталонної моделі $\hat{u}_{D_2}(k)$. Склад функціональних елементів та відповідні зв'язки для такої процедури представлені на рис. 5.26.

Комутатори за результатами діагнозу відключають несправний датчик і забезпечують заміну його сигналу $\tilde{u}_{D_2}(k)$ на сигнал еталонної моделі $\hat{u}_{D_2}(k)$, чим забезпечується відновлення вимірювань.

Відновлювати працездатність датчика струму при видах дестабілізації d_{36} , d_{38} і d_{39} можна за допомогою заміни несправного датчика справним, що є суть засобу v_4 – реконфігурація апаратури. Справний резервний датчик струму може використовуватись у двох варіантах. Перший, коли датчик струму працює одночасно з основним – це так званий «гарячий» резерв. Другий варіант, коли справний датчик підключається в роботу замість основного. Це варіант «холодного» резерву.

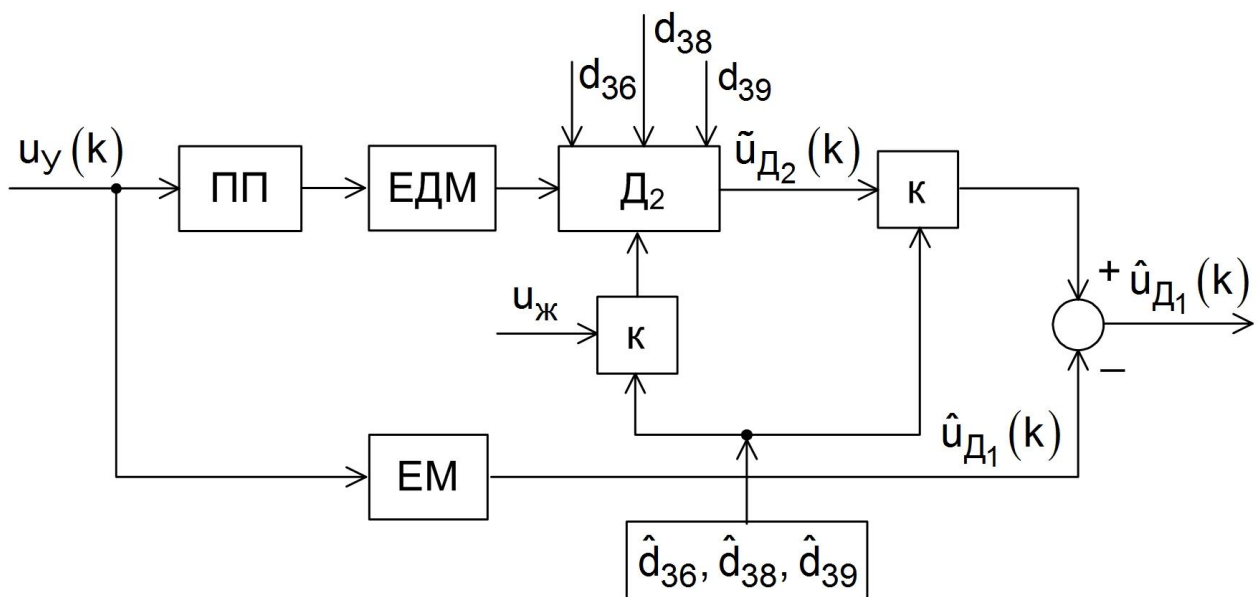


Рисунок 5.26 – Функціональна схема реконфігурації алгоритмів

На рис. 5.27 зображено функціональну схему, що відображає склад необхідних функціональних елементів та їх зв'язок для реалізації процесу відновлення працездатності D_2 при використанні «гарячого» резерву.

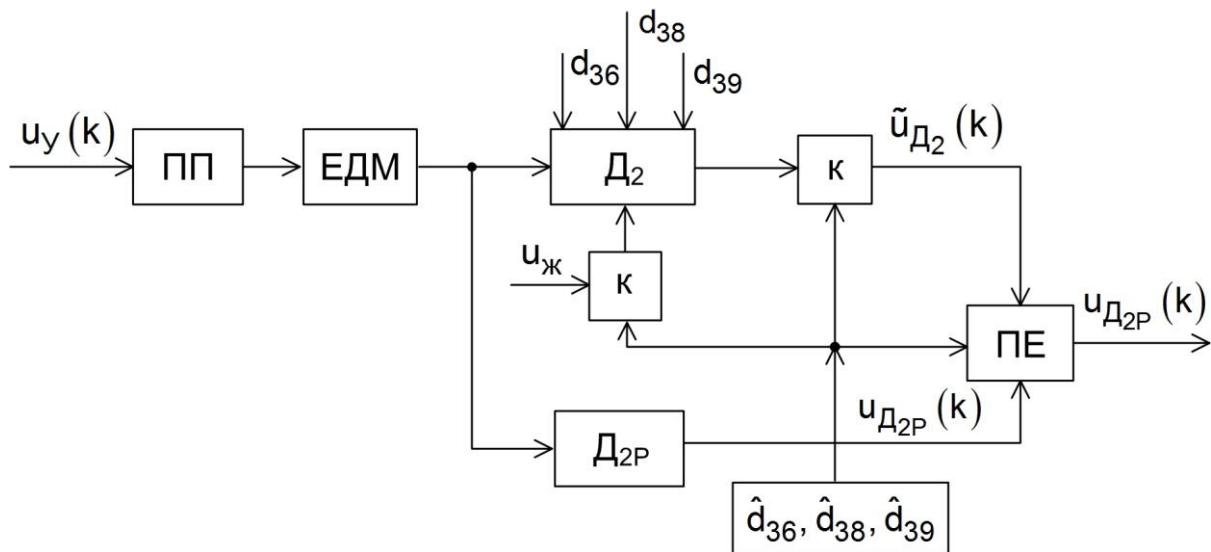


Рисунок 5.27 – Функціональна схема відновлення працездатності датчика струму за допомогою «гарячого» резерву

При одночасній роботі справного D_2 та резервного D_{2P} перетворювальному елементі – ПЕ формується середньоарифметичне значення вимірювання струму. Якщо з'явився діагноз про вид дестабілізації \hat{d}_{36} або \hat{d}_{38} або \hat{d}_{39} комутатор ізолює датчик D_2 , що відмовив, за допомогою відключення $u_{\text{пит}}$ і відключенням його вихідного сигналу $\tilde{u}_{D_2}(k)$ від ПЕ. На виході ПЕ з'являється сигнал з виходу резервного датчика струму $u_{D_{2P}}(k)$ і відновлення вимірювань датчика струму завершується.

Процедура відновлення вимірювань датчика D_2 , що відмовив за допомогою резервного датчика D_{2P} , що знаходиться в «холодному» резерві, відповідає процедурі, описаній в п. 5.3 для датчика D_1 . Для реалізації цієї процедури використовуються комутатори, які за результатами діагностування датчика D_2 : \hat{d}_{36} або \hat{d}_{38} або \hat{d}_{39} ізолюють його від процесу управління і підключають резервний датчик D_{2P} . На функціональній схемі (рис. 5.28) представлений склад функціональних елементів з відповідними зв'язками, необхідними для відновлення вимірювань датчика D_2 , що відмовив.

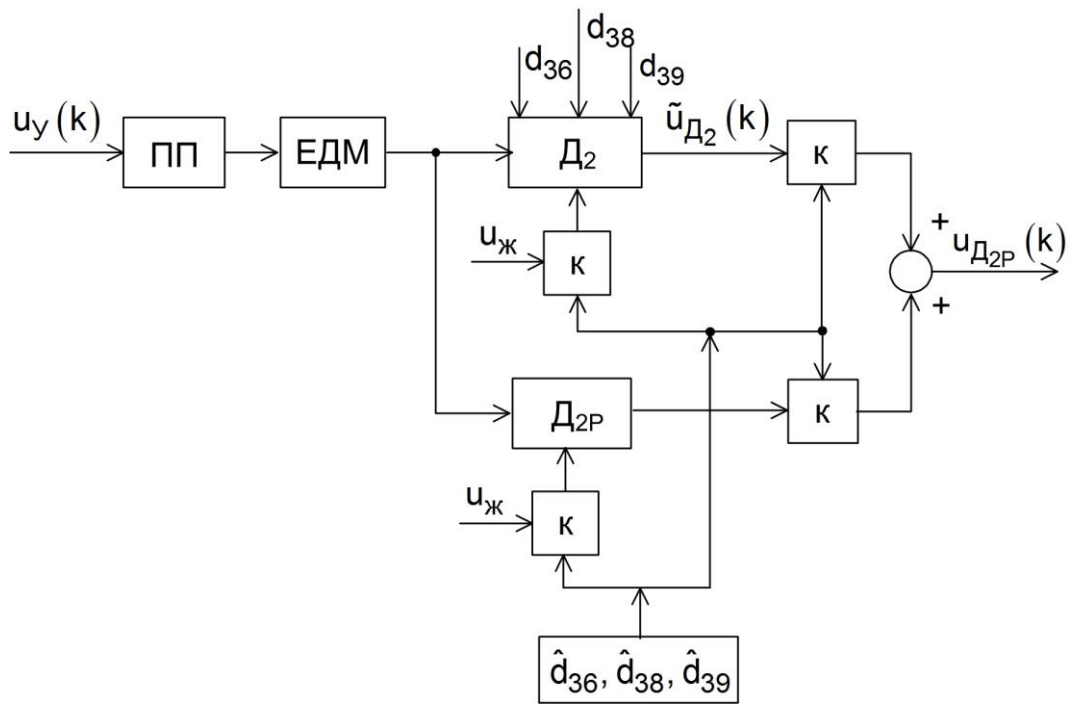


Рисунок 5.28 – Функціональна схема відновлення вимірювань датчика струму за допомогою «холодного» резерву

Розглянемо одну з можливих комбінацій описаних функціональних схем відновлення вимірювань датчика D_2 (рис. 5.29).

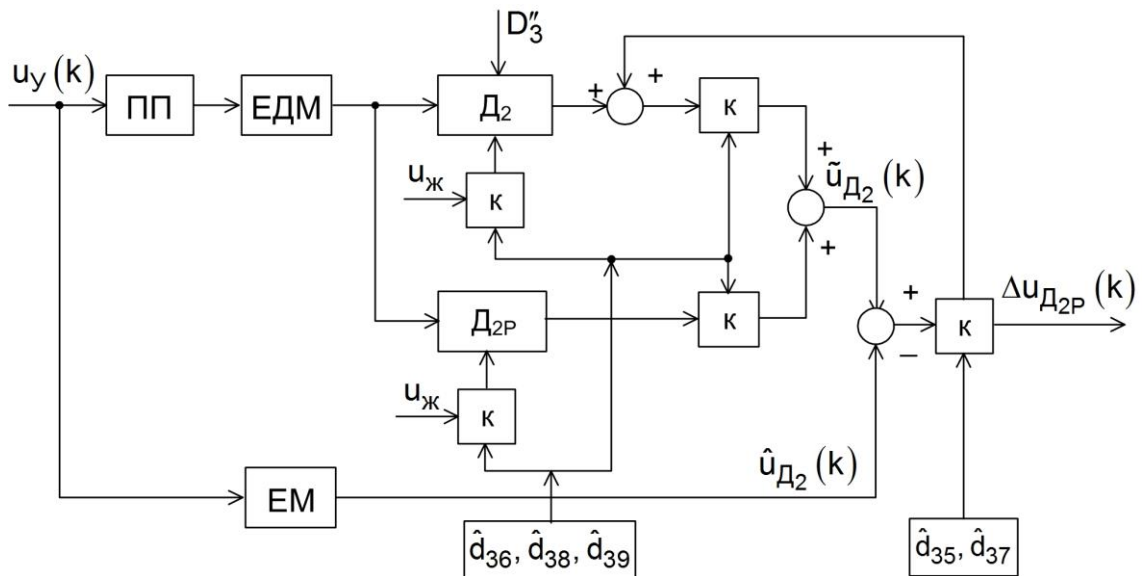


Рисунок 5.29 – Функціональна схема відновлення вимірювань D_2 по результатам діагнозу

У представленій функціональній схемі використовуються два засоби відновлення вимірювань: v_1 – сигнальне підстроювання і v_4 – реконфігурація апаратури за допомогою «холодного» резерву.

Сигнальне підстроювання підключається за допомогою відповідних комутаторів, коли виявлено види дестабілізації \hat{d}_{35} та \hat{d}_{37} . Підключення резервного датчика D_2 здійснюється, якщо встановлені в результаті діагностування види дестабілізації \hat{d}_{36} або \hat{d}_{38} або \hat{d}_{39} . При цьому за допомогою відповідних комутаторів виводиться з експлуатації основний датчик D_2 , що відмовив.

Процедура відновлення вимірювання датчика струму закінчується тоді, коли повторна процедура діагностування датчика D_2 підтвердить його працездатність. В іншому випадку повторюється процедура відновлення вимірювань до тих пір, поки не настане повної нейтралізації дестабілізуючих впливів з множини D''_3 .

Отже, розглянуті всі функціональні елементи, що входять до складу об'єкта раціонального управління, схильні до конкретних видів дестабілізації, та можливості реабілітації їх функціональних властивостей за допомогою відновлення працездатності. Резюмуючи описані процедури відновлення працездатності функціональних елементів, можна виділити два очевидні підходи. Перший підхід до відновлення працездатності полягає у парируванні, нейтралізації наслідків дестабілізуючих впливів, а не усунення їх причин. У цьому підході використовуються такі засоби відновлення як сигнальне і параметричне підстроювання, реконфігурація апаратури. Другий підхід до відновлення працездатності базується на принципі усунення причин дестабілізації, тобто ізолювання непрацездатного функціонального елемента за допомогою виведення його з процесу управління вектором кінетичного моменту КА. У цьому підході застосовні такі засоби відновлення як реконфігурація алгоритмів, так і реконфігурація апаратури.

Розглянуті засоби відновлення працездатності функціональних елементів не вичерпують всього різноманіття можливих засобів. Джерелами різноманіття можуть бути конструктивні та функціональні особливості функціональних елементів, допустимі рівні надлишкових програмних та апаратних засобів, цілі довготривалих місій КА. Вибір засобів відновлення працездатності, що використовуються в цьому розділі, обумовлений бажанням показати принципову можливість автономного і гнучкого відновлення працездатності в реальному масштабі часу за допомогою алгоритмічних і апаратних засобів раціонального управління електромаховичним приводом.

Розділ VI. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО БЛОКА ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ

Властивості тіл досягаються не інакше, як випробуванням.

Ісаак Ньютон (1643-1727)

– англійський вчений, геніальний фізик та математик

Експериментальна установка є апаратно-програмним комплексом, призначеним для дослідження моделей, методів та інструментальних засобів раціонального управління макетним блоком електродвигунів-маховиків. До складу експериментальної установки входить макетний блок електродвигунів-маховиків, пристрій раціонального управління та ноутбук. Експериментальна установка дозволяє проводити дослідження макетного блоку електродвигунів-маховиків у номінальних режимах функціонування, імітувати види дестабілізації із заданої множини, діагностувати та відновлювати працездатність за результатами діагнозу, використовуючи надлишкові ресурси програмно-апаратних засобів.

6.1. Призначення та склад експериментальної установки

Створена на кафедрі «Систем управління літальних апаратів» експериментальна установка із макетним блоком електродвигунів-маховиків забезпечує проведення таких досліджень:

- 1) моделювання руху блоку в номінальному та позаштатному режимах функціонування;
- 2) введення у функціональні елементи блоку дестабілізуючих впливів;
- 3) діагностування працездатності блоку з глибиною до виду дестабілізуючого впливу;
- 4) гнучке відновлення працездатності блоку з використанням надлишкових ресурсів;
- 5) візуалізації параметрів та сигналів, що відображають стан блоку.

Експериментальна установка є апаратно-програмним комплексом, що складається з наступних конструктивно-закінчених компонентів:

- 1) блок електродвигунів-маховиків;

- 2) пристрій раціонального управління;
- 3) ноутбук Dell inspiron 3582.

Загальний вид установки представлений на рисунку 6.1. Для забезпечення кутового переміщення за трьома ступенями свободи макетний блок електродвигунів-маховиків встановлений у кардановому підвісі, який закріплений на платформі, що регулюється в горизонтальній площині.

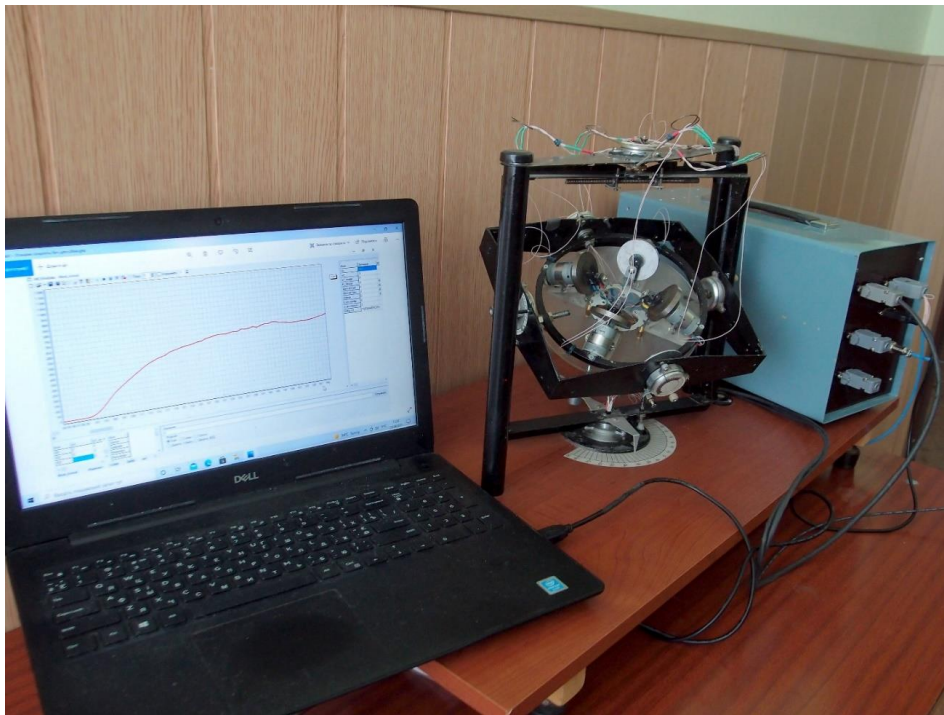


Рисунок 6.1 – Загальний вигляд експериментальної установки

Оскільки тензор інерції макетного блоку залежить від поточного кутового положення рамок карданового підвісу, то для мінімізації цього впливу макет виконаний таким чином, щоб осьові моменти інерції рамок карданового підвісу були набагато менше осьових моментів інерції блоку електродвигунів-маховиків. Це дозволяє при розгляді рухів, які характеризуються незначними кутовими відхиленнями макетного блоку від нульового положення, нехтувати впливом зміни осьових моментів інерції.

Сумарний зовнішній момент, що прикладається до конструкції макетного блоку і карданового підвісу, включає: моменти сухого і в'язкого тертя в опорах рамок карданового підвісу, гравітаційні моменти, викликані нерівністю осьових моментів інерції конструкції, а також зміщенням центру мас макета щодо точки перетину осей.

Для зменшення впливу гравітаційних моментів конструкція з блоком електродвигунів-маховиків виконана таким чином, щоб забезпечувалась

близькість її осьових моментів інерції один одному. Крім того, у платформі вмонтовано механічні засоби її регулювання за рівнем у горизонтальній площині. Попереднє балансування платформи, на якій встановлено макетний блок електродвигунів-маховиків, дозволяє зменшити вплив на експеримент зміщення центру мас від бажаного положення.

На рисунку 6.2 зображено схему з пірамідальною установкою електромаховичних приводів, що складається з чотирьох електродвигунів-маховиків (ЕДМ₁ – ЕДМ₄), чотирьох таходатчиків кутової швидкості маховиків (ТД₁ – ТД₄) і трьох датчиків кутового переміщення об'єкта управління ДК_x, ДК_y, ДК_z.

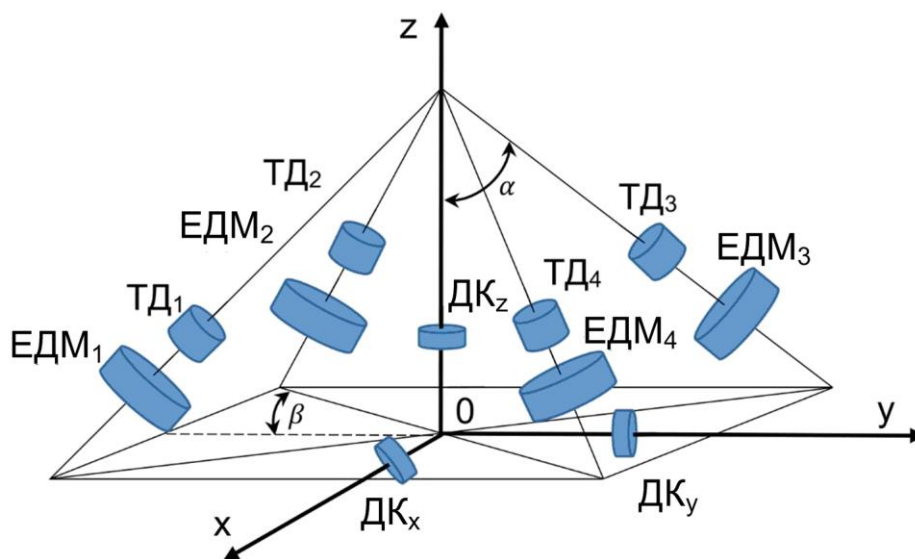


Рисунок 6.2 – Схема установки електродвигунів-маховиків

Конструктивне розміщення електродвигунів-маховиків за межами правильної піраміди під кутами $\alpha = 60^\circ$ та $\beta = 45^\circ$ обумовлено тим, зумовлене тим, що передбачуваний космічний апарат має найпростішу для дослідницьких цілей кулясту конструкцію. Осю симетрії схеми установки може бути будь-яка вісь пов'язаної системи координат. Кути α та β вибрані з умови рівної ефективності електродвигунів-маховиків по всіх каналах управління космічного апарату.

Кутові швидкості обертання електродвигунів-маховиків вимірюються за допомогою оптичних таходатчиків обертів (ТД₁ – ТД₄). Основними елементами таходатчиків є світлодіод і фотодіод, між якими встановлені диски з прорізами. Диски жорстко закріплені на валах електродвигунів-маховиків. Кожен із дисків по периметру містить 50 наскрізних прорізів. Така конструкція таходатчика дозволяє формувати 50 нормованих по

амплітуді прямокутних електричних імпульсів за один оберт електродвигуна-маховика, подальша обробка яких виконується обчислювальними засобами пристрою раціонального управління. Крім того, таходатчиками додатково формуються потенційні сигнали рівнем «Лог0» або «Лог1», що ідентифікують напрям обертання маховиків.

Для контролю кутового положення блоку з електродвигунами-маховиками на осях рамок карданового підвісу встановлено потенціометричні датчики $ДК_x$, $ДК_y$, $ДК_z$.

Для імітації умов експлуатації при виконанні експериментальних досліджень використовуються апаратні та програмні засоби введення дестабілізуючих впливів. Через неможливість фізично проімітувати частину умов експлуатації більшість їх реалізується програмно. При цьому здійснюється спотворення вимірюваних та управляючих сигналів блоку електродвигунів-маховиків таким чином, щоб реакція на них була аналогічною реакції на досліджувані види дестабілізації.

Пристрій раціонального управління виконано на базі мікроконтролера (рис. 6.3).

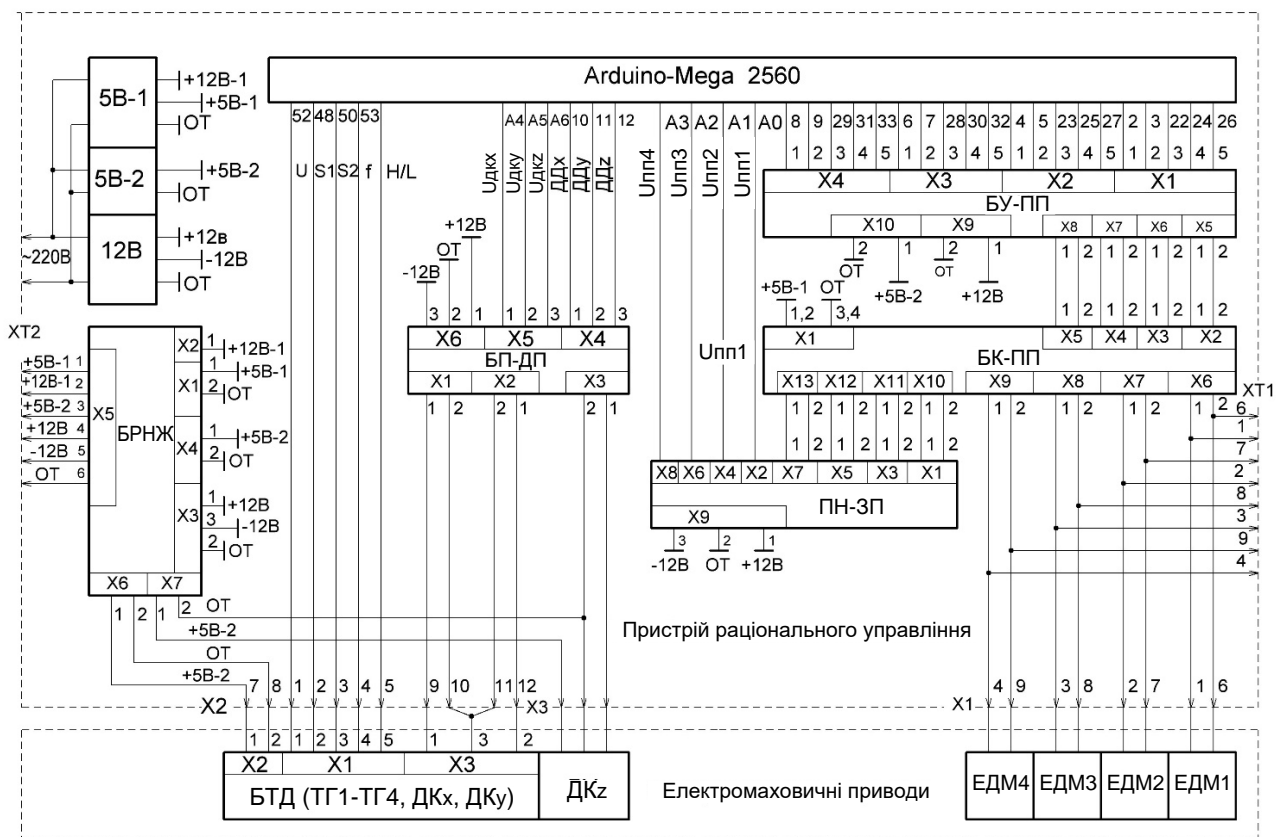


Рисунок 6.3 – Загальна електрична схема устрою раціонального управління

ПРУ містить у собі:

- 1) блок управління підсилювачами потужності (БУ-ПП);
- 2) блок комутуючих елементів підсилювачів потужності (БК-ПП);
- 3) блок перетворення імпульсної знакозмінної напруги в постійну (ПН-ЗП);
- 4) блок прийому сигналів із потенціометричних датчиків (БП-ДП);
- 5) джерело живлення (5В-1);
- 6) джерело живлення (5В-2);
- 7) джерело живлення ($\pm 12В$);
- 8) блок розподілу напруги живлення (БРНЖ);
- 9) блок попередньої обробки і трансляції сигналів таходатчиків (БТД).

Усі електронні компоненти (рис. 6.3), що входять до складу пристрою раціонального управління, крім БТД, розміщені у єдиному конструктиві (рис. 6.4). Блок БТД встановлений у кардановому підвісі у нижній частині макета з електродвигунами-маховиками.

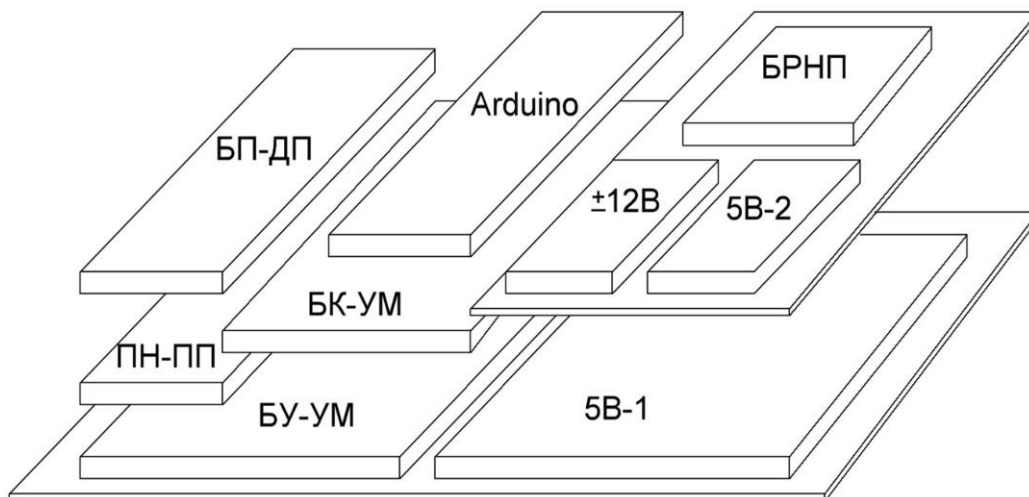


Рисунок 6.4 – Схема розміщення компонентів у складі конструкції пристрою раціонального управління

Для контролю основних електричних параметрів блоку електродвигунів-маховиків зовнішніми стандартними засобами вимірювання у пристрої раціонального управління передбачені два технологічних з'єднувача ХТ1 и ХТ2. Через контакти з'єднувача ХТ1 контролюються керуючі напруги для електродвигунів-маховиків (ЕДМ₁ – ЕДМ₄). Через контакти з'єднувача ХТ2 контролюються вихідні напруги вторинних джерел живлення «5В-1», «5В-2», « $\pm 12В$ ». Для

контролю кутових швидкостей електродвигунів-маховиків зовнішніми засобами вимірювання (оптичний вимірник кутової швидкості типу DIGITAL TACHOMETER) на всіх маховиках встановлені маркерні позначки.

Первинним живленням пристрою автоматичного управління є промислова мережа $\sim 220\text{В}$, 50Гц.

6.2. Пристрій макетного блока електродвигунів-маховиків

На рисунку 6.5 у двох проекціях наведено зовнішній вигляд конструкції макетного блоку, її основні розміри та розміри складових частин.

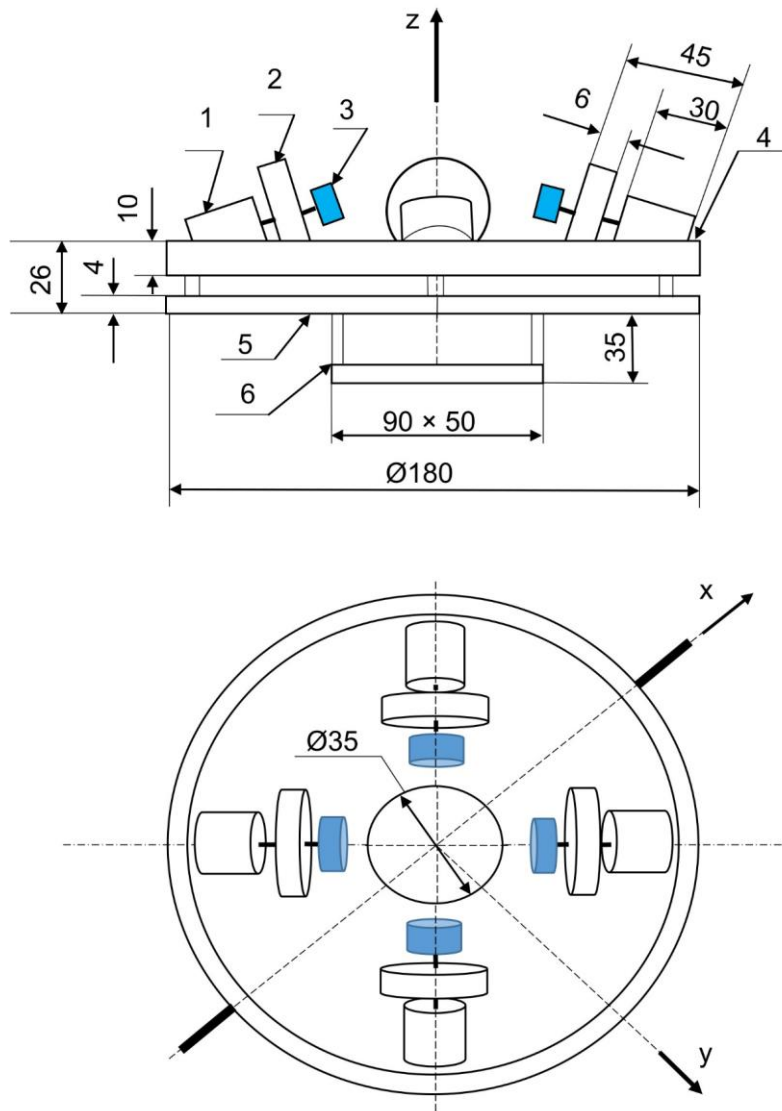


Рисунок 6.5 – Зовнішній вигляд конструкції макетного блоку електродвигунів-маховиків

Макетний блок складається: 1 – електродвигун; 2 – маховики; 3 – таходатчики; 4 – металеве кільце; 5 – плоский диск; 6 – електронний блок попередньої обробки та трансляції сигналів з таходатчиків.

Кільце (поз. 4) виготовлене з пустотілого прямокутного профілю алюмінієвого сплаву. Кільце є базовим елементом кріплення всіх складових частин конструкції та має опори для кріплення платформи у внутрішній рамці карданового підвісу.

Як виконавчі елементи (поз. 1) блоку електромаховичних приводів використовуються колекторні електродвигуни постійного струму типу RS-280RA-2865 с робочою напругою (4,5–6,0) В і кутовою швидкістю до 1400 рад/с. Маса одного електродвигуна складає 42 г.

Маховики (поз. 2) Маховики (поз. 2) жорстко закріплені на валах електродвигунів, виготовлені із сталевого матеріалу діаметром 45 мм та масою 74 г кожний.

Таходатчики (поз. 3) також жорстко закріплені на валах електродвигунів. При оцінці інерційних характеристик макетного блоку таходатчики не враховувалися через їхню незначну масу і габарити.

Плоский диск (поз. 5) зовнішнім діаметром 180 мм та отвором у центрі з діаметром 5,5 мм, товщиною 20 мм виготовлений з оргскла. У пов'язаній системі координат макету диск по осі Oz зміщений щодо центру координат на 20 мм. У складі платформи диск є основою кріплення блоку електродвигунів-маховиків і електронного блоку (поз. 5). Електронний блок (поз. 6) – це друкована плата прямокутної форми із встановленими радіoeлементами, з габаритними розмірами: ширина 50 мм, довжина 90 мм, висота 10 мм. Маса електронного блоку складає 34 г.

Зовнішня рамка карданового підвісу прямокутної форми має один ступінь свободи і може здійснювати кутове переміщення лише щодо осі Oz. Горизонтальні частини (верхня та нижня) зовнішньої рамки виготовлені з Т-подібного профілю алюмінієвого сплаву, а вертикальні з П-подібного. Габаритні розміри горизонтальних частин 270 мм, вертикальних 280 мм. Повна маса зовнішньої рамки 205г.

Внутрішня рамка прямокутної форми має два ступені свободи і може здійснювати кутове переміщення щодо осей Oz і Oy. Рамка виготовлена зі смужок листового алюмінієвого сплаву середньою шириною 40 мм та габаритними розмірами 200 мм x 250 мм. Повна маса внутрішньої рамки складає 194 г.

Оцінка моментів інерції щодо осей пов'язаної системи координат для кожної складової частини макета проводилася індивідуально виходячи з геометричних параметрів конструкції та питомої щільності матеріалу, з якого виготовлений елемент.

Моменти інерції макета електромаховичних приводів щодо кожної осі пов'язаної системи координат складаються з суми моментів інерції всіх складових частин щодо цих осей.

Основні технічні характеристики макетного блоку електродвигунів-маховиків:

- 1) маса блоку з урахуванням рамок карданового підвісу:

$$m_x = 0,8 \text{ кг}; m_y = 1,0 \text{ кг}; m_z = 1,2 \text{ кг}$$

- 2) моменти інерції блоку з урахуванням рамок карданового підвісу щодо осей карданового підвісу:

$$I_x = 0.0017 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_y = 0.003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; I_z = 0.009 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- 3) осьові моменти інерції електродвигунів-маховиків:

$$I_{m1} = I_{m2} = I_{m3} = I_{m4} = 0.000019 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

- 4) коефіцієнти перетворення електродвигунів-маховиків:

$$K_{\text{дм}} = [240; 260] \text{ рад/В} \cdot \text{с};$$

- 5) постійні часу електродвигунів-маховиків:

$$T_{\text{дм}} = [1.5; 1.7] \text{ с}.$$

Графічне зображення, експериментально отриманих, статичних та динамічних характеристик елементів, що входять до складу блоку електромаховичних приводів, наведено на рис. 6.6–6.8.

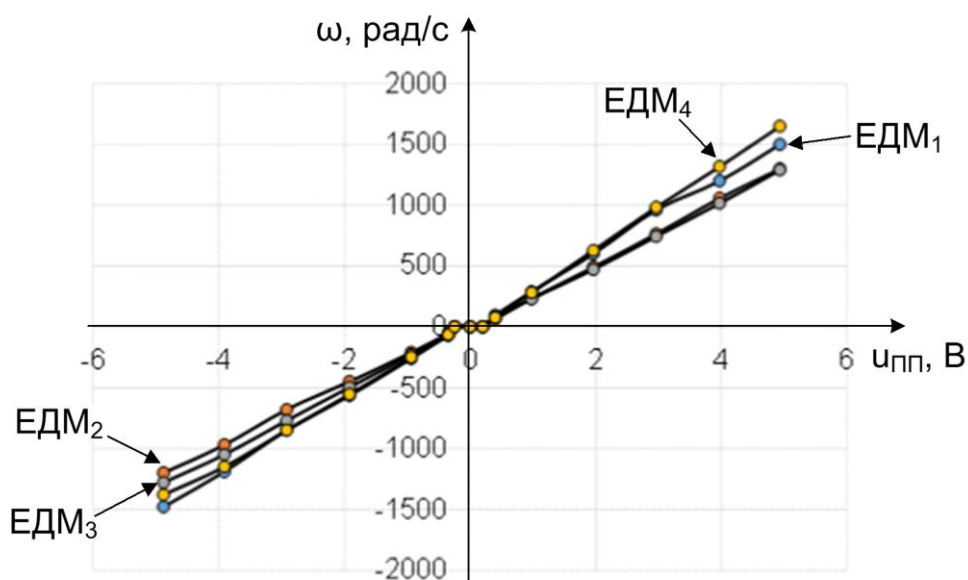


Рисунок 6.6 – Статичні характеристики електродвигунів-маховиків

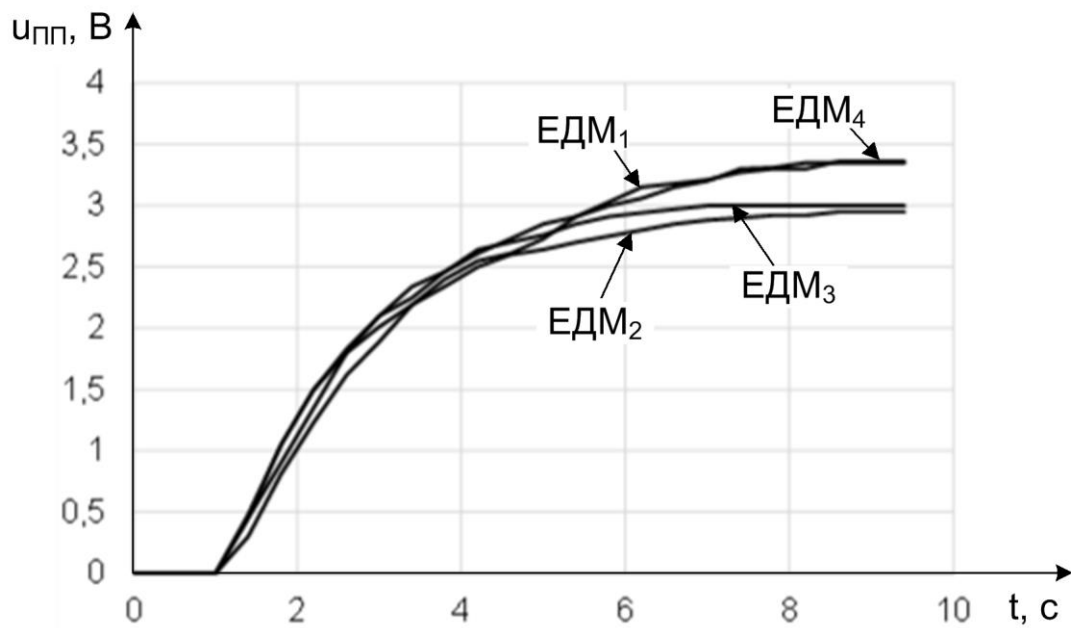


Рисунок 6.7 – Перехідні характеристики електродвигунів-маховиків

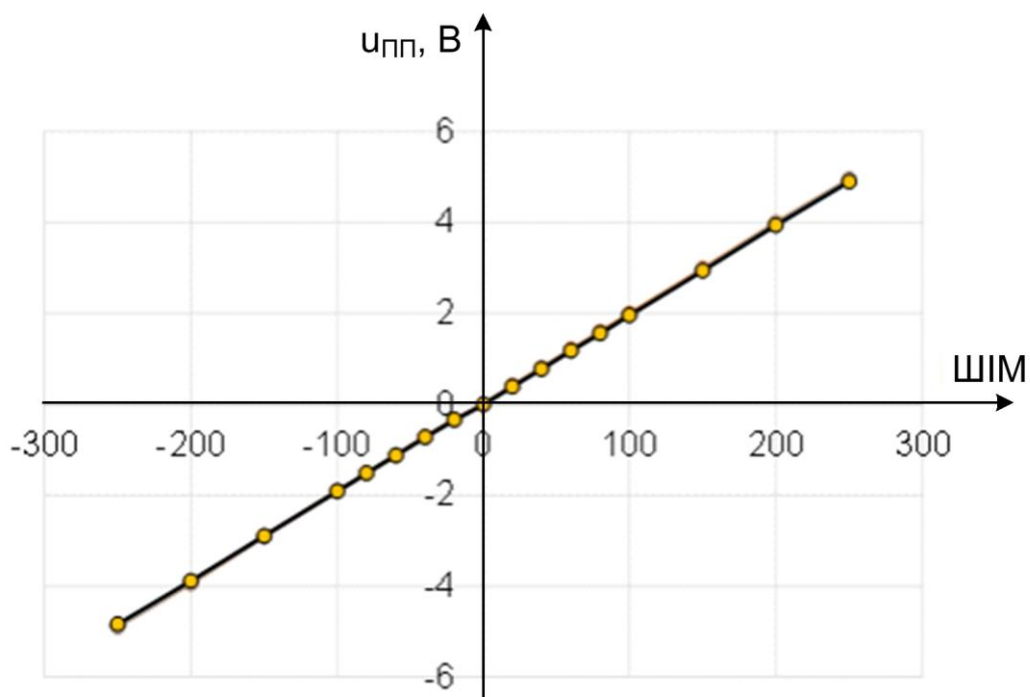


Рисунок 6.8 – Статична характеристика підсилювача потужності

Статичні характеристики електродвигунів-маховиків (рис. 6.6) отримані двома способами вимірювання кутової швидкості:

1) з використанням вбудованих у пристрої раціонального управління технічних засобів виміру;

2) з використанням стандартного безконтактного вимірювача кутової швидкості типу «DIGITAL TACHOMETER».

Статичні характеристики електродвигунів-маховиків незалежно від способу виміру мають практично лінійний характер. При позитивних і негативних значеннях управляючого сигналу статичні характеристики симетричні щодо початку координат. Зона нечутливості, в межах 0,2 В, статичних характеристик на осі абсцис обумовлена наявністю моментів сухого та в'язкого тертя на валах електродвигунів, і відповідає величині напруги торкання електродвигунів-маховиків.

Внаслідок обробки отриманих експериментальних даних вдалося сформулювати лінеаризовані математичні моделі функціональних елементів макетного блоку.

Атрибути математичної моделі ЕДМ₁:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta\omega_1} \cdot 100\% = 1.96\%;$$

2) координати робочої точки р.т.: {0;0};

3) діапазон лінеаризації за напругою $u_1 \in \{-4.88; 4.93\}$; $\Delta u_1 = 9.81$ В;

4) діапазон лінеаризації за кутовою швидкістю

$$\omega_1 \in \{-1480; 1500\}; \Delta\omega_1 = 2980 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

5) оціночні значення параметрів

$$\hat{k}_{\text{ЕДМ}_1} = \frac{\Delta\omega_1}{\Delta u_1} = 304.6 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}; \hat{T}_1 = 1.7 \text{ с};$$

6) передавальна функція $W_{\text{ЕДМ}_1}(s) = \frac{\Omega_1(s)}{U_1(s)} = \frac{\hat{k}_{\text{ЕДМ}_1}}{\hat{T}_1 s + 1}$;

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ЕДМ₂:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta\omega_2} \cdot 100\% = 2.2\%;$$

2) координати робочої точки р. т.: {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою

$$u_2 \in \{-4.62; 4.95\}; \Delta u_2 = 9.57 \text{ В};$$

4) діапазон лінеаризації за кутовою швидкістю

$$\omega_2 \in \{-1170; 1300\}; \Delta\omega_2 = 2470 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

5) оціночні значення параметрів

$$\hat{k}_{\text{ЕДМ}_2} = \frac{\Delta\omega_2}{\Delta u_2} = 256.3 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}; \hat{T}_2 = 1.6 \text{ с}$$

6) передавальна функція $W_{\text{ЕДМ}_2}(s) = \frac{\Omega_2(s)}{U_2(s)} = \frac{\hat{k}_{\text{ЕДМ}_2}}{\hat{T}_2 s + 1};$

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ЕДМ₃:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\Delta_{\text{max}}}{\Delta\omega_3} \cdot 100\% = 1.5\%;$$

2) координати робочої точки р.т. {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою

$$u_3 \in \{-4.88; 4.95\}; \Delta u_3 = 9.83 \text{ В};$$

4) діапазон лінеаризації за кутовою швидкістю

$$\omega_3 \in \{-1287; 1287\}; \Delta\omega_3 = 257.4 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

5) оціночні значення параметрів

$$\hat{k}_{\text{ЕДМ}_3} = \frac{\Delta\omega_3}{\Delta u_3} = 259.2 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}; \hat{T}_3 = 1.45 \text{ с};$$

6) передавальна функція $W_{\text{ЕДМ}_3}(s) = \frac{\Omega_3(s)}{U_3(s)} = \frac{\hat{k}_{\text{ЕДМ}_3}}{\hat{T}_3 s + 1};$

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ЕДМ₄:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\Delta_{\text{max}}}{\Delta\omega_4} \cdot 100\% = 4.1\%;$$

2) координати робочої точки р.т.: {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою $u_4 \in \{-4.82; 4.9\}; \Delta u_4 = 9.72 \text{ В};$

4) діапазон лінеаризації за кутовою швидкістю

$$\omega_4 \in \{-1380; 1653\}; \Delta\omega_4 = 303.3 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

5) оціночні значення параметрів

$$\hat{k}_{\text{ЕДМ}_4} = \frac{\Delta\omega_4}{\Delta u_4} = 311.7 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}; \hat{T}_4 = 1.6 \text{ с};$$

6) передавальна функція $W_{\text{ЕДМ}_4}(s) = \frac{\Omega_4(s)}{U_4(s)} = \frac{\hat{k}_{\text{ЕДМ}_4}}{\hat{T}_4 s + 1}$;

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ПП₁:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta u_1} \cdot 100\% = 0.48\%;$$

2) координати робочої точки р.т.: {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою $u_1 \in \{-4.88; 4.93\}$; $\Delta u_1 = 9.81 \text{ В}$;

4) діапазон лінеаризації по ШІМ: {-250; 250}; $\Delta = 500$;

5) оціночні значення параметрів $\hat{k}_{\text{ПП}_1} = \frac{\Delta u_1}{\Delta} = 0.0196 \text{ В}$;

6) передавальна функція $W_{\text{ПП}_1}(s) = \frac{U_1(s)}{\Delta(s)} = \hat{k}_{\text{ПП}_1}$;

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ПП₂:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta u_2} \cdot 100\% = 2.43\%;$$

2) координати робочої точки р.т.: {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою $u_2 \in \{-4.62; 4.95\}$; $\Delta u_2 = 9.57 \text{ В}$;

4) діапазон лінеаризації по ШІМ: {-250; 250}; $\Delta = 500$;

5) оціночні значення параметрів $\hat{k}_{\text{ПП}_2} = \frac{\Delta u_2}{\Delta} = 0.0194 \text{ В}$;

6) передавальна функція

$$W_{\text{ПП}_2}(s) = \frac{U_2(s)}{\Delta(s)} = \hat{k}_{\text{ПП}_2}$$

7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ПП₃:

1) максимальна похибка лінеаризації

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta u_3} \cdot 100\% = 0.63\%;$$

2) координати робочої точки р.т.: {0; 0};

3) діапазон лінеаризації за напругою $u_3 \in \{-4.88; 4.95\}$; $\Delta u_3 = 9.83 \text{ В}$;

- 4) діапазон лінеаризації по ШІМ: $\{-250; 250\}$; $\Delta = 500$;
- 5) оціночні значення параметрів $\hat{k}_{\text{ПП}_3} = \frac{\Delta u_3}{\Delta} = 0.0196\text{В}$;
- 6) передавальна функція

$$W_{\text{ПП}_3}(s) = \frac{U_3(s)}{\Delta(s)} = \hat{k}_{\text{ПП}_3};$$

- 7) масштаб часу $m_t = 1$.

Атрибути математичної моделі ПП₄:

- 1) максимальна похибка її

$$\delta_{\text{max}} = \frac{\Delta_{\text{max}}}{\Delta u_4} \cdot 100\% = 0.0195\%;$$

- 2) координати робочої точки р.т.: $\{0; 0\}$;
- 3) діапазон лінеаризації за напругою $u_4 \in \{-4.82; 4.9\}$; $\Delta u_4 = 9.72\text{В}$;
- 4) діапазон лінеаризації по ШІМ: $\{-250; 250\}$ $\Delta = 500$;
- 5) оціночні значення параметрів $\hat{k}_{\text{ПП}_4} = \frac{\Delta u_4}{\Delta} = 0.0195\text{В}$;
- 6) передавальна функція

$$W_{\text{ПП}_4}(s) = \frac{U_4(s)}{\Delta(s)} = \hat{k}_{\text{ПП}_4};$$

- 7) масштаб часу $m_t = 1$.

6.3. Пристрій раціонального управління макетним блоком

Функціями пристрою раціонального управління, що входить до складу апаратно-програмного комплексу, є управління вектором кінетичного моменту блоку та підтримання необхідного режиму функціонування блоку електромаховичних приводів за наявності дестабілізуючих впливів. Функціональний склад пристрою та вбудовані програмні засоби дозволяють вводити в блок електродвигунів-маховиків різні види дестабілізації із заданої множини та дослідити їхню поведінку в номінальному та позаштатних режимах роботи, формувати управляючі впливи, проводити гнучке діагностування та гнучке відновлення працездатності блоку.

На рисунку 6.9 наведено функціональну схему апаратно-програмного комплексу експериментальних досліджень блоку електродвигунів-маховиків.

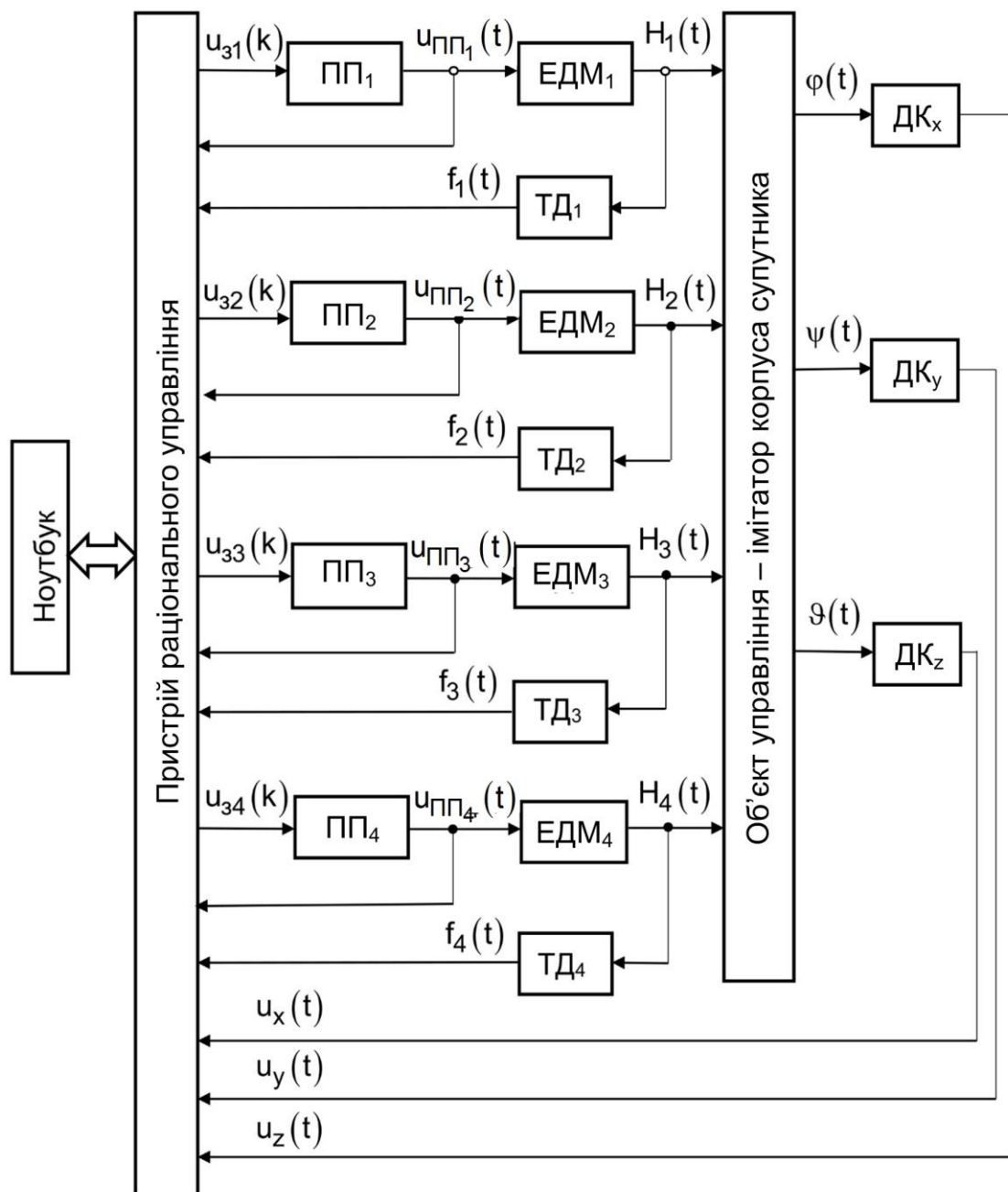


Рисунок 6.9 – Функціональна схема апаратно-програмного комплексу

ЕДМ₁–ЕДМ₄ – електродвигуни-маховики ТД₁–ТД₄ – таходатчики; ДК_x, ДК_y, ДК_z, – датчики кутового положення об'єкта управління щодо осей рамок карданового підвісу; $u_{31}(k) - u_{34}(k)$ – впливи, що задаються на входах підсилювачів потужності; $u_{ПП1}(t) - u_{ПП4}(t)$ – управляючі напруги на входах електродвигунів-маховиків; $\omega_1(t) - \omega_4(t)$ – кутові швидкості електродвигунів-маховиків; $f_1(t) - f_4(t)$ – послідовність імпульсів на

виходах таходатчиків; ϕ, ψ, ϑ – кутове положення рамок карданового підвісу; $u_x(t), u_y(t), u_z(t)$ – вихідні напруги датчиків кутового положення.

Об'єктом управління у складі апаратно-програмного комплексу є конструкція, наведена на рисунку 6.5, що встановлена в рамках карданового підвісу і з урахуванням моментів інерції рамок карданового підвісу.

Ноутбук у складі апаратно-програмного комплексу виконує функції диспетчеризації: формує вихідні дані на режими роботи блоку електродвигунів-маховиків, імітацію видів дестабілізації, візуалізацію та зберігання результатів експериментальних досліджень.

Пристрій раціонального управління реалізує: алгоритми управління підсилювачами потужності блоку електродвигунів-маховиків у номінальному та позаштатних режимах функціонування, функції перетворення аналогових сигналів на цифровий код, генерацію управляючих сигналів на виконавчі механізми та обмін даними з персональним комп'ютером.

Інформаційний обмін між персональним комп'ютером та пристроєм раціонального управління здійснюється по USB-каналі.

Для реалізації завдань управління та діагностування поточного технічного стану блоку електродвигунів-маховиків задіяні такі ресурси мікроконтролера:

- 11 виходів формування управляючих сигналів із широтно-імпульсною модуляцією;
- 16 входів/виходів прийому та видачі логічних та цифрових сигналів;
- 7 входів АЦП для прийому аналогових сигналів амплітудою від нуля до 5 вольт.

Розподіл контактів мікроконтролера у пристрої раціонального управління за призначенням наведено у таблиці 6.1.

Електроживлення пристрою раціонального управління та блоку електродвигунів-маховиків забезпечується трьома автономними стабілізованими джерелами живлення типу AC/DC. Вихідною напругою амплітудою 5В джерела живлення «5В-1» забезпечується живлення силових комутуючих елементів підсилювачів потужності. Джерелом "5В-2" типу GPA15A-05 формується стабілізована напруга амплітудою 5В для живлення мікроконтролера, блоку управління підсилювачами потужності, потенціометричних датчиків кутового переміщення об'єкта та таходатчиків.

Таблиця 6.1

№ конт. Arduino	Позначення	Призначення у пристрої раціонального управління
1	2	3
2	Pr0; ШИМ1	$u_{31}(k)$ – управління ЕДМ1
3	Pr1; ШИМ2	$ДК_{ПП1}$ – дестабілізація параметрів ПП ₁
4	ШИМ3	$u_{32}(t)$ – управління ЕДМ2
5	ШИМ4	$ДК_{ПП2}$ – дестабілізація параметрів ПП ₂
6	ШИМ5	$u_{33}(t)$ – управління ЕДМ3
7	ШИМ6	$ДК_{ПП3}$ – дестабілізація параметрів ПП ₃
8	ШИМ7	$u_{34}(t)$ – управління ЕДМ4
9	ШИМ8	$ДК_{ПП4}$ – дестабілізація параметрів ПП ₄
10	ШИМ9	$ДД_x$ – дестабілізація параметрів $ДК_x$
11	ШИМ10	$ДД_y$ – дестабілізація параметрів $ДК_y$
12	ШИМ11	$ДД_z$ – дестабілізація параметрів $ДК_z$
22	HIGH/LOW	$O_{ПП1}$ – обрив живлення ПП1 основного
23	HIGH/LOW	$O_{ПП2}$ – обрив живлення ПП2 основного
24	HIGH/LOW	$V_{ППО1}$ – увімкнення живлення ПП1 основного
25	HIGH/LOW	$V_{ППО2}$ – увімкнення живлення ПП2 основного
26	HIGH/LOW	$V_{ППР1}$ – увімкнення живлення ПП1 резервного
27	HIGH/LOW	$V_{ППР2}$ – увімкнення живлення ПП2 резервного
28	HIGH/LOW	$O_{ПП3}$ – обрив живлення ПП3 основного
29	HIGH/LOW	$O_{ПП4}$ – обрив живлення ПП4 основного
30	HIGH/LOW	$V_{ППО3}$ – увімкнення живлення ПП3 основного
31	HIGH/LOW	$V_{ППО4}$ – увімкнення живлення ПП4 основного
32	HIGH/LOW	$V_{ППР3}$ – увімкнення живлення ПП3 резервного

Продовження таблиці 6.1

1	2	3
33	HIGH/LOW	$V_{\text{ППР}_4}$ – увімкнення живлення ПП4 резервного
48	HIGH/LOW	S1 – адресна шина мультиплектора БТД
50	MISO	S2 – адресна шина мультиплектора БТД
52	SOK	U – дозвіл роботи мультиплектора БТД
53	SS	Вих. А(MUX) – кутова швидкість ЕДМ1(2,3,4)
A0	АЦП	$u_{\text{ПП}_1}(t)$ – вихідна напруга ПП1
A1	АЦП	$u_{\text{ПП}_2}(t)$ – вихідна напруга ПП2
A2	АЦП	$u_{\text{ПП}_3}(t)$ – вихідна напруга ПП3
A3	АЦП	$u_{\text{ПП}_4}(t)$ – вихідна напруга ПП4
A4	АЦП	$u_{\text{ДК}_x}$ – вихідна напруга датчика ДК _x
A5	АЦП	$u_{\text{ДК}_y}$ – вихідна напруга датчика ДК _y
A6	АЦП	$u_{\text{ДК}_z}$ – вихідна напруга датчика ДК _z

Джерелом « ± 12 » типу FLA17A-05 формуються дві вихідні із загальною точкою стабілізованої напруги «плюс» 12 В та «мінус» 12 В, які використовуються для живлення операційних підсилювачів у блоках «ПН-ЗП», «БП-ДП» і лише «плюс» 12 В для живлення вихідних ланцюгів з відкритим колектором блоку управління підсилювачами потужності.

Контроль вихідної напруги перелічених джерел живлення зовнішніми стандартними засобами вимірювання доступний через технологічний з'єднувач ХТ2.

Реалізація алгоритмів управління електродвигунами-маховиками та імітація дестабілізації функціональних елементів, що входять до складу блоку електродвигунів-маховиків, пояснюється розгорнутою функціональною схемою пристрою раціонального управління наведеною на рис. 6.10.

Сукупність блоків БУ-ПП та БК-ПП у пристрої раціонального управління представлені управляючими підсилювачами потужності. Формування управляючої напруги $u_{\text{ПП}}(t)$ на входи електродвигунів-маховиків та моделювання нештатних режимів функціонування

реалізується блоками БУ-ПП та БК-ПП за допомогою наступних управляючих сигналів мікроконтролера Arduino:

1) $u_{31}(t) \dots u_{34}(t)$ – 8-бітові широтно-модульовані сигнали, що задають, частотою 1 кГц для формування керуючих напруг $u_{пп1}(t) \dots u_{пп4}(t)$;

2) $ДК_{пп1} \dots ДК_{пп4}$ – 8-бітові широтно-модульовані сигнали частотою 1 кГц для моделювання дестабілізації параметрів підсилювачів потужності;

3) $V_{ппо1} \dots V_{ппо4}$ – потенційні сигнали рівня «Лог1» або «Лог0» на включення або відключення основних підсилювачів потужності;

4) $O_{ппо1} \dots O_{ппо4}$ – потенційні сигнали рівня «Лог1» для моделювання несанкціонованого відключення живлення основних підсилювачів потужності;

5) $V_{ппр1} \dots V_{ппр4}$ – потенційні сигнали рівня «Лог1» або «Лог0» для моделювання увімкнення або відключення живлення резервних підсилювачів потужності.

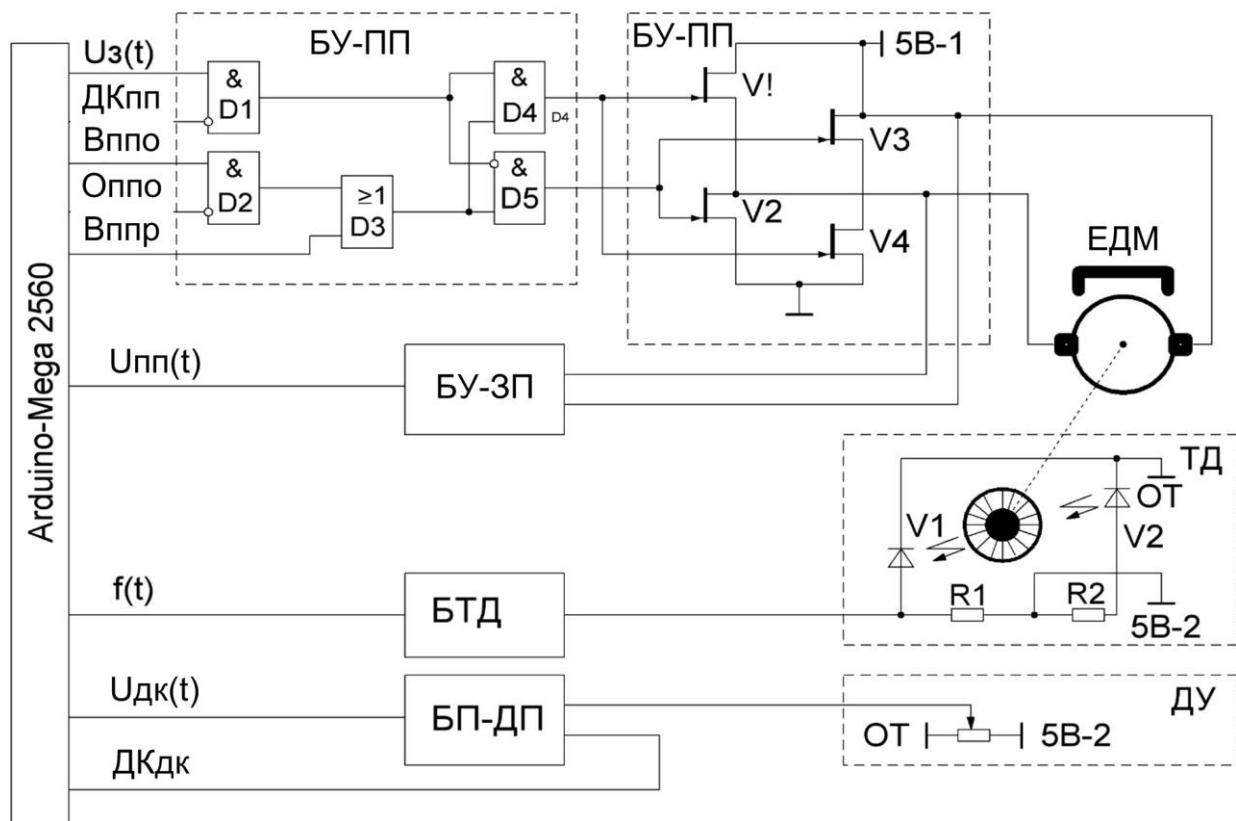


Рисунок 6.10 – Розгорнута функціональна схема одного каналу пристрою раціонального управління

Управління електродвигунами-маховиками в номінальному режимі функціонування, згідно з функціональною схемою (рис. 6.10) та циклограмою формування управляючої напруги (рис. 6.11), виконується наступним чином.

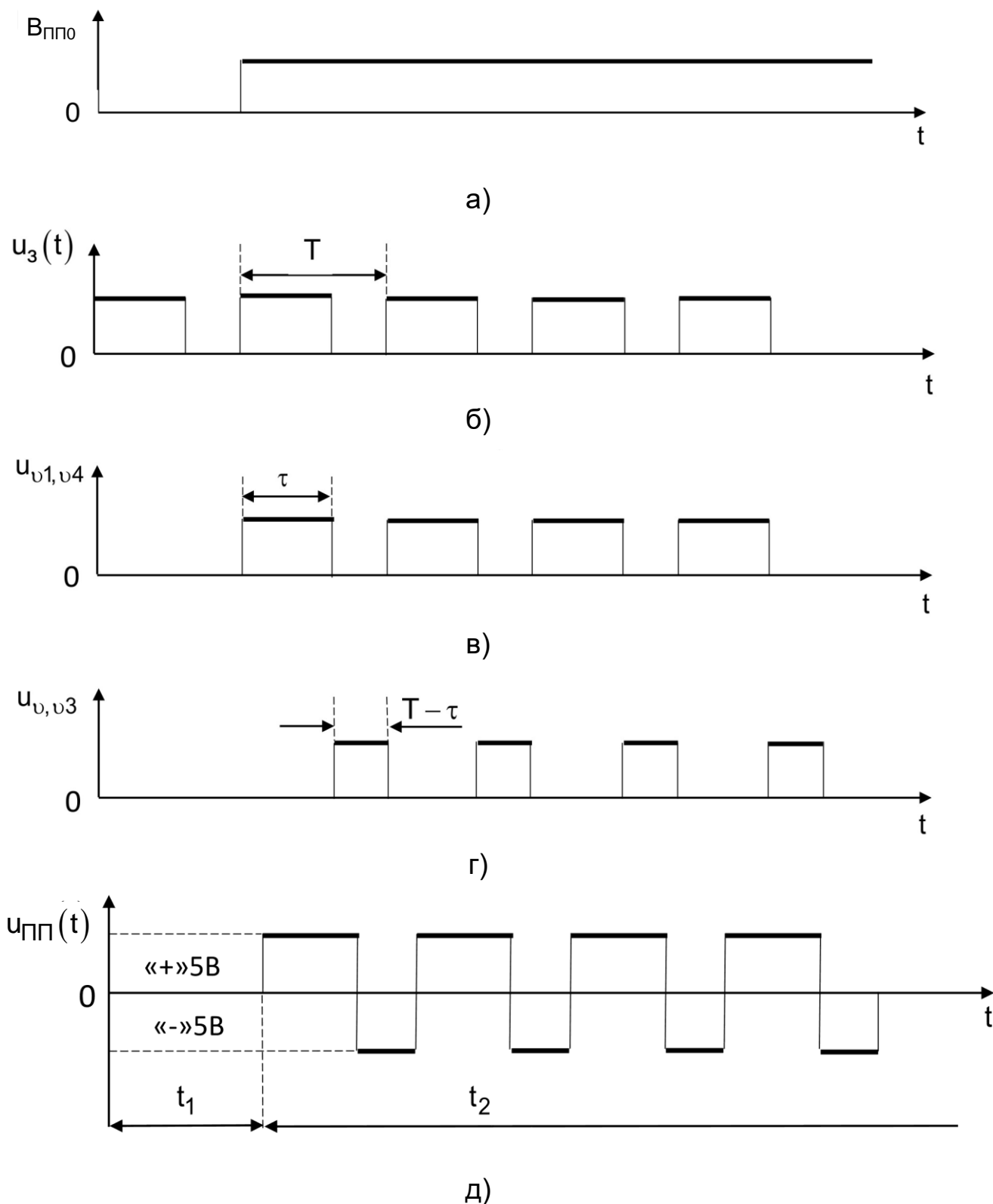


Рисунок 6.11 – Циклограма штатного режиму управління електродвигунами-маховиками

При подачі на прямий вхід логічного елемента D1 сигналу $u_3(t)$ (рис. 6.11, б) у вигляді послідовності імпульсів тривалістю τ , періодом T та наявності на прямому вході елемента D2 потенційного сигналу V_{UM_0} (рис. 6.11, а) рівнем «Лог0» (включення живлення підсилювача потужності основного) управляючі сигнали $u_{V1,V4}$ та $u_{V2,V3}$ (рис. 6.11, в, г) на елементи V1, V4 і V2, V3 силових комутаторів БК-ПП в межах часового інтервалу t_1 не надходять, – вихідна напруга підсилювача потужності (рис. 6.11, д) дорівнює нулю.

Сигналом $V_{ПП_0}$ рівня «Лог1» моделюється включення живлення основного підсилювача потужності, в результаті якого на виході елемента D4, в інтервалі t_2 , формується послідовність імпульсів тривалістю $\tau = n\Delta t$ з періодом T , дискретністю $\Delta t = \frac{T}{N}$, $N=255$ (рис. 6.11, в), а на виході елемента D5 – послідовність імпульсів тривалістю $T - \tau = (N - n)\Delta t$ (рис. 6.11, г). При цьому вихідний сигнал елемента D4 тривалістю τ надходить на управляючі входи комутуючих елементів V1, V4, а вихідний сигнал елемента D5 тривалістю $T - \tau$ – на управляючі входи комутуючих елементів V2, V3.

При такій процедурі управління підсилювачем потужності на вході електродвигуна-маховика в межах періоду T формується імпульсна напруга $u_{UM}(t)$ (рис. 6.11, д) знакозмінної амплітуди, що дорівнює вихідній напрузі стабілізованого джерела живлення «5В-1» зі знаком «плюс» в інтервалі τ і «мінус» в інтервалі $T - \tau$. Результуюча величина управляючої напруги $u_{UM}(t)$ визначається наступною залежністю від параметрів ШІМ-сигналу $u_3(t) = \tau = n\Delta t$:

$$u_{ПП}(t) = \frac{(2n - N)u_{ж}}{N}; N = 255; n = \overline{1, N}; u_{ж} = 5 \text{ В}, \quad (6.3)$$

де $u_{ж}$ – вихідна напруга стабілізованого джерела «5В-1»;

$\frac{u_{ж}}{n}$ – коефіцієнт перетворення підсилювача потужності;

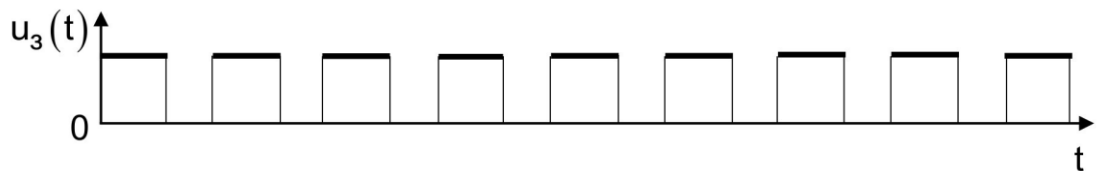
N – максимальна величина коду ШІМ-сигналу $u_3(t)$.

Параметри сигналу $u_3(t)$, що задається для формування необхідної величини вихідної напруги підсилювача потужності програмними засобами мікроконтролера Arduino обчислюються за формулою

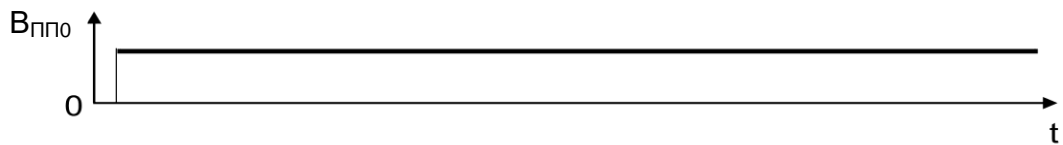
$$n = \frac{(u_3(t) + N)}{2}. \quad (6.4)$$

Часовий інтервал t_2 відображає штатний режим функціонування підсилювача потужності.

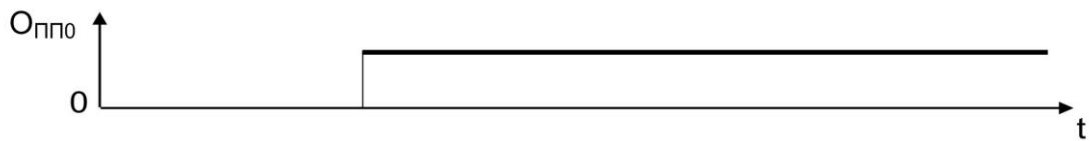
Моделювання дестабілізації виду "обрив напруги живлення" на вході підсилювача потужності пояснюється циклограмою, наведеною на рисунку 6.12.



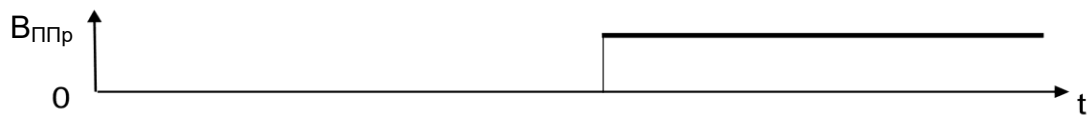
а)



б)



в)



г)

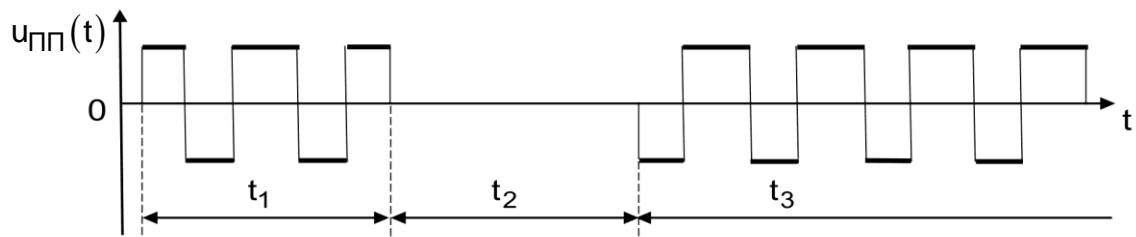


д)



е)

Рисунок 6.12 – Циклограма моделювання дестабілізації виду "обрив напруги живлення" на вході підсилювача потужності



ж)

Рисунок 6.12, аркуш 2

Імітація виду «обрив напруги живлення» на вході підсилювача основного потужності моделюється потенційним сигналом $0_{\text{ПП}0}$ (відключення джерела живлення основного), що надходить з мікроконтролера Arduino на вхід БК-ПП.

При наявності на прямому вході елемента D2 потенційного сигналу $V_{\text{ПП}0}$ рівня «Лог1» та потенційного сигналу $0_{\text{ПП}0}$ рівня «Лог0» на інверсному вході D2 по параметрам задавального сигналу $u_3(t)$, що надходить на прямий вхід елемента D1, блоком БК-ПП формуються сигнали управління $u_{v1,v4}$ та $u_{v2,v3}$ комутуючими елементами V1, V4 і V2, V3 відповідно.

Така комбінація управляючих сигналів на вході БК-ПП забезпечує формування вихідної знакозмінної імпульсної напруги підсилювача потужності $u_{\text{ПП}}(t)$ в штатному режимі функціонування, інтервал t_1 рисунка 6.12.

При зміні рівня потенційного сигналу $0_{\text{ПП}0}$ з «Лог0» на «Лог1» елементом D2 блокується комутація команди $V_{\text{ПП}0}$ комутація команди на включення живлення основного підсилювача потужності, управляючі сигнали на входи комутуючих елементів в V1–V4 не надходять, вихідна напруга $u_{\text{ПП}}(t)$ підсилювача потужності дорівнює нулю. Фрагмент моделювання «обрив напруги живлення підсилювача потужності основного» наведено на часовому інтервалі t_2 , рисунка 6.12.

Відновлення працездатності підсилювача потужності здійснюється потенційним сигналом $V_{\text{ППР}}$ (увімкнення підсилювача потужності резервного) рівня «Лог1» на вході елемента D3. Фрагмент моделювання

включення та роботи резервного підсилювача потужності наведено на часовому інтервалі t_3 рисунка 6.12.

Графічне зображення процесів моделювання дестабілізації параметрів підсилювача потужності пояснюється циклограмою, наведеною на рис. 6.13. В інтервалі t_1 підсилювач потужності функціонує в штатному режимі, параметри $u_{V1,V4}$ і $u_{V2,V3}$ (рис. 6.13, г, д) управління комутуючими елементами V1,V4 та V2,V3 відповідають сигналу $u_3(t)$ мікроконтролера, який задається, підсилювачем потужності формується задана вихідна напруга

$$u_{ПП}(t) = \frac{(2n - N)u_{ж}}{N} \quad (6.5)$$

знакозмінної амплітуди (рис. 6.13, е).

Дестабілізація параметрів підсилювача потужності моделюється сигналом ДКУМ у вигляді послідовності імпульсів тривалістю $\tau_1 = m\Delta t$ (рис. 6.13, в) з періодом проходження T , що надходять на інверсний вхід елемента D1 блоку БК-ПП (рис. 6.10). При цьому для комутуючих елементів V1, V4, блоку БК-ПП тривалість управляючих сигналів $u_{V1,V4}$ буде рівною $\tau - \tau_1 = (n - m)\Delta t$, а для елементів V2,V3 тривалість управляючих сигналів $u_{V2,V3}$ буде рівна $(T - \tau + \tau_1) = (N - n + m)\Delta t$. Фрагмент часового інтервалу t_2 (рис. 6.13 а, б, в, г, д, е) відображає режим дестабілізації параметрів підсилювача потужності.

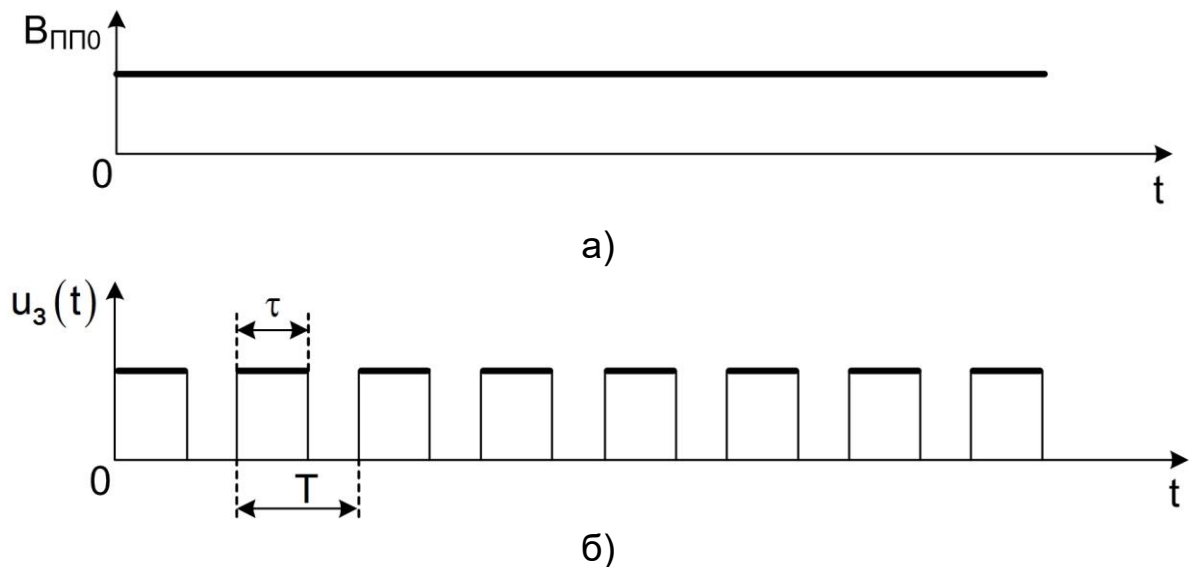


Рисунок 6.13 – Циклограма моделювання дестабілізації параметрів підсилювача потужності

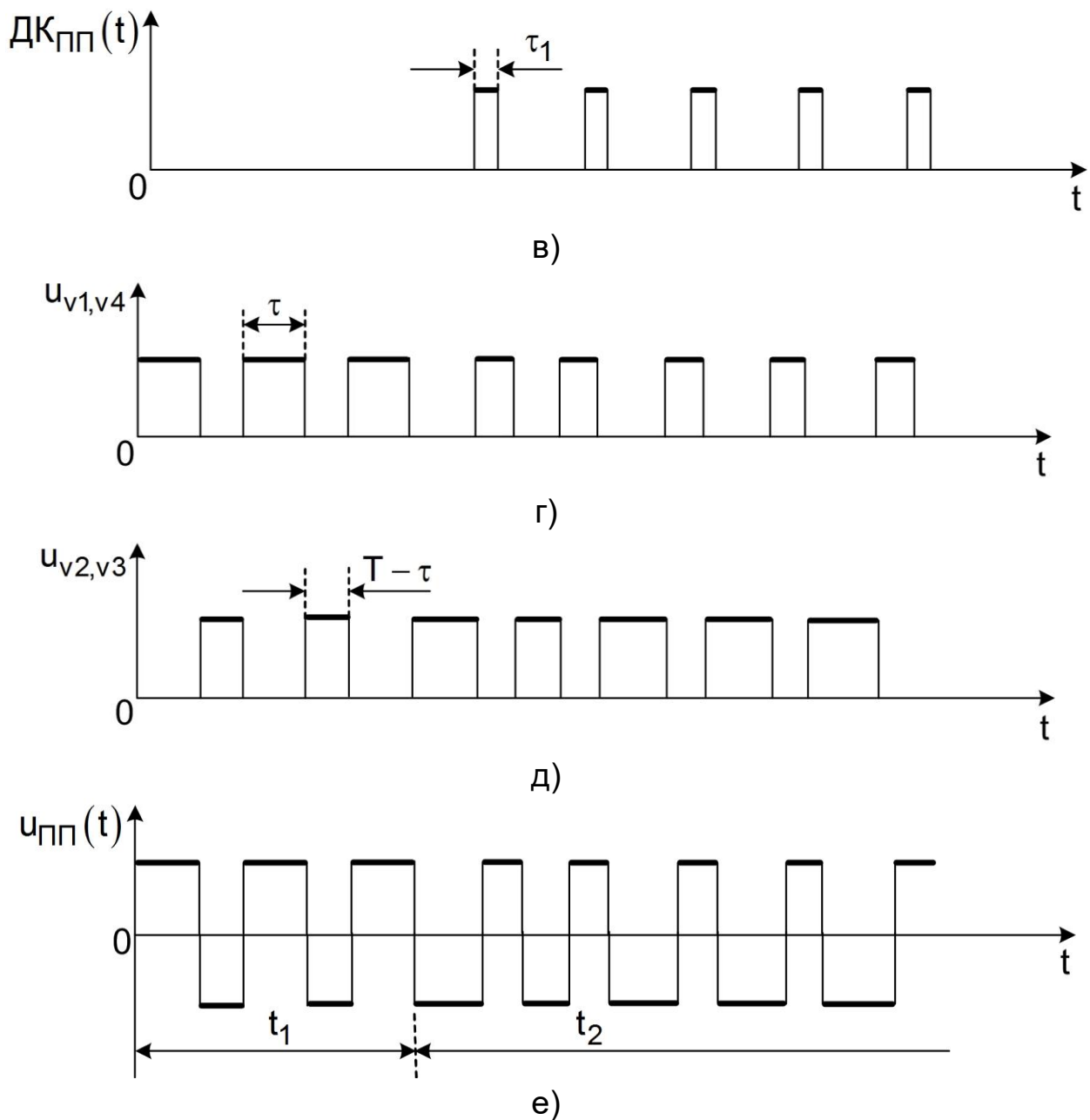


Рисунок 6.13, аркуш 2

Вихідна напруга підсилювача потужності при моделюванні дестабілізації коефіцієнта перетворення визначається наступною залежністю від параметрів n і m

$$u_{yM}(t) = \frac{[2(n-m) - N]u_{ж}}{N}; \quad n = \overline{1, N}; \quad m = \overline{1, N}. \quad (6.6)$$

Величина дестабілізованого коефіцієнта перетворення підсилювача потужності обчислюється із співвідношення

$$\frac{u_{\Pi\Pi}(t)}{\tilde{u}_{\Pi\Pi}(t)} = \frac{k_{\Pi\Pi}}{\tilde{k}_{\Pi\Pi}}; \quad \tilde{k}_{\Pi\Pi} = \frac{k_{\Pi\Pi}[2(n-m) - N]}{2n - N}, \quad (6.7)$$

де $\tilde{k}_{\text{ПП}}$ – дестабілізований коефіцієнт перетворення. Числове значення m , що відповідає заданій величині дестабілізації, обчислюється за такою формулою:

$$m = [2n(k_{\text{ПП}} - \tilde{k}_{\text{ПП}}) + N(\tilde{k}_{\text{ПП}} - k_{\text{ПП}})] / 2k_{\text{ПП}}. \quad (6.8)$$

Обмежена тривалістю послідовність імпульсів ДК_{ПП} з відповідними параметрами дозволяє моделювати зміщення статичної характеристики підсилювача потужності.

Для вимірювання та контролю вихідної імпульсної знакозмінної напруги $u_{\text{ПП}}(t)$ підсилювачів потужності в процесі функціонування блоку електродвигунів-маховиків використовується блок ПН-ЗП що входить до складу пристрою раціонального управління. Фрагмент електричної схеми принципової для одного каналу блоку ПН-ЗП наведено на рисунку 6.14.

Вбудований аналого-цифровий перетворювач у мікроконтролері Arduino дозволяє виконувати вимірювання тільки однополярних позитивних сигналів у межах (0–5) В. Для вимірювання напруги на виходах підсилювачів потужності блоком ПН-ЗП виконується перетворення знакозмінної напруги амплітудою 10 В у пропорційну постійну в межах (0-5) В.

Схема блоку виконана на операційних підсилювачах, напруга живлення на які надходить від стабілізованого джерела живлення ± 12 В.

На вхід блоку надходить знакозмінна імпульсна напруга $u_{\text{ПП}}(t)$ амплітудою від «мінус» 5 В до «плюс» 5 В. Інтегратором, виконаним на базі операційного підсилювача D1 і RC-ланцюга (R5, C1), імпульсна напруга перетворюється на постійне змінюється в тих же межах - від «мінус» 5 до «плюс» 5 В. Далі вихідна напруга з інтегратора через повторювач D2.1 надходить на вхід дільника D2.2, яким обмежується по амплітуді до 5 В. Операційним підсилювачем і резисторами R8, R9 виконується функція зміщення робочої точки елемента D2.4 таким чином, щоб при зміні $u_{\text{УМ}}(t)$ от «мінус» 5 В до «плюс» 5 В напруга на виході D2.4 змінювалась від нуля до 5 В.

Експериментально одержана залежність $u_{\text{ПП}}(t)$ від коду АЦП

$$u_{\text{ПП}}(t) = (\text{код АЦП}) \cdot 0,01468\text{В} - 7,45\text{В}. \quad (6.9)$$

Код АЦП змінюється у межах $\overline{1,1024}$.

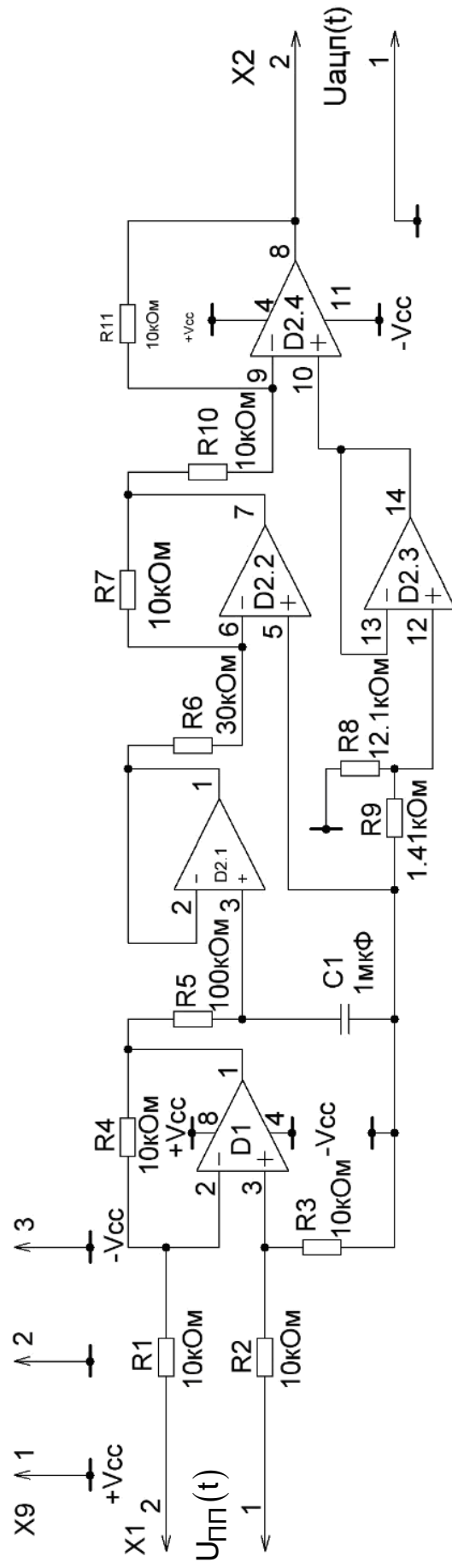


Рисунок 6.14 – Фрагмент принципової схеми блоку перетворення імпульсного знакозмінної напруги $U_{ПП}(t)$ у постійну

Датчик виміру кутової швидкості електродвигуна-маховика на функціональній схемі (рис. 6.10) позначений аббревіатурою ТД. Принципова схема електричного датчика наведена на рисунку 6.15.

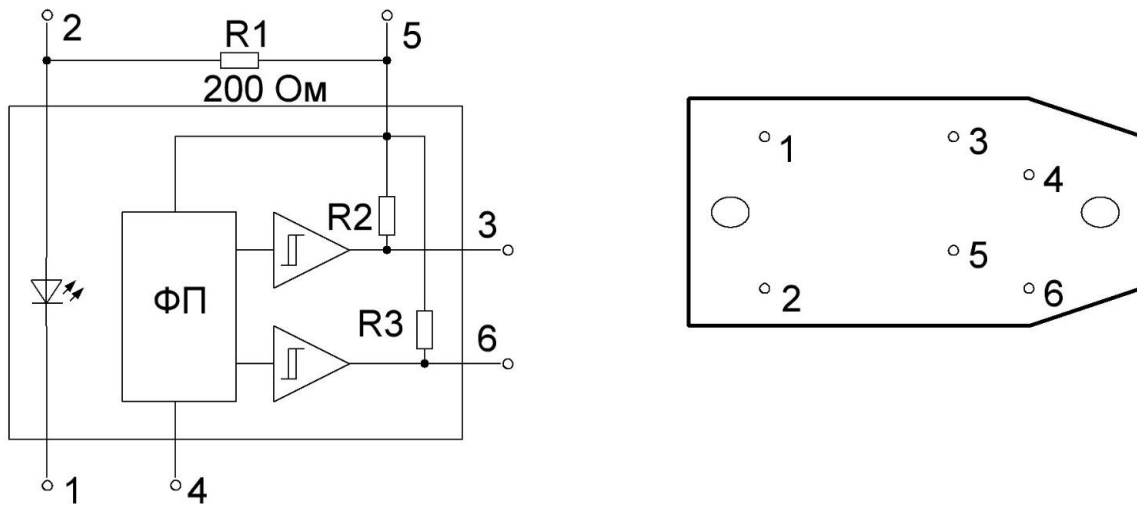


Рисунок 6.15 – Принципова електрична схема інфрачервоного датчика вимірювання кутової швидкості електродвигунів-маховиків

Призначення контактів: 1 – катод; 2 – анод; 3 – вихід А; 4 – GND; 5 – Vcc; 6 – вихід В.

Напруга живлення датчика надходить від стабілізованого джерела живлення 5В-2. На виході «А» формується послідовність імпульсів пропорційна кутовій швидкості електродвигуна-маховика. На виході «В» встановлюється потенційний сигнал «Лог0» або «Лог1» відповідно до напрямку обертання електродвигуна-маховика.

Пристроєм раціонального управління одночасно може контролюватись кутова швидкість лише одного електродвигуна. Контроль кутових швидкостей електродвигунів виконується послідовно наступним чином, на входи мультиплексора, встановленого в блоці БТД, з інфрачервоних датчиків вимірювання кутової швидкості одночасно надходять частотні та потенційні сигнали пропорційні кутовим швидкостям та напрямку обертання електродвигунів. Вибір контрольованого електродвигуна встановлюється адресною шиною S1, S2 мультиплексора:

- S1 = 0, S2 = 0 – контроль кутової швидкості ЕДМ1;
- S1 = 1, S2 = 0 – контроль кутової швидкості ЕДМ2;
- S1 = 0, S2 = 1 – контроль кутової швидкості ЕДМ3;
- S1 = 1, S2 = 1 – контроль кутової швидкості ЕДМ4.

Блоком прийому сигналів з потенціометричних датчиків (БП-ДП) реалізуються функції прийому аналогових сигналів з датчиків кутового положення $ДК_x$, $ДК_y$, $ДК_z$ рамок карданового підвісу з подальшою трансляцією цих сигналів на входи АЦП мікроконтролера Arduino. Моделювання дестабілізації параметрів датчиків виконується шляхом зміщення їх статичних характеристик. Блок БП-ДП складається з трьох незалежних каналів, виконаних за схемою аналогового суматора, рисунок 6.16.

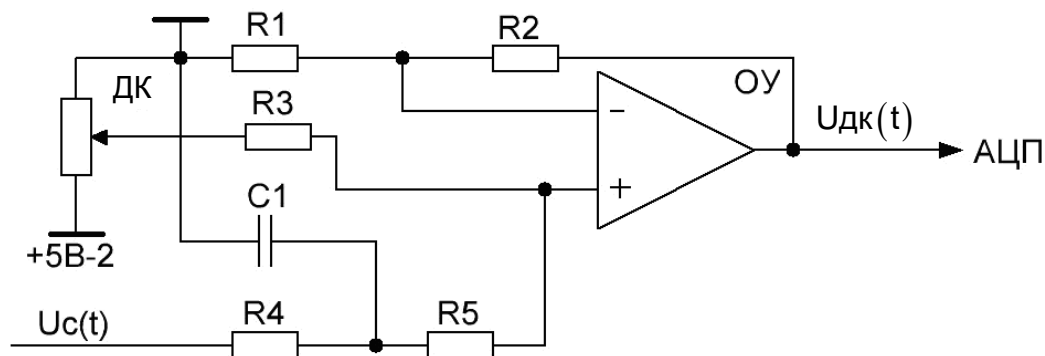


Рисунок 6.16 – Принципова електрична схема одного каналу БП-ДП

На прямий вхід операційного підсилювача надходить напруга з потенціометричного датчика (ДК), що відповідає кутовому положенню рамки карданового підвісу. При відсутності сигналу $U_c(t)$ (напруга зміщення статичної характеристики) напруга з виходу потенціометричного датчика надходить на вхід АЦП з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці. Моделювання дестабілізації параметрів потенціометричних датчиків реалізується шляхом подачі на вхід $U_c(t)$ ШІМ-сигналу, який інтегратором R4, C1 перетворюється на постійний і визначає величину зміщення статичної характеристики.

6.4. Управління експериментальною установкою

Принцип управління електромаховичною системою орієнтації і стабілізації заснований на законі збереження моменту кількості руху механічної системи, що представляє собою деяку масу карданового підвісу і інерційну масу маховика, що обертається. Відповідно до цього закону для одновісної маховичної системи $K + H = 0$, де: $K = I\omega$ – кінетичний момент об'єкта управління; $H = I_m\omega_m$ – кінетичний момент

маховика; I та I_m – моменти інерції об'єкта управління та маховика; ω та ω_m – кутові швидкості об'єкта управління та маховика.

Рух об'єкта управління під дією управляючого моменту, створюваного електродвигуном-маховиком і при відсутності збурювальних моментів описується рівнянням

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{dH}{dt}. \quad (6.10)$$

Для експериментальної установки з розміщенням електродвигунів-маховиків за межами правильної піраміди управляючі моменти щодо осей пов'язаної системи координат описуються системою рівнянь

$$M_x \sin \alpha \sin \beta \sum_{i=1}^4 \frac{dH_i}{dt}; M_y = \sin \alpha \cos \beta \sum_{i=1}^4 \frac{dH_i}{dt}; M_z = \cos \alpha \sum_{i=1}^4 \frac{dH_i}{dt}. \quad (6.11)$$

Величини управляючого моменту і кутового переміщення щодо заданої осі забезпечуються обраною комбінацією напрямків векторів кінетичних моментів.

При установці векторів кінетичних моментів, як це показано на рисунку 6.17, управляючі моменти, створювані електродвигунами-маховиками проектується на осі пов'язаної системи координат наступним чином.

$$\begin{aligned} M_x &= \sin \alpha \sin \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4); \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 + \dot{H}_4); \\ M_z &= \cos \alpha (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 - \dot{H}_4). \end{aligned} \quad (6.12)$$

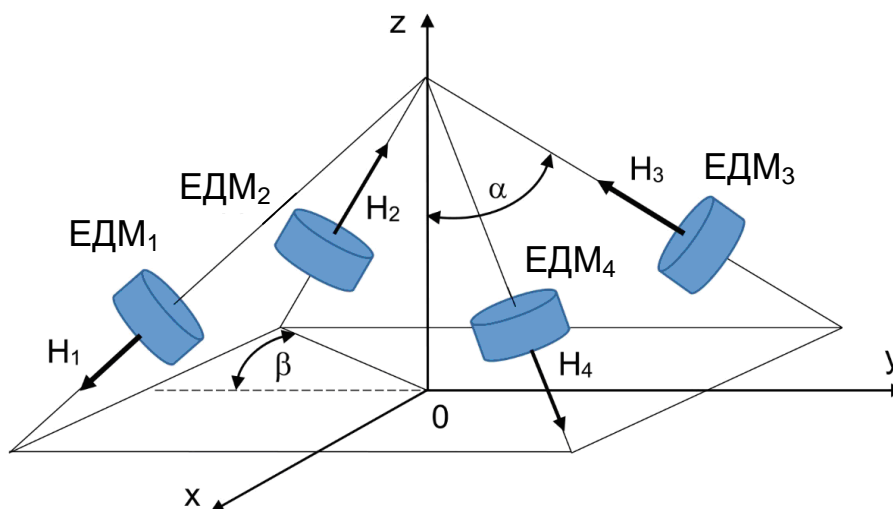


Рисунок 6.17 – Напрямок векторів управляючих моментів при кутовому переміщенні щодо осі Oх

При рівності моментів за модулем $|\dot{H}_1| = |\dot{H}_2| = |\dot{H}_3| = |\dot{H}_4|$ кутове переміщення виконується лише щодо осі X. Створення необхідного управляючого моменту щодо цієї осі в штатному режимі функціонування можливе декількома комбінаціями. При одночасному включенні в роботу електродвигунів-маховиків ЕДМ₁ і ЕДМ₂ управляючі моменти на осі пов'язаної системи координат проектуються наступним чином:

$$\begin{aligned} M_x &= \sin \alpha \sin \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2); \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2) = 0; \\ M_z &= \cos \alpha (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2) = 0. \end{aligned} \quad (6.13)$$

При одночасному створенні управляючих моментів електродвигунами-маховиками ЕДМ₃ і ЕДМ₄:

$$\begin{aligned} M_x &= \sin \alpha \sin \beta (\dot{H}_3 + \dot{H}_4); \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (-\dot{H}_3 + \dot{H}_4) = 0; \\ M_z &= \cos \alpha (\dot{H}_3 - \dot{H}_4) = 0. \end{aligned} \quad (6.14)$$

При одночасному включенні всіх електродвигунів-маховиків:

$$\begin{aligned} M_x &= \sin \alpha \sin \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4); \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 + \dot{H}_4) = 0; \\ M_z &= \cos \alpha (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 - \dot{H}_4) = 0. \end{aligned} \quad (6.15)$$

Проекції векторів управляючих моментів на осі O_y та O_z при виборі комбінацій згідно рисунку 6.17 взаємно компенсуються.

Вектори управляючих моментів, встановлені згідно з рисунку 6.18 проектуються на осі пов'язаної системи координат наступним чином:

$$\begin{aligned} M_x &= \sin \alpha \sin \beta (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 + \dot{H}_4) = 0; \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4); \\ M_z &= \cos \alpha (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 - \dot{H}_4) = 0. \end{aligned} \quad (6.16)$$

Можливі комбінації одночасного включення електродвигунів-маховиків для кутового переміщення лише щодо осі O_y.

$$\begin{aligned} M_y &= \sin \alpha \cos \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_4) \\ M_y &= \sin \alpha \cos \beta (\dot{H}_2 + \dot{H}_3); \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$M_y = \sin \alpha \cos \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4).$$

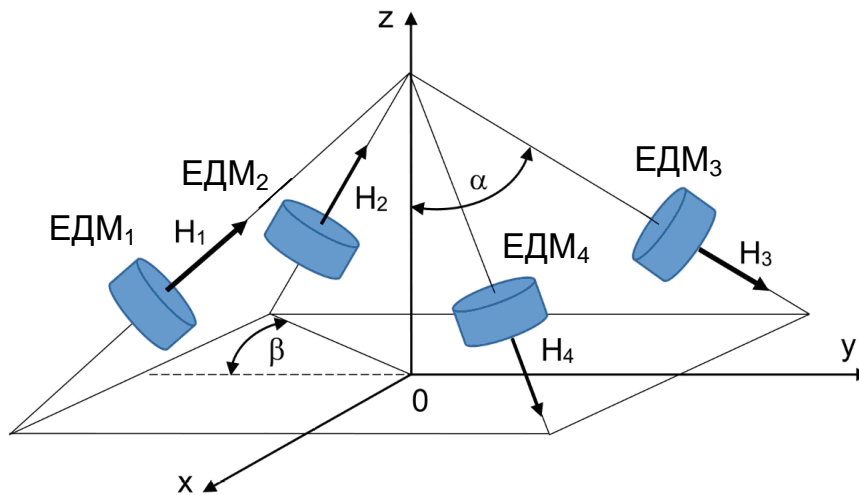


Рисунок 6.18 – Напрямок векторів управляючих моментів при кутовому переміщенні щодо осі Oy

Проекції векторів управляючих моментів на осі пов'язаної системи координат, як це показано на рисунку 6.19, дозволяють виконувати кутове переміщення тільки щодо осі Oz.

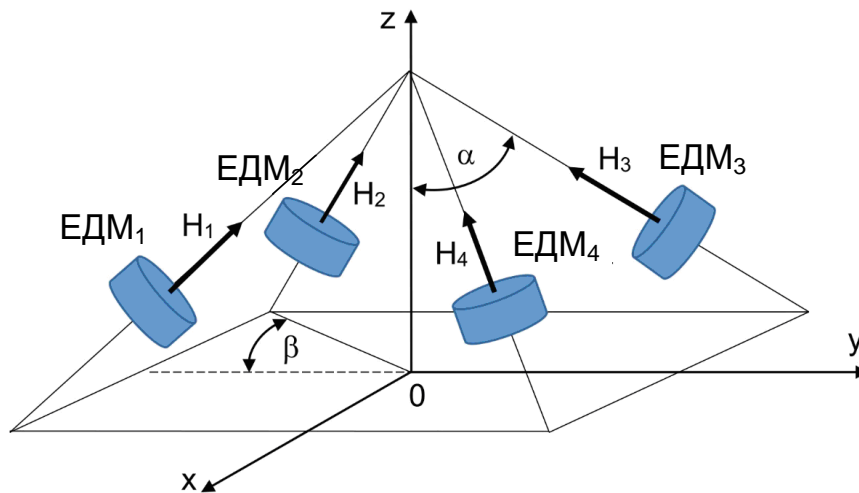


Рисунок 6.19 – Напрямок векторів управляючих моментів при кутовому переміщенні щодо осі Oz

Згідно рисунку 6.19 вектори управляючих моментів на осі на осі пов'язаної системи координат проєктуються наступним чином

$$M_x = \sin \alpha \sin \beta (-\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 - \dot{H}_4);$$

$$M_y = \sin \alpha \cos \beta (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 - \dot{H}_3 - \dot{H}_4); \quad (6.18)$$

$$M_z = \cos \alpha (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4).$$

У штатному режимі функціонування експериментальної установки кутове переміщення щодо осі Oz забезпечується у наступних комбінаціях одночасної роботи електродвигунів-маховиків.

$$\begin{aligned}M_z &= \cos \alpha (\dot{H}_1 + \dot{H}_3); \\M_z &= \cos \alpha (\dot{H}_2 + \dot{H}_4); \\M_z &= \cos \alpha (\dot{H}_1 + \dot{H}_2 + \dot{H}_3 + \dot{H}_4).\end{aligned}\tag{6.19}$$

При тих самих технічних характеристиках електродвигунів-маховиків з однаковою надмірністю структура з пірамідальною схемою установки виконавчих органів має таку перевагу:

1) управляючий момент щодо будь-якої з осей пов'язаної системи координат при необхідності може створюватися кількома електродвигунами-маховиками одночасно;

2) можливі комбінації роботи електродвигунів-маховиків, за яких для зниження кінетичного моменту може бути використаний режим гальмування;

3) при відмові одного або двох електродвигунів ефективність управління не знижується, тому що кутове переміщення може забезпечуватись мінімум двома електродвигунами-маховиками.

Задля більшої функціонування апаратно-програмного комплексу використовувалося середовище програмування Arduino IDE у складі програмних засобів ноутбук. Операційне середовище Arduino IDE забезпечує написання, налагодження та завантаження прошивок у мікроконтролер пристрою раціонального управління управляючих програм блоком електродвигунів-маховиків. У Arduino IDE ці написані програми компілюються в програму мовою C++ з мінімальними відхиленнями. Компілятор Arduino IDE значно полегшує написання програм для цієї платформи.

Для підключення будь-яких електронних компонентів до плати Arduino використовуються порти вводу/виводу, які називаються пінами. Це цифрові, аналогові чи цифро-аналогові інтерфейси, які мають власну функцію.

Цифрові піни можуть формувати та видавати лише два значення: логічний нуль (0, LOW) та логічну одиницю (1, HIGH).

Аналогові входи призначені для підключення аналогових датчиків. Вбудовані в мікроконтролер аналого-цифрові перетворювачі здатні перетворювати аналогові сигнали амплітудою в діапазоні від нуля до 5 В в 10-розрядний цифровий код.

Для прийому або передачі сигналів через ці порти у програмі необхідно їх ініціалізувати, використовуючи функцію `pinMode` (<номер піна>, <режим: INPUT/OUTPUT>), де номер піна – це номер контакту,

вказаний на платі Arduino. Режим INPUT потрібен читання даних, OUTPUT – для передачі.

Цифро-аналогові порти (або ШІМ – входи/виходи з функцією широтно-імпульсної модуляції) забезпечують прийом/передачу даних та не вимагають попередньої ініціалізації. Головною їх перевагою є можливість передавати цифровий код у діапазоні від нуля до 255. Такі порти позначені на платі PWM або знаком «~» (тильда).

Кожен пін має вихідну напругу 5 В та максимальне струмове навантаження 0.02 А.

Цифровими портами формуються команди на включення/відключення основних та резервних підсилювачів потужності, моделюються позаштатні режими роботи підсилювачів потужності виду «обрив напруги живлення», встановлюється вибір адреси контрольованого таходатчика, здійснюється прийом вихідних сигналів з таходатчиків.

Аналогові входи мікроконтролера у завданнях пристрою раціонального управління використовуються для прийому контрольованих вихідних напруг підсилювачів потужності та потенціометричних датчиків кутового положення блоку електродвигунів-маховиків щодо осей рамок карданового підвісу.

Цифро-аналоговими портами формуються сигнали управління підсилювачами потужності, що задаються, моделюється дестабілізація параметрів підсилювачів потужності і датчиків кутового положення блоку електродвигунів-маховиків щодо осей пов'язаної системи координат.

Завантаження робочої програми на пристрій раціонального управління виконується за командою «вивантажити» з монітора ноутбука. Після завантаження робочої програми та її ініціалізації пристрій раціонального управління працює в автономному режимі, виконуючи функції управління, діагностування поточного стану блоку електродвигунів-маховиків, відновлення працездатності при виникненні нештатних ситуацій та передачу в ноутбук каналом USB інформаційних повідомлень про результати функціонування. Візуалізація інформаційних повідомлень формується програмними засобами на екрані монітора ноутбука у вигляді графіків та числових масивів.

Експериментальна установка дослідження макетного блоку електродвигунів-маховиків по суті є сучасним апаратно-програмним інструментальним засобом, що дозволяє здійснювати на системному рівні перевірку та відпрацювання нових ідей, принципів і методів управління кутовим положенням об'єктів за допомогою кінетичних моментів, що розвиваються електродвигунами-маховиками.

Розділ VII. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО БЛОКА ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ

Практування експерименту – це справа смаку.

П. А. Капіца (1894-1984)

– лауреат Нобелівської премії

Експеримент є методичним засобом перевірки ідей і припущень, відповіді на питання і дозволяє розвіяти сумніви. Для проведення експериментальних досліджень макетного блока електродвигунів-маховиків необхідно розробити алгоритмічне та програмне забезпечення процесів раціонального управління працездатністю, а також процесів імітації дестабілізуючих впливів. Завдання експериментальних досліджень полягає у підтвердженні теоретичних положень діагностування та відновлення працездатності на прикладі макетного блока електродвигунів-маховиків та доведенні практичної доцільності принципу раціонального управління за діагнозом для систем орієнтації космічних апаратів.

7.1. Виявлення дестабілізації у макетному блоці електродвигунів-маховиків

Пристрій та принцип дії пірамідальної структури блока ЕДМ представлено у шостому розділі. Кожна з дестабілізуючих впливів множини D (4.1) призводить до порушення працездатності блока ЕДМ – об'єкта раціонального управління. Працездатність об'єкта раціонального управління залежить від працездатності кожного із чотирьох каналів формування сумарного вектору кінетичного моменту блока ЕДМ. Забезпечуючи працездатність кожного каналу за допомогою раціонального управління можна забезпечити працездатність всього блока ЕДМ. Ідентичність чотирьох каналів блока ЕДМ дозволяє використовувати те саме алгоритмічне і програмне забезпечення з параметричною адаптацією до особливостей кожного каналу. Такий підхід дозволяє розглянути особливості експериментальних досліджень на прикладі одного каналу раціонального управління компонентом вектору кінетичного моменту при дестабілізуючих впливах.

Як еталонна модель для процедури виявлення дестабілізації в об'єкті раціонального управління використовується система рівнянь (4.3),

так як в експериментальній установці забезпечується нульове значення початкових умов для макетного зразка ЕДМ і еталонної моделі. У загальному вигляді еталонна модель описується кінцево-різницеvim рівнянням:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + Bu(k); \\ \hat{u}_d(k) &= C\hat{x}(k).\end{aligned}\tag{7.1}$$

У блоці ЕДМ використовується лише датчик кутової швидкості - таходатчик (ТД), тому в конкретному структурному вигляді еталонна модель описується наступним рівнянням:

$$\hat{u}_{ТД}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ЕДМ}}\right) \hat{u}_{ТД}(k) + \frac{T_0}{T_{ЕДМ}} k_0 u_3(k),\tag{7.2}$$

де $T_{ЕДМ}$ – постійна часу ЕДМ;

$k_0 = k_{ПП} k_{ЕДМ} k_{ТД}$ – коефіцієнт перетворення об'єкта раціонального управління, що складається з $k_{ПП}$ – коефіцієнта підсилювача потужності;

$k_{ЕДМ}$ – коефіцієнта перетворення ЕДМ і $k_{ТД}$ – коефіцієнта перетворення ТД;

$\hat{u}_{ТД}(k)$ – оціночне значення вихідного сигналу об'єкта раціонального управління - вихідного сигналу датчика кутової швидкості;

$u_3(k)$ – напруга, що задається на об'єкт раціонального управління;

T_0 – період квантування.

При конкретних значеннях параметрів експериментального каналу, а саме:

$$T_{ЕДМ} = 1.7 \text{ с}; k_0 = 1 \cdot 250 \frac{\text{рад}}{\text{Вс}} \cdot 0.00396 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}} \approx 0.99; T_0 = 0.1 \text{ с},$$

еталонна модель описується наступним рівнянням:

$$\hat{u}_{ТД}(k+1) = 0.941 u_{ТД}(k) + 0.0582 u_3(k)\tag{7.3}$$

різницеvim сигнал

$$\Delta \hat{u}_{ТД}(k+1) = \tilde{u}_{ТД}(k+1) - \hat{u}_{ТД}(k+1),\tag{7.4}$$

де $\tilde{u}_{ТД}(k+1)$ – вихідний сигнал об'єкта раціонального управління містить інформацію про вплив дестабілізуючих впливів.

Виявлення наявності дестабілізуючих впливів у вихідному сигналі здійснюється за допомогою двозначного предикату наступного загального вигляду:

$$Z_0 = S_2 \left\{ \left| \Delta \hat{u}_{ТД}(k+1) \right| \geq \delta_0 \right\}, k = \overline{1, N}; \rho_0. \quad (7.5)$$

При конкретних значеннях предикат описується таким рівнянням

$$Z_0 = S_2 \left\{ \left| \Delta \hat{u}_{ТД}(k+1) \right| \geq 0.1 \right\}, k = \overline{1, 10}; \rho_0 = 0.8. \quad (7.6)$$

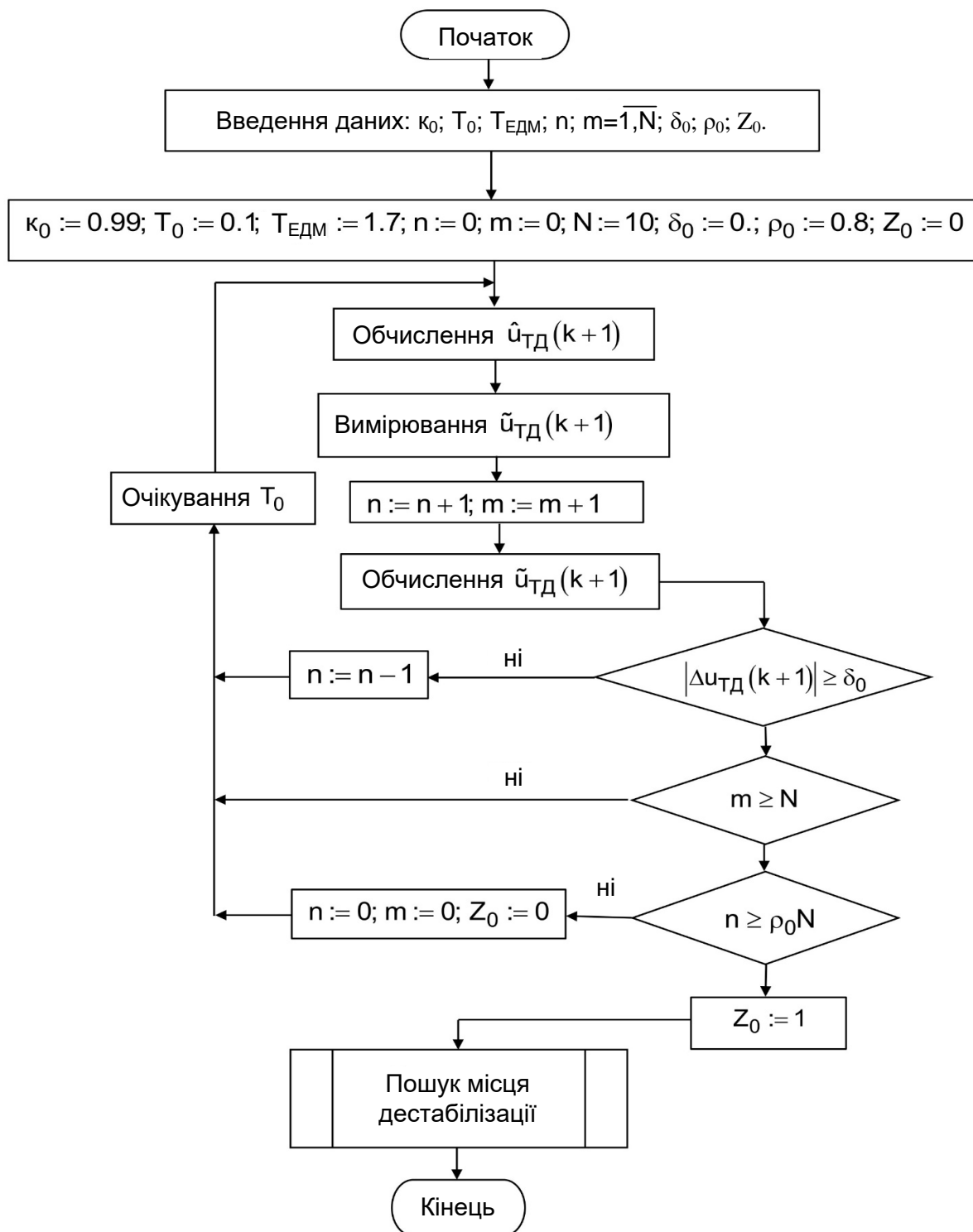
Схема алгоритму виявлення дестабілізації в одному каналі макетного блоку ЕДМ представлена на рисунку 7.1.

Для технічної реалізації алгоритму виявлення дестабілізації база даних блоку діагностування має містити числові дані:

- 1) $K_0 = K_{ПП} K_{ЕДМ} K_{ТД}$ – добуток коефіцієнтів передачі ПП, ЕДМ і ТД;
- 2) $T_{ЕДМ}$ – постійна часу ЕДМ;
- 3) T_0 – період квантування;
- 4) n – число вимірів із ознакою дестабілізації на інтервалі діагностування;
- 5) m – кількість всіх вимірів на інтервалі діагностування;
- 6) N – задана кількість вимірювань на інтервалі діагностування;
- 7) δ_0 – допуск на відхилення від норми вихідного параметра приводу;
- 8) ρ – коефіцієнт довіри (встановлює розробник);
- 9) Z_0 – предикат поточного стану приводу.

Програмна реалізація алгоритму виявлення дестабілізації виконана в операційному середовищі Arduino IDE на мові C++. На рисунку 7.2 представлено програму виявлення дестабілізації.

```
float w1 = 0.0; // Кутова швидкість обертання ДМ (рад/с)
float w1_model = 0.0; // Частота обертання ДМ з розрахунку
еталонної моделі (кутова швидкість)
float w1_model_m1 = 0.0; // Частота обертання ДМ з розрахунку
еталонної моделі (кутова швидкість) - значення з попереднього такту
float K1_T0_d_Tdm; // Коефіцієнти для еталонної моделі приводу
float T0_Tdm_Kum_Kdm;
word Takt = 0;
byte Pr_destab_UM1 = 0; // Ознаки наявності дестабілізації,
розраховані алгоритмом діагностування
float K_um_2 = 0.02;
float K_um_2_1 = 0.02;
float U_um_2 = 0.0; // Вимірювання виходу ПП
float U_um_2_km1 = 0.0; Попереднє вимірювання виходу ПП
```



P

исунок 7.1 – Схема алгоритму виявлення дестабілізації

```

float U_um_2_model = 0.0;
float delta_U_um_2 = 0.0; // Різниця між модельною та виміряною
напругою ПП
float dopusk_U_um = 0.0;
  
```

```

//float delta_U_um_2_measure = 0.0; // Різниця між поточним та
попереднім вимірюванням U_um_2;
//float delta_U_um_2_measure_km1 = 0.0; // Попереднє значення
delta_U_um_2_measure;
//float dopusk_delta_U_um_2_measure; // Допуск на збільшення
(похідну) напруги ПП
float delta_U_um_2_km1 = 0.0; // Попереднє значення різниці між
модельною та виміряною напругою ПП
K1_T0_d_Tdm = 0.933; // Коефіцієнти для еталонної моделі приводу
0.933
T0_Tdm_Kum_Kdm = 0.31; //
K_um_2 = 0.02;
K_um_2_1 = 0.02;
void loop() {
Takt = Takt + 1;
// вимірювання періоду імпульсів від енкодера по DM_x
digitalWrite(AddrBusMX_S1, HIGH); // номер каналу MX - 0
digitalWrite(AddrBusMX_S2, LOW);
digitalWrite(MX_Enable, LOW);
// Мультиплексор працює - активний рівень дозволу - 0
delay(1);
if (Uz != 0.0) {
Enc_T0 = pulseIn(F_AngularVel, LOW);
Enc_T1 = pulseIn(F_AngularVel, HIGH);
w1 = 6.28 * (20000.0 / float(Enc_T0 + Enc_T1)); // радіан за
секунду
}
else {
Enc_T0 == 0;
Enc_T1 == 0;
w1 = 0.0;
}
// Усереднення вимірювань
SumF = SumF + w1 - Enc_Over4;
AngVel_Aver = SumF / 4;
Enc_Over4 = Enc_Over3;
Enc_Over3 = Enc_Over2;
Enc_Over2 = Enc_Over1;

```

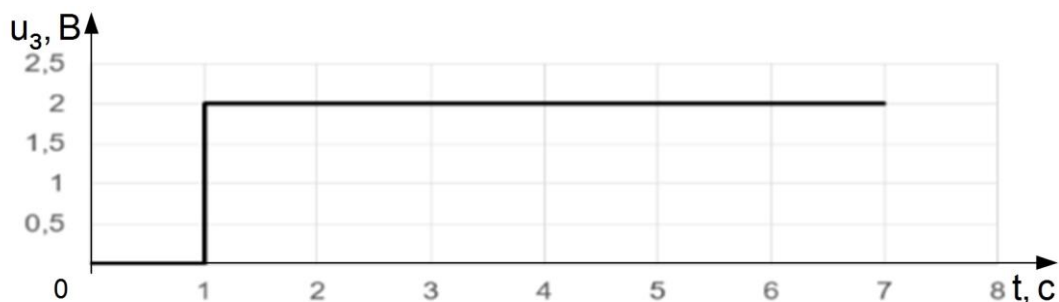
```

Enc_Over1 = w1;
// Розрахунок еталонної моделі ДМ та неузгодженості з фізичним
виміром швидкості ДМ та еталонної моделі
w1_model = ( K1_T0_d_Tdm * w1_model_m1 ) + (
T0_Tdm_Kum_Kdm * Uz );
w1_model_m1 = w1_model;
delta_w1 = abs( w1_model - AngVel_Aver ); // неузгодженість
вимірної та модельної швидкостей
if (w1_model == 0.0) {dopusk_w1 = 5.0;}
else {dopusk_w1 = abs( 0.10 * w1_model );} // розрахунок допуску -
10% від модельного значення
if ( delta_w1 >= dopusk_w1 ) {
if (CounterOfFailures < 5) {CounterOfFailures++;}
}
else {if (CounterOfFailures > 0) {CounterOfFailures--;}
}
if (CounterOfFailures == 5) {Pr_destab = 1;}
else {Pr_destab = 0;}
if ((Pr_destab == 1) && (Pr_destab_m1 == 0)) {Pr_destab_Trigger =
1;}
Pr_destab_m1 = Pr_destab;
delay(100); // Період дискретизації
}

```

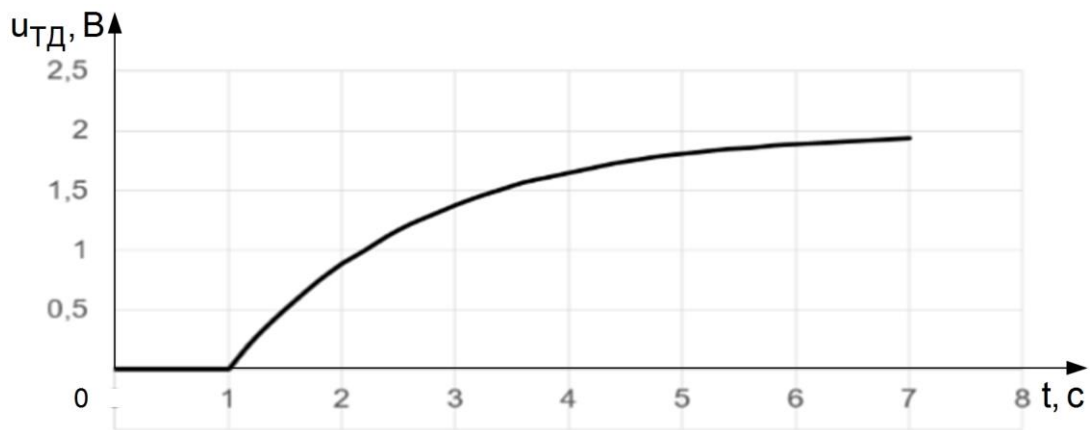
Рисунок 7.2 – Програма виявлення дестабілізації

Розглянемо результати експериментальних досліджень щодо виявлення дестабілізації в макетному блоці. На рисунку 7.3 представлені графіки задавального сигналу ступінчастої форми, який подається при $t = 1\text{c}$ і графік перехідної характеристики ОПУ за відсутності дестабілізації.



а)

Рисунок 7.3 – Перехідна характеристика ОПУ для номінального режиму

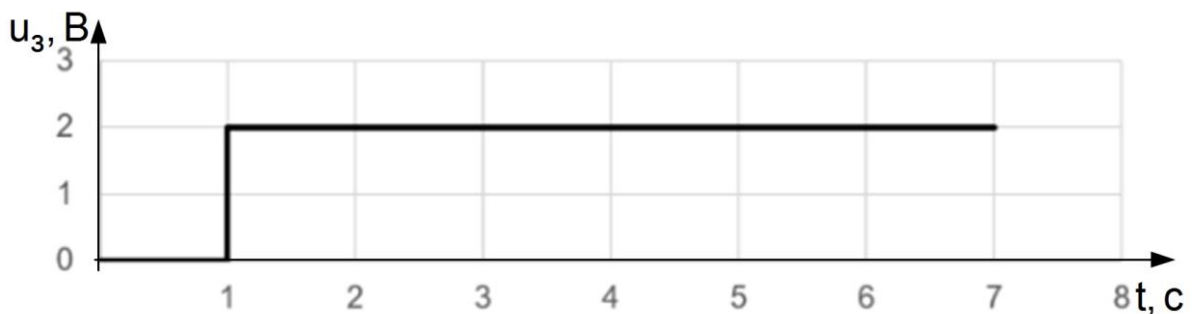


б)

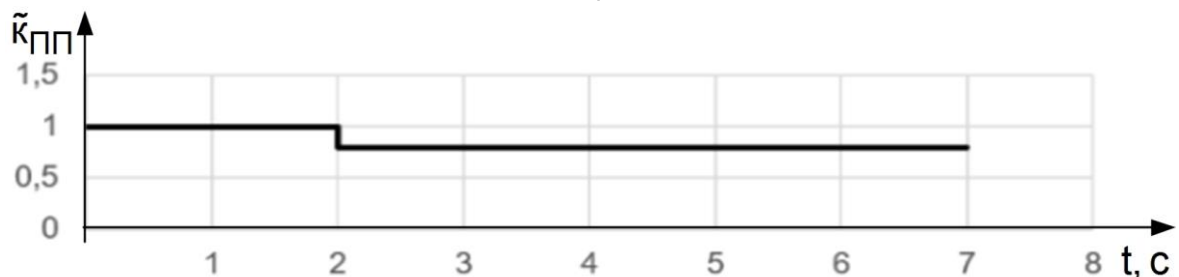
Рисунок 7.3, аркуш 2

З графіка перехідної характеристики витікає, що тривалість перехідного процесу ОРУ становить $t_{\text{пп}} \approx 5\text{ с}$. Режим роботи ОРУ у цьому експерименті номінальний, тобто режим при якому дестабілізуючий вплив не імітувався.

При імітації виду дестабілізуючого впливу d_{11} у функціонуванні ПП, що полягає у зменшенні коефіцієнта підсилення, отримані наступні результати (рис. 7.4).

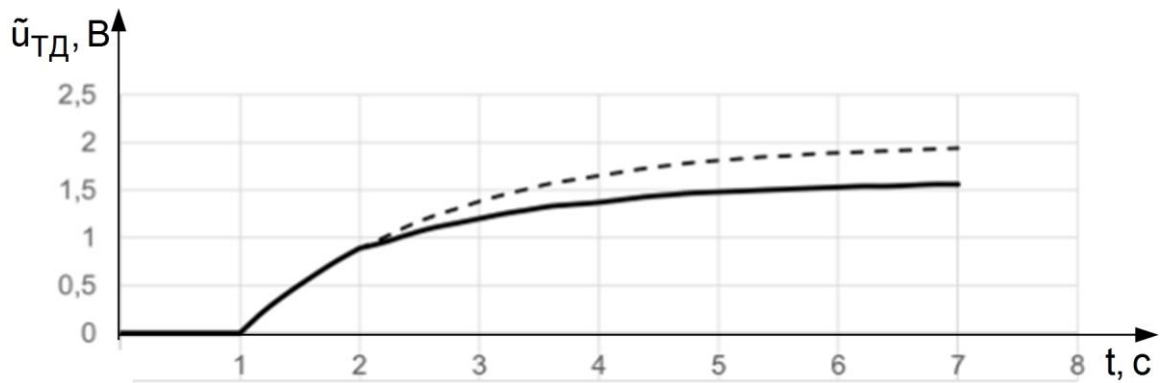


а)

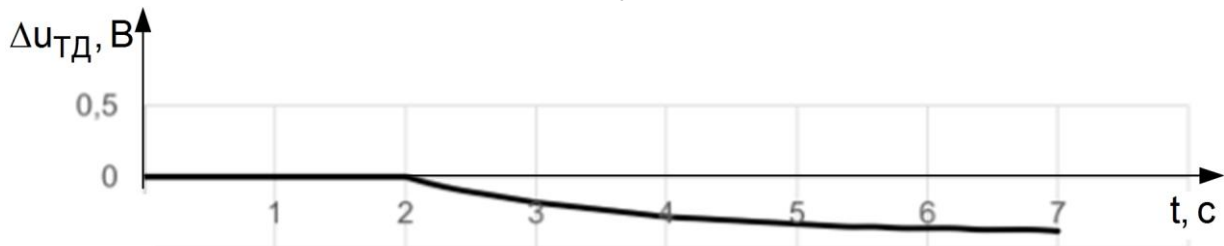


б)

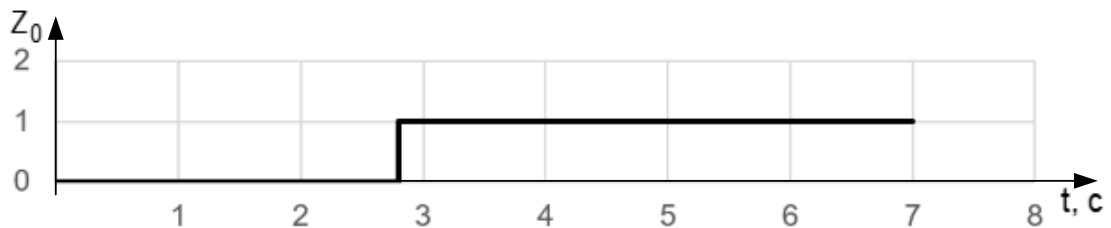
Рисунок 7.4 – Графіки перехідних процесів ОРУ при виді дестабілізації d_{11}



в)



г)



д)

Рисунок 7.4, аркуш 2

На рисунку 7.4, а представлений графік задавального впливу ступінчастого типу, який подається на ОРУ на першій секунді. На рисунку 7.4, б наведено характер зміни коефіцієнта передачі ПП. Так, до $t = 2$ с коефіцієнт передачі $k_{\text{ПП}} = 1$, а в момент часу $t = 2$ с коефіцієнт передачі зменшується на 0.2 і $\tilde{k}_{\text{ПП}} = 0.8$. Рисунок 7.4, в відображає реакцію ОРУ на ступінчастий вхідний сигнал і ступінчасте зменшення коефіцієнта передачі ПП. На рисунку 7.4, г представлений характер зміни відхилення вихідного сигналу ОРУ $\tilde{u}_{\text{ТД}}(t)$ від сигналу еталонної моделі $\hat{u}_{\text{ТД}}(t)$, відповідного номінальному. На рисунку 7.4, д представлений графік предикату Z_0 . Значення предикату $Z_0 = 1$ з'являється на момент часу $t = 2.8$ с. Тривалість періоду з моменту появи дестабілізуючого впливу $\tilde{k}_{\text{ПП}} = 0.8$ до моменту виявлення дестабілізації становить $t_0 = 0.8$ с. Це час виявлення дестабілізуючого впливу $d_{11} = \tilde{k}_{\text{ПП}} = 0.8$.

Отримані результати експериментальних досліджень алгоритмів та програм виявлення дестабілізації в ОРУ свідчать про практичну можливість оперативно виявляти появи кожного впливу з множини D протягом 1 с. Слід зазначити, що використання предикатного рівняння (7.6) дозволяє оперативно виявляти як одноразові, так і багаторазові дестабілізуючі впливу.

7.2. Пошук дестабілізуючих функціональних елементів у макетному блоці

У макетному блоці ЕДМ в кожному каналі ОРУ використовуються функціональні елементи ПП, ЕДМ та ТД. Кожен функціональний елемент може бути дестабілізований на експериментальній установці рядом дій. Так, на ПП можуть діяти впливи з підмножини D_1 :

$$D_1 = \{d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}\}, \quad (7.7)$$

де d_{11} – зменшення коефіцієнта посилення; d_{12} – позитивний дрейф; d_{13} – негативний дрейф; d_{14} – обрив по входу.

На ЕДМ дестабілізація імітується за допомогою впливів з підмножини D_2 :

$$D_2 = \{d_{21}, d_{22}, d_{23}\}, \quad (7.8)$$

де d_{21} – зменшення коефіцієнта передачі; d_{22} – збільшення постійної часу; d_{23} – обрив ланцюга управління.

Працездатність ТД дестабілізується впливами з підмножини D_3 :

$$D_3 = \{d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{34}\}, \quad (7.9)$$

де d_{31} – зменшення коефіцієнта передачі; d_{32} – позитивний дрейф; d_{33} – негативний дрейф; d_{34} – обрив виходу.

Пошук непрацездатного функціонального елемента ОРУ базується фактично на виявленні дестабілізації у його функціонуванні. Тому для виявлення використовуються еталонні моделі функціональних елементів у формі рівнянь, що описують номінальний режим їх функціонування. Так, для ПП як еталонна модель використовується рівняння

$$\hat{u}_{\text{ПП}}(k) = k_{\text{ПП}} u_3(k). \quad (7.10)$$

Різницевий сигнал

$$\Delta u_{\text{ПП}}(k) = \tilde{u}_{\text{ПП}}(k) - \hat{u}_{\text{ПП}}(k) \quad (7.11)$$

використовується для формування аргументу двозначного предикатного рівняння

$$Z_1 = S_2 \{ |\Delta u_{\text{ПП}}(k)| \geq \delta_1 \}, k = \overline{1, N}; \rho_1, \quad (7.12)$$

за допомогою якого виявляється дестабілізація в ПП при

$$\delta_1 = 0.15, \rho_1 = 0.8.$$

Схема алгоритму формування значень предикату Z_1 в одному каналі макетного блоку представлена на рисунку 7.5.

Для технічної реалізації алгоритму виявлення дестабілізації підсилувача потужності база даних блоку діагностування має містити числові дані:

- 1) $k_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт перетворення підсилувача потужності;
- 2) T_0 – період квантування;
- 3) n_1 – кількість вимірювань з ознакою дестабілізації ПП на інтервалі діагностування;
- 4) m_1 – кількість всіх вимірів на інтервалі діагностування;
- 5) N – задана кількість вимірювань на інтервалі діагностування;
- 6) δ_1 – допуск на відхилення від норми вихідного параметра ПП;
- 7) ρ_1 – коефіцієнт довіри;
- 8) Z_0 – предикат поточного стану приводу;
- 9) Z_1 – предикат поточного стану підсилувача потужності.

Програмна реалізація алгоритму представлена на рисунку 7.6.

```
float w1 = 0.0; // Кутова швидкість обертання ДМ (рад/с)
float w1_model = 0.0; // Частота обертання ДМ із розрахунку
еталонної моделі (кутова швидкість)
float w1_model_m1 = 0.0; // Частота обертання ДМ з розрахунку
еталонної моделі (кутова швидкість) – значення з попереднього такту
float K1_T0_d_Tdm; // Коефіцієнти для еталонної моделі приводу
float T0_Tdm_Kum_Kdm;
word Takt = 0;
byte Pr_destab_UM1 = 0; // Ознаки наявності дестабілізації,
розраховані алгоритмом діагностування
float K_um_2 = 0.02;
float K_um_2_1 = 0.02;
float U_um_2 = 0.0; // Вимірювання виходу ПП
float U_um_2_km1 = 0.0; // Попередній вимір виходу ПП
```

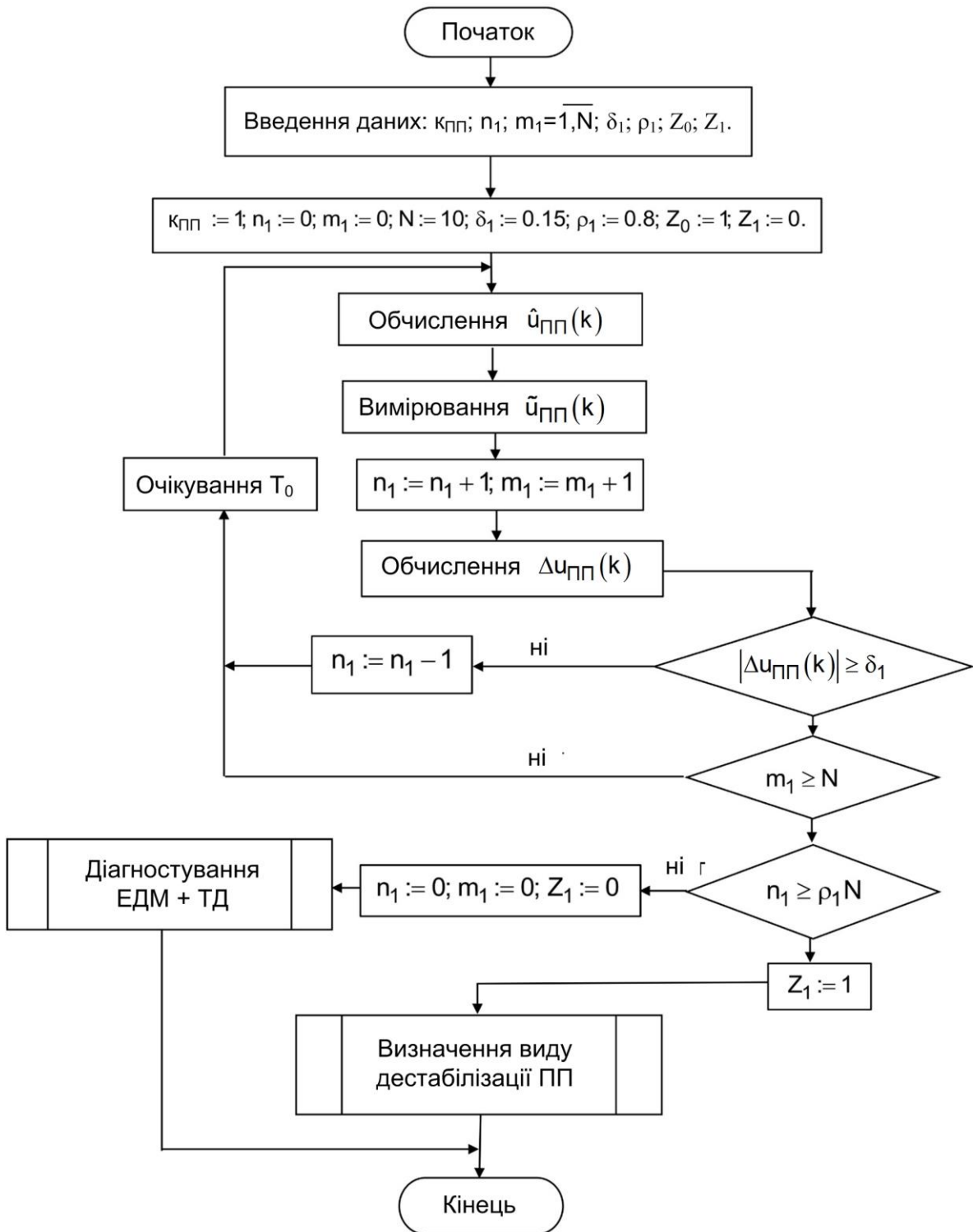



Рисунок 7.5 – Схема алгоритму формування значень предикату Z_1

```

float U_um_2_model = 0.0;
float delta_U_um_2 = 0.0; // Різниця між модельною та виміряною
напругою ПП

```

```

float dopusk_U_um = 0.0;
//float delta_U_um_2_measure = 0.0; // Різниця між поточним та
попереднім вимірюванням U_um_2;
//float delta_U_um_2_measure_km1 = 0.0; // Попереднє значення
delta_U_um_2_measure;
//float dopusk_delta_U_um_2_measure; // Допуск на збільшення
(похідну) напруги ПП
float delta_U_um_2_km1 = 0.0; // Попереднє значення різниці між
модельною та вимірюваною напругою ПП
K1_T0_d_Tdm = 0.933; // Коефіцієнти для еталонної моделі приводу
0.933
T0_Tdm_Kum_Kdm = 0.31; //
K_um_2 = 0.02;
K_um_2_1 = 0.02;
void loop() {
Takt = Takt + 1;
// Розрахунок еталонної моделі ПП та неузгодженості по фізичному
виходу ПП та еталонної моделі
U_um_2 = Coeff_Measure * float(analogRead(Output_UM2)) +
Offset_Measure; // Вимірювання виходу ПП
U_um_2_model = K_um_2 * Uz; // Обчислення виходу ПП по
моделі
delta_U_um_2_km1 = delta_U_um_2;
delta_U_um_2 = abs( U_um_2_model - U_um_2 );
if ((Pr_destab == 1) && (Pr_destab_m1 == 0)) {Pr_destab_Trigger = 1;}
Pr_destab_m1 = Pr_destab;
// Пошук місця відмови
if (Pr_destab_Trigger == 1) {
Pr_destab_K_dm = 0;
Pr_destab_PowerBreak = 0;
Pr_destab_K_um = 0;
if ( (delta_U_um_2 <= dopusk_U_um) )
{
if ((Pr_destab_K_um_Trigger == 0) &&
(Pr_destab_PowerBreak_Trigger == 0)) {Pr_destab_K_dm = 1;}
}
if ( delta_U_um_2 > dopusk_U_um ) // Дестабілізація по Kum або
обрив {

```

```

    if ( abs(delta_U_um_2) > abs(delta_U_um_2_km1) )
    {
        if ((Pr_destab_K_um_Trigger == 0) &&
            (Pr_destab_K_dm_Trigger == 0)) {Pr_destab_PowerBreak = 1;}
    }
}
// Встановлення тригерів для ознак дестабілізації
if ((Pr_destab_K_um == 1) && (Pr_destab_K_um_m1 == 0))
{Pr_destab_K_um_Trigger = 1;}
Pr_destab_K_um_m1 = Pr_destab_K_um;
delay(100); // Період дискретизації
}

```

Рисунок 7.6 – Програма реалізації алгоритму формування предикату Z_1

При експериментальних дослідженнях алгоритму та програми послідовно імітувалися дестабілізуючі впливи з підмножини D_1 . На рисунку 7.7 представлені графіки сигналів, що відображають процес виявлення дестабілізації в ПП.

При подачі ступінчастого задавального сигналу $u_3 = 2\text{В}$ в момент часу $t = 1\text{с}$ (рис. 7.7, а) вихідний сигнал $\tilde{u}_{\text{УМ}}$ зберігає своє номінальне значення до $t = 2\text{с}$, в цей момент часу збільшується дрейф нуля на величину $u_0 = 0,2\text{В}$ (рис. 7.7, б), вихідний сигнал ПП збільшується на величину u_0 і стає рівним $\tilde{u}_{\text{ПП}} = 2,2\text{В}$ (рис. 7.7, в). Різницевий сигнал до $t = 2\text{с}$ нульовий, а при $t = 2\text{с}$ збільшується на $\Delta u_{\text{ПП}} = u_0$ (рис. 7.7, г). В результаті обробки різницевого сигналу за допомогою предикатного рівняння (7.12) на інтервалі часу $t \in (2,3)\text{с}$ булевий признак Z_1 приймає значення «1», що свідчить про непрацездатність ПП.

Аналогічні результати отримані при імітації видів дестабілізуючих впливів d_{11}, d_{13} і d_{14} .

При виявленні дестабілізації в ЕДМ + ДМ + ТД використовується еталонна модель, що описується рівнянням:

$$\hat{u}_{\text{ТД}}(k+1) = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{ЕДМ}}}\right) \hat{u}_{\text{ТД}}(k) + \frac{T_0}{T_{\text{ЕДМ}}} k_{\text{ЕДМ}} k_{\text{ТД}} u_3(k). \quad (7.13)$$

Різницевий сигнал

$$\Delta u_{\text{ТД}}(k+1) = \tilde{u}_{\text{ТД}}(k+1) - \hat{u}_{\text{ТД}}(k+1) \quad (7.14)$$

містить інформацію про дестабілізацію як у ЕДМ, так і у ТД.

Двозначне предикатне рівняння базується на використанні $\Delta u_{ТД}(k+1)$:

$$Z_2 = S_2 \left\{ \left| \Delta u_{ТД}(k+1) \right| \geq \delta_2 \right\}, k = \overline{1, N}; \rho_2. \quad (7.15)$$

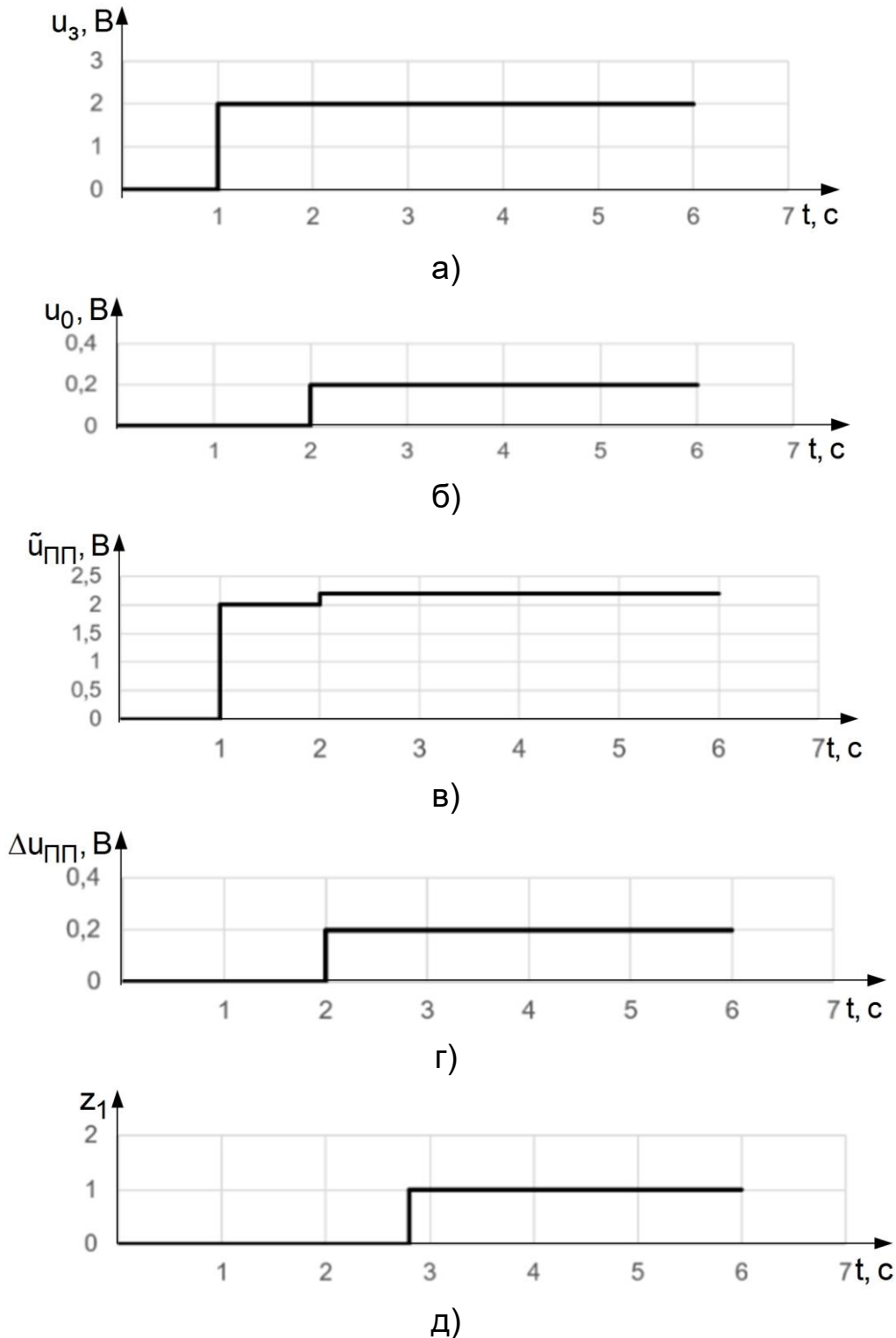


Рисунок 7.7 – Графіки перехідних процесів ПП при виді дестабілізації d_{12}

При виявленні дестабілізації в ЕДМ + ТД використовувалися параметри: $\delta_2 = 0,15$; $\rho_2 = 0,8$.

Схема алгоритму формування значень предикату Z_2 на одному каналі макетного блоку представлена на рисунку 7.8.

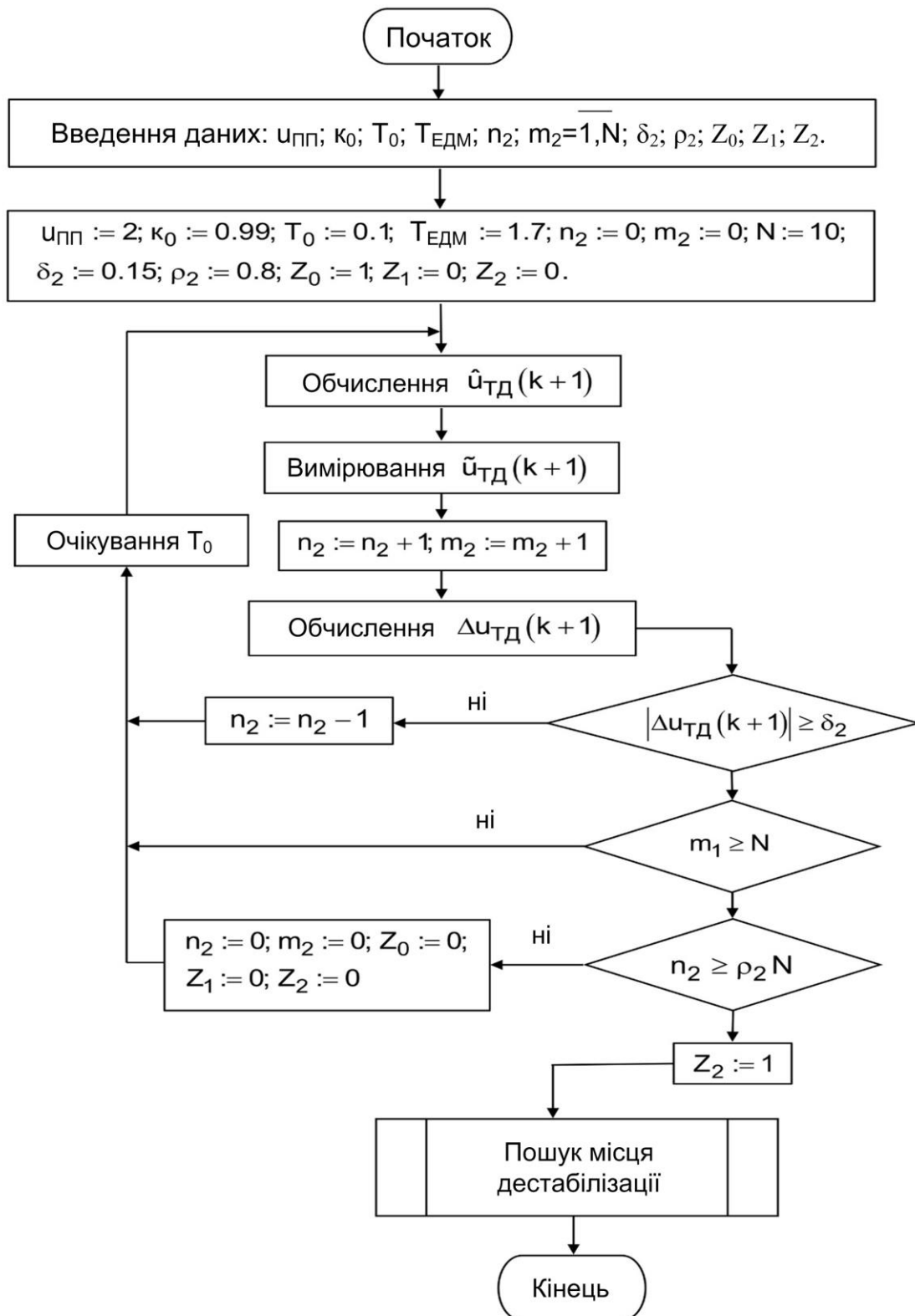


Рисунок 7.8 – Схема алгоритму формування значень предикату Z_2

Для технічної реалізації алгоритму виявлення дестабілізації з'єднання ЕДМ+ТД база даних блоку діагностування має містити числові дані:

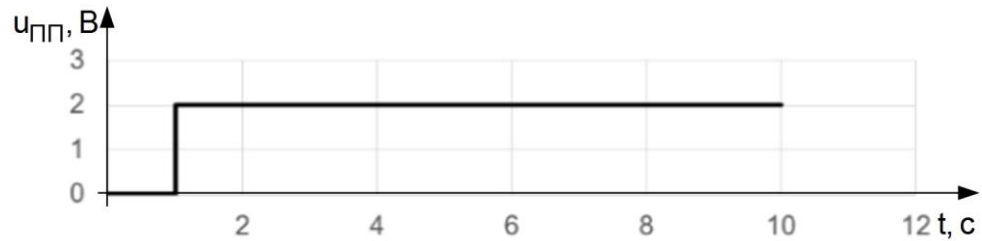
- 1) $u_{\text{ПП}}$ – напруга на виході підсилювача потужності;
- 2) k_0 добуток коефіцієнтів перетворення ПП, ЕДМ, ТД;
- 3) T_0 – період квантування;
- 4) $T_{\text{ЕДМ}}$ – постійна часу ЕДМ;
- 5) n_2 – кількість вимірів з ознакою дестабілізації з'єднання ЕДМ+ТД на інтервалі діагностування;
- 6) m_2 – кількість всіх вимірів на інтервалі діагностування;
- 7) N задане число вимірювань на інтервалі діагностування;
- 8) δ_2 – допуск на відхилення від норми вихідного параметра з'єднання ЕДМ+ТД;
- 9) ρ_2 – коефіцієнт довіри;
- 10) Z_0 – предикат поточного стану приводу;
- 11) Z_1 – предикат поточного стану підсилювача потужності;
- 12) Z_2 – предикат поточного стану з'єднання ЕДМ + ТД.

Розглянемо графіки перехідних процесів, що ілюструють особливості пошуку дестабілізуючого функціонального елемента у фрагменті ЕДМ + ТД. На рисунку 7.9 наведено графіки сигналів, що відображають циклограму знаходження дестабілізуючого впливу d_{22} – збільшення постійної часу.

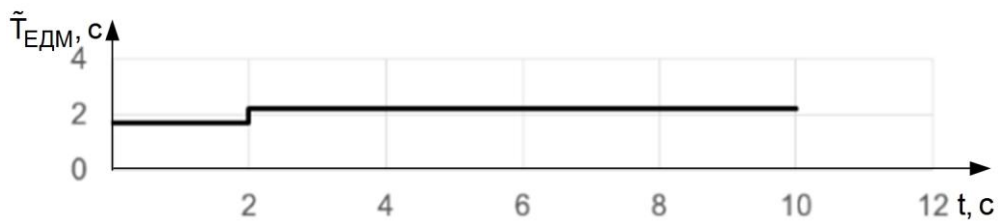
При подачі заданого ступінчастого сигналу на вхід ОРУ $u_3 = 2$ В в момент часу $t = 1$ с на вході ПП також з'явиться вихідний ступінчастий сигнал $u_{\text{ПП}} = 2$ В, так як $k_{\text{УМ}} = 1$ (рис. 7.9, а). В момент часу $t = 2$ с стрибкоподібно змінюється постійна часу з 1,7 с до 2,2 с (рис.7.9, б). Вихідний сигнал $\hat{u}_{\text{ТД}}$ з цього моменту зазнає зменшення щодо еталонного сигналу $\hat{u}_{\text{ТД}}$ (рис. 7.9, в). Різницевий сигнал $\Delta u_{\text{ТД}}$ відображає це зменшення (рис. 7.9, г). Обробка різницевого сигналу $\Delta u_{\text{ТД}}$ за допомогою предикатного рівняння Z_2 (7.15) на інтервалі часу $t \in (2,3)$ дозволяє отримати значення булевої ознаки $Z_2 = 1$, що свідчить про непрацездатність фрагмента ЕДМ + ТД. Для виявлення дестабілізуючого впливу d_{22} використовується двозначне предикатне рівняння, отримане з відповідної діагностичної моделі

$$Z_3 = S_2 \left\{ \delta_3 - \left[\Delta u_{ТД}(k+2) - \Delta u_{ТД}(k+1) \right] \left[u_{ТД}(k) - u_{ПП}(k) \right] - \right. \\ \left. - \left[\Delta u_{ТД}(k+1) - \Delta u_{ТД}(k) \right] \left[u_{ТД}(k+1) - u_{ПП}(k+1) \right] \right\}; k = \overline{1,10}; \rho_3. \quad (7.16)$$

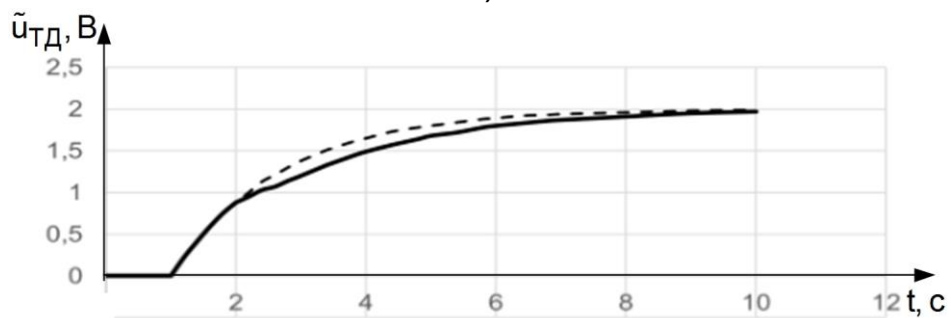
При виявленні d_{22} використано такі параметри: $\delta_3 = 0,12$; $\rho_3 = 0,8$.



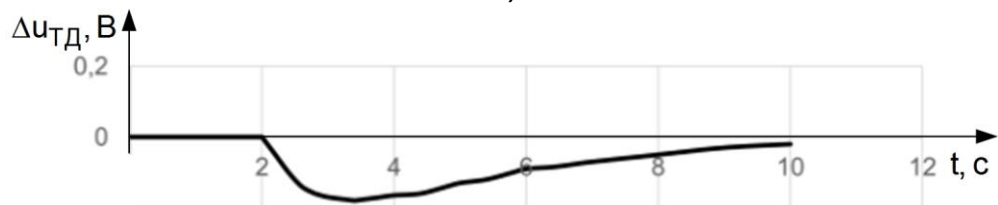
а)



б)



в)

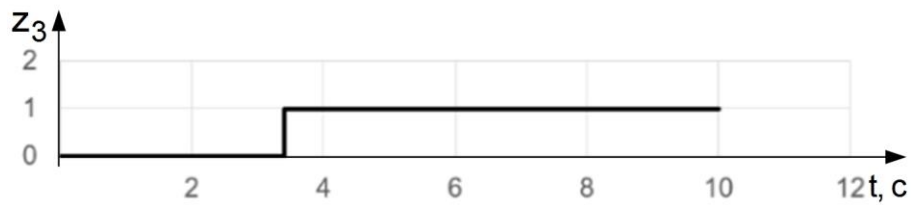


г)



д)

Рисунок 7.9 – Графіки перехідних процесів фрагмента ЕДМ + ТД при виді дестабілізації d_{22}



е)

Рисунок 7.9, аркуш 2

Схема алгоритму формування значень предикату Z_3 представлена на рисунку 7.10.

Для технічної реалізації алгоритму формування значень предикату Z_3 база даних блоку діагностування має містити числові дані:

- 1) $u_{\text{ПП}}$ – напруга на виході підсилювача потужності;
- 2) $k_{\text{ЕДМ}}$ – коефіцієнт перетворення ЕДМ;
- 3) $k_{\text{ТД}}$ – коефіцієнт перетворення ТД;
- 4) T_0 – період квантування;
- 5) $T_{\text{ЕДМ}}$ – постійна часу ЕДМ;
- 6) n_3 – кількість вимірів з ознакою дестабілізації з'єднання ЕДМ + ТД на інтервалі діагностування;
- 7) m_3 – кількість всіх вимірів в інтервалі діагностування;
- 8) N – задане число вимірювань на інтервалі діагностування;
- 9) δ_3 – допуск на відхилення від норми вихідного параметра з'єднання ЕДМ+ТД;
- 10) ρ_3 – коефіцієнт довіри;
- 11) Z_0 – предикат поточного стану приводу;
- 12) Z_1 – предикат поточного стану підсилювача потужності;
- 13) Z_2 – предикат поточного стану з'єднання ЕДМ + ТД;
- 14) Z_3 – предикат поточного стану ЕДМ.

На рисунку 7.9, ж показано, що за період часу $t \in (2,6 \div 3,4)$ обробляються сигнали відповідно до предикатного рівняння (7.16) і при $t = 3,4\text{с}$ значення булевої ознаки $Z_3 = 1$. Таке значення ознаки означає, що причиною непрацездатності фрагмента ЕДМ + ТД є зміна інерційних властивостей ЕДМ, що характеризуються параметром постійної часу $T_{\text{ЕДМ}}$.

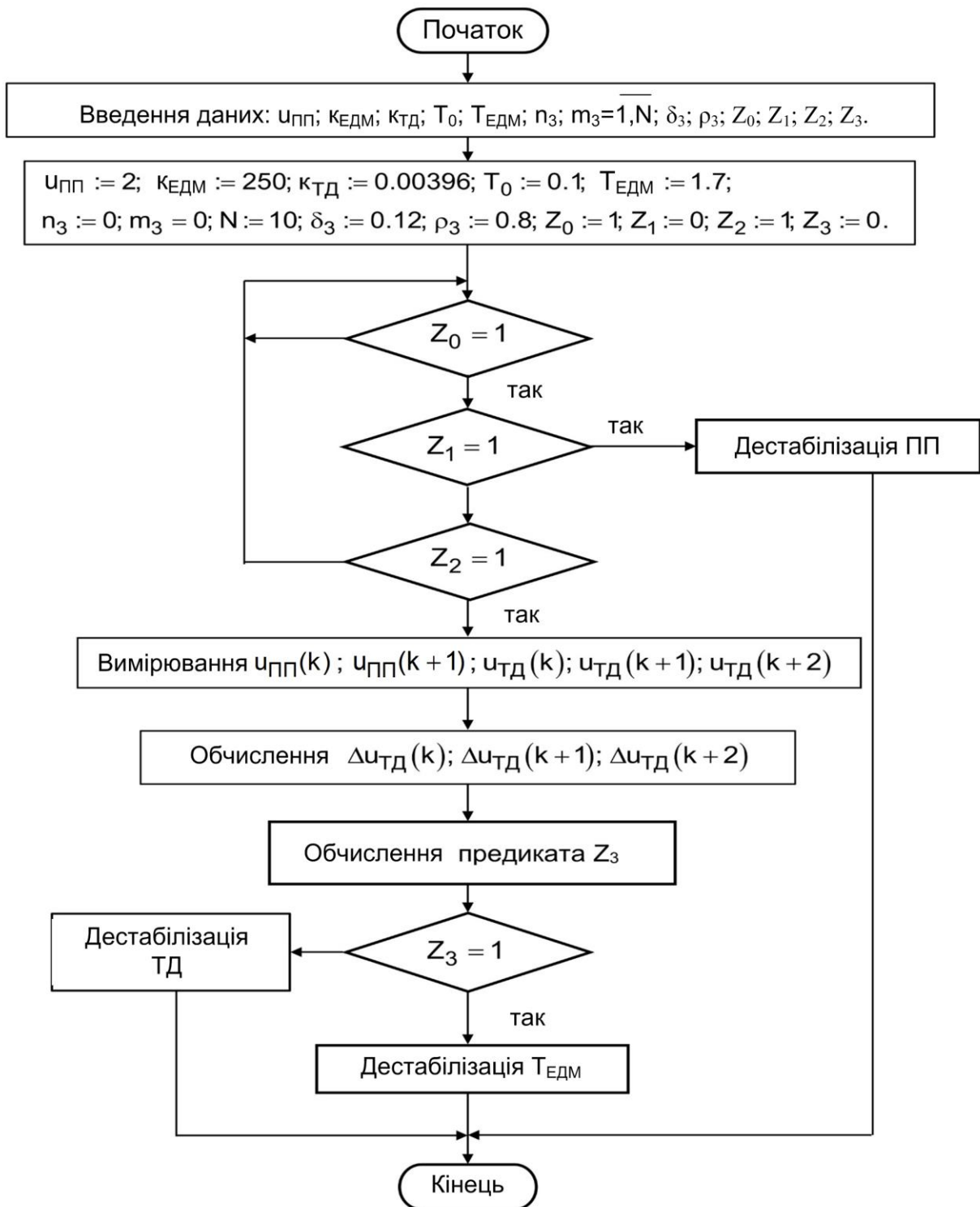


Рисунок 7.10 – Схема алгоритму формування значень предикату Z_3

На рисунку 7.11 представлені графіки характерних сигналів, що відображають особливості процесу пошуку дестабілізуючого впливу d_{32} – позитивного дрейфу нуля ТД. При ступінчастій дії з ПП в момент часу $t = 1\text{с}$ з амплітудою $u_{ПП} = 2\text{ В}$ (рис. 7.11, а) на момент часу $t = 2\text{ с}$ з'являється стрибок дрейфу нуля ТД $u_0 = 0,3\text{ В}$. На перехідному процесі

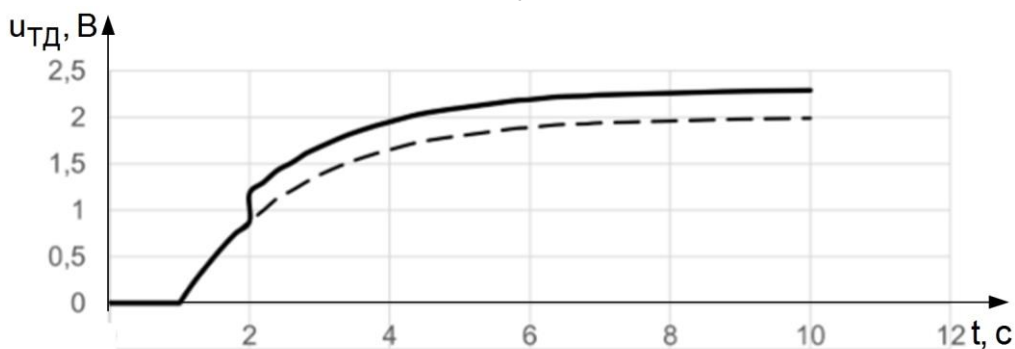
фрагмента ЕДМ + ТД це вплине на зміну у формі збільшення вихідного сигналу (рис. 7.11, в). Різницевий сигнал з моменту часу $t = 2$ с збільшиться до постійного значення $\Delta u_{ТД} = 0,3$ В (рис. 7.11, г).



а)



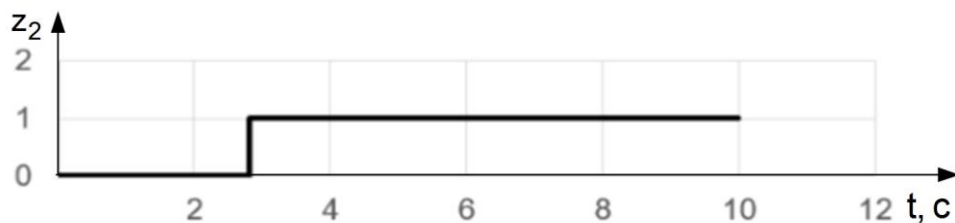
б)



в)



г)



д)

Рисунок 7.11 – Графіки перехідних процесів фрагмента ЕДМ + ТД при виді дестабілізації d_{32}



е)

Рисунок 7.11, аркуш 2

Далі відбувається обробка різницевого сигналу $\Delta u_{ТД}$ відповідно до двозначного предикатного рівняння (7.15). В результаті через $\Delta t = 1,8$ с після появи дестабілізуючого впливу d_{32} значення булевої ознаки Z_2 буде свідчити про появу дестабілізації у функціонуванні фрагмента ЕДМ + ТД. Пошук дестабілізованого функціонального елемента здійснюється за допомогою двозначного предикатного рівняння, аналогічного двозначного предикатного рівняння (4.51), а саме:

$$Z_4 = S_2 \left\{ \delta_4 - \left| \Delta u_{ТД}(k+1) - \Delta u_{ТД}(k) \right| \right\}, k = \overline{1, N}; \rho_4. \quad (7.17)$$

При параметрах: $\delta_4 = \Delta u_{ТД}$; $\rho_4 = 0,8$ в момент часу $t = 3,8$ с ознака Z_4 набуває одиничного значення, що свідчить про знаходження дестабілізуючого впливу d_{32} , що спричинило порушення працездатності фрагмента ЕДМ + ТД.

Аналогічним чином здійснюється пошук дестабілізованого функціонального елемента в розглянутому фрагменті ЕДМ + ТД для інших дестабілізуючих впливів з підмножин D_2 і D_3 . При дестабілізуючих d_{21} – зменшення коефіцієнта передачі ЕДМ та d_{31} – зменшення коефіцієнта передачі ТД не можна виявити дестабілізований функціональний елемент. Хоча в цьому немає необхідності, оскільки можливий засіб відновлення працездатності фрагмента ЕДМ + ТД єдиний – сигнальне підстроювання.

7.3. Ідентифікація дестабілізуючих впливів

Після пошуку дестабілізованого функціонального елемента ОРУ для отримання повного діагнозу необхідно визначити тип та вид дестабілізуючих впливів. Процес визначення типу та виду дестабілізуючих впливів є по суті процесом ідентифікації, в результаті якого встановлюється ім'я впливу з множини $D = D_1 \cup D_2 \cup D_3$.

Розглянемо інструментальні засоби ідентифікації для визначення типу та виду дестабілізуючих впливів у ПП.

Вплив d_{11} у макетному блоці ЕДМ імітується зменшенням коефіцієнта посилення. Тому тип і вид цього дестабілізуючого впливу збігаються, отже потрібно для повного діагнозу визначити його вид і чисельне значення. Для визначення виду використовується двозначне предикатне рівняння:

$$Z_{11} = S_2 \left\{ \delta_{11} - \left| \Delta u_{\text{ПП}}(k)u(k+1) - \Delta u_{\text{ПП}}(k+1)u(k) \right| \right\}, k = \overline{1, N}; \rho_{11}. \quad (7.18)$$

Оцінка чисельного значення коефіцієнта посилення виходить за допомогою середньоарифметичного алгоритму

$$\Delta \hat{k}_{\text{ПП}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta u_{\text{ПП}}(k)}{u(k)}. \quad (7.19)$$

На рисунку 7.12 наведено графіки, що відображають процес отримання діагнозу при дестабілізуючому впливі d_{11} .

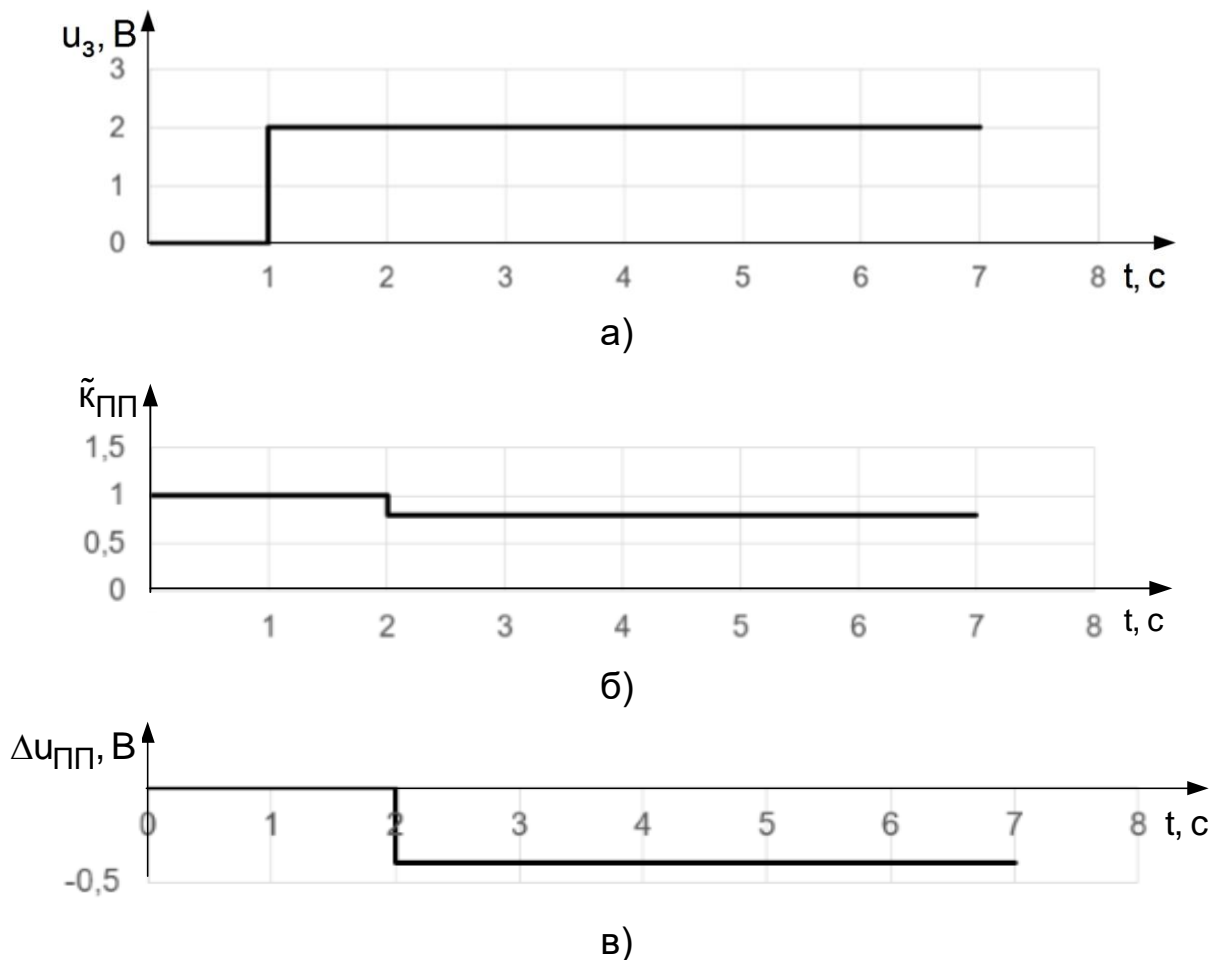


Рисунок 7.12 – Графіки перехідних процесів ПП при дестабілізації d_{11}

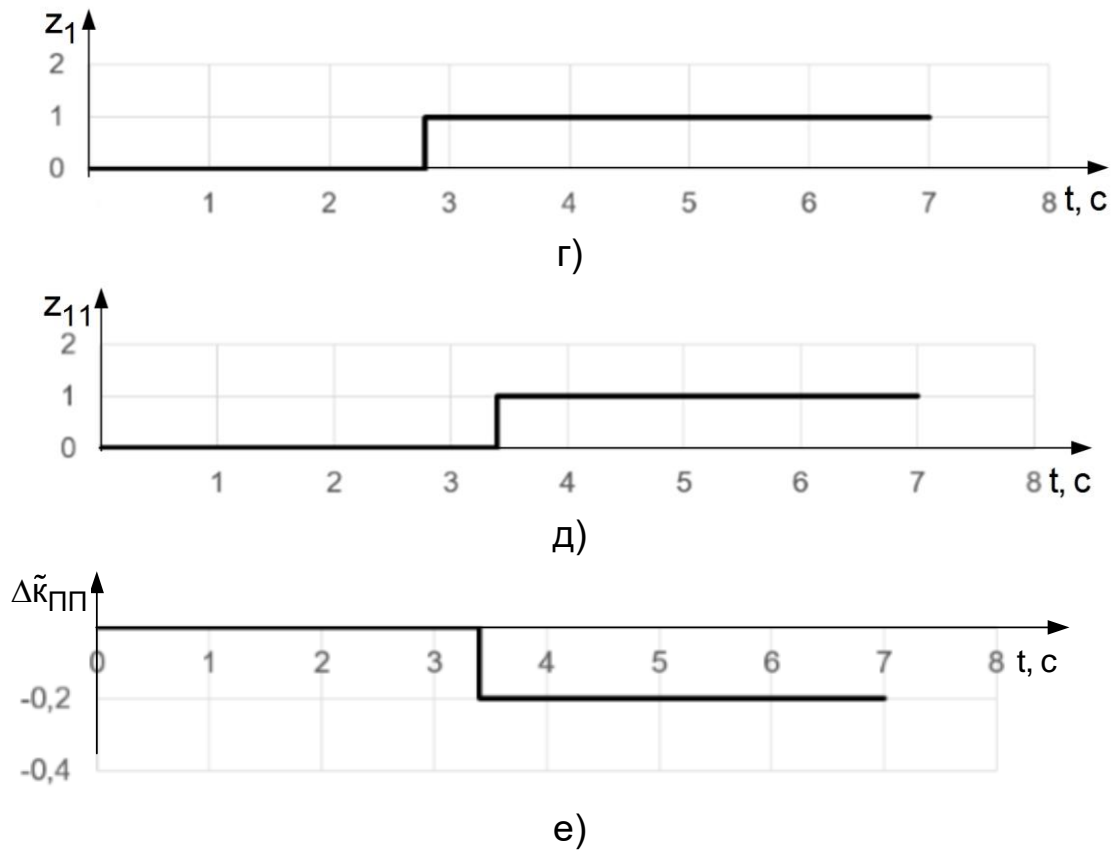


Рисунок 7.12, аркуш 2

При подачі на вхід ПП ступінчастого задавального впливу $u_3 = 2$ В в момент часу $t = 2$ с стрибкоподібно зменшується значення коефіцієнта посилення з 1 до 0,8. У цей момент часу з'являється різницевий сигнал $\Delta u_{\text{УМ}} = -0,4$ В. В момент часу $t = 2,8$ с виявляється дестабілізуючий вплив. Через період часу $\Delta t = 0,8$ с ознака Z_{11} свідчить, що дестабілізуюча дія пов'язана зі зменшенням коефіцієнта посилення. На момент часу $t = 3,4$ с отримано чисельну оцінку цього зменшення $\Delta \hat{k}_{\text{ПП}} = -0,5$. На діагностування дестабілізуючого впливу d_{11} знадобилося $\Delta t = 1,4$ с машинного часу.

В ПП імітуються два види дестабілізуючих впливів d_{12} – позитивний дрейф та d_{13} – негативний дрейф, які характеризуються параметром u_0 . Для визначення типу цих впливів використовується двозначне предикатне рівняння, аналогічне за структурою рівняння (4.30), а саме:

$$Z_{12} = S_2 \left\{ \delta_{12} - \left| \Delta u_{\text{ПП}}(k+1) - \Delta u_{\text{ПП}}(k) \right| \right\}, k = \overline{1, N}; \rho_{12}. \quad (7.20)$$

Для встановлення знаку дестабілізуючих дрейф впливів застосовується наступне двозначне предикатне рівняння:

$$Z_{121} = S_2 \{ \Delta u_{\text{ПП}}(k) \geq \delta_{121} \}, k = \overline{1, N}; \rho_{121}. \quad (7.21)$$

При $Z_{121} = 1$ – це означає, що дрейф нуля – позитивний, а при $Z_{121} = 0$ – дрейф нуля – негативний. Повний діагноз дестабілізуючих впливів означає отримання чисельної оцінки величини дрейфу. Тому для отримання чисельної оцінки величини дрейфу використовується алгоритм отримання середньоквадратичного значення

$$\hat{u}_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_{\text{ПП}}(k). \quad (7.22)$$

На рисунку 7.13 наведено графіки, що послідовно розкривають процес виявлення дестабілізуючого впливу d_{13} на працездатність ПП. У момент часу $t = 1$ с на вхід ПП подається ступінчастий задавальний вплив $u_3 = 2$ В.

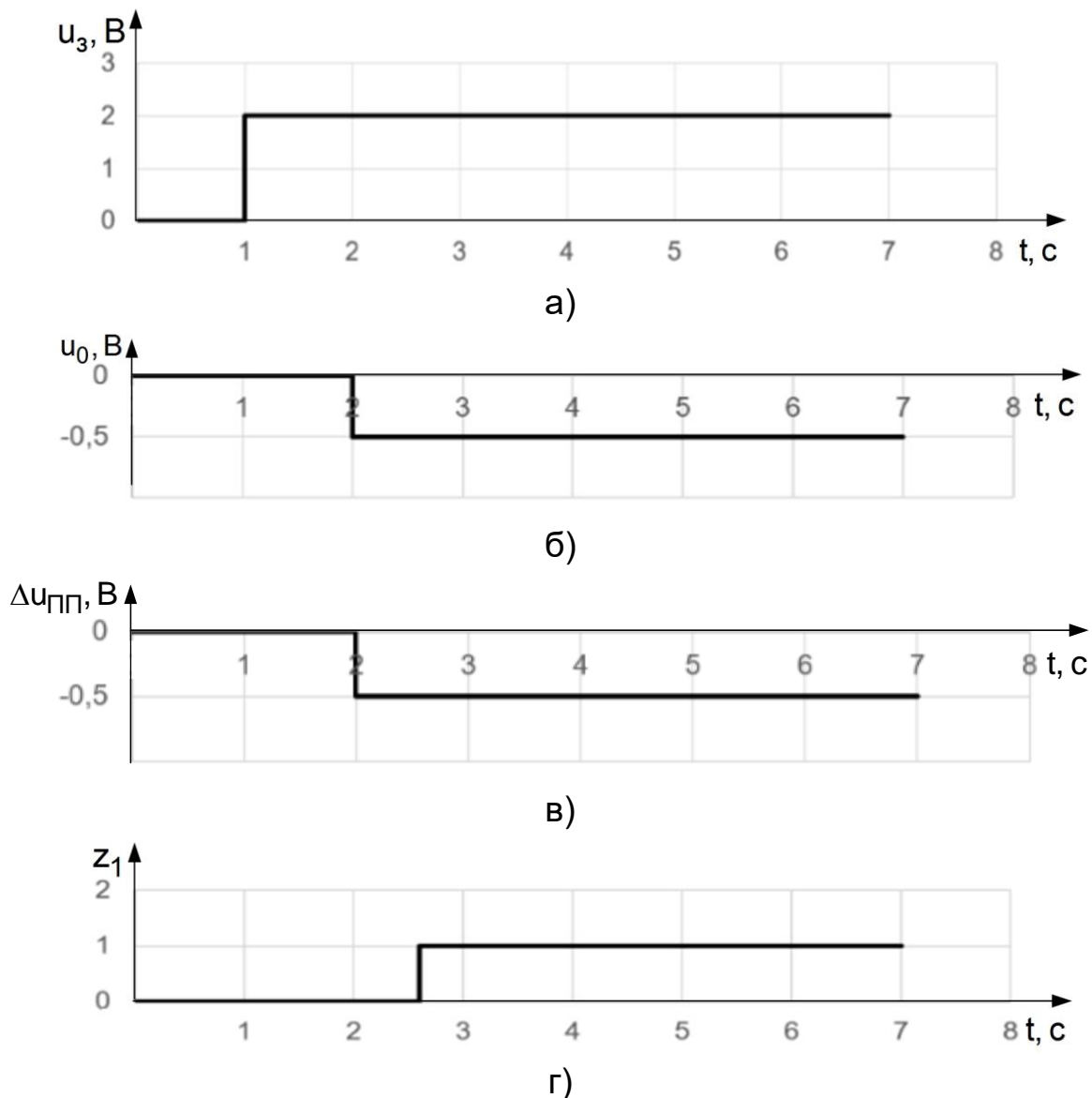
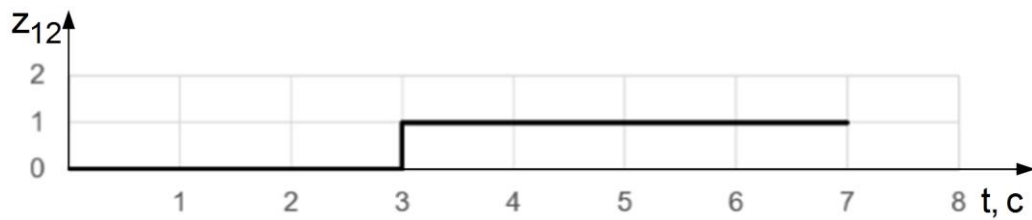


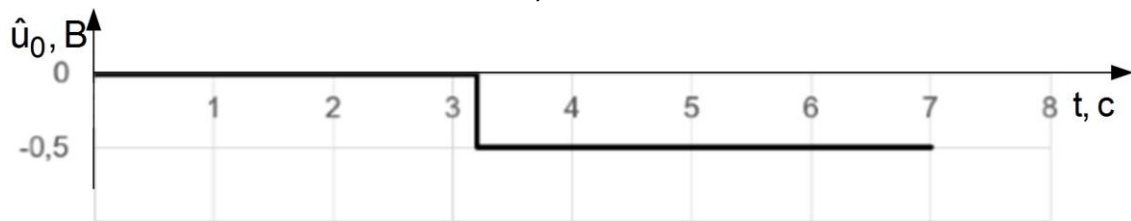
Рисунок 7.13 – Графіки перехідних процесів ПП при дестабілізації d_{13}



д)



е)



ж)

Рисунок 7.13, аркуш 2

У наступний момент часу $t = 2$ с імітується стрибкоподібна поява негативного дрейфу нуля $u_0 = 0,5$ В (рис. 7.13, б). У цей момент часу стрибкоподібно змінюється різницевий сигнал $\Delta u_{\text{УМ}} = -0,5$ В (рис. 7.13, в). За допомогою булевої ознаки Z_1 в момент часу $t = 2,6$ с виявляється у функціонуванні ПП порушення працездатності (рис. 7.13, г). Булева ознака Z_{12} на момент часу $t = 3$ с набуває одиничного значення, що свідчить про наявність дрейфу нуля (рис. 7.13, д). В момент часу $t = 3,2$ с значення булевої ознаки $Z_{121} = 0$, що означає наявність негативного дрейфу нуля (рис. 7.13, е). І до цього моменту часу $t = 3,2$ с вже сформовано чисельну оцінку цього дрейфу $\hat{u}_0 = -0,5$ В. Таким образом, Таким чином, з моменту появи дестабілізуючого впливу до отримання чисельного значення $\Delta t = 1,2$ с знадобилося діагностування дестабілізованого ПП.

Після встановлення непрацездатного функціонального елемента у послідовному з'єднанні ЕДМ + ТД проводиться ідентифікація виду дестабілізуючих впливів.

Дестабілізуючі впливи d_{21} – зменшення коефіцієнта передачі ЕДМ та d_{31} – зменшення коефіцієнта передачі ТД не можуть бути ідентифіковані окремо через структурну недіагностованість [26].

Однак забезпечувати структурну діагностованість з'єднання ЕДМ + ТД немає необхідності, тому що в макетному блоці ЕДМ є тільки один ресурс для парирування d_{21} та d_{31} – це сигнальне підстроювання. Тому розглянемо інструментальні засоби та графіки для визначення типу та виду дестабілізуючого впливу d_{21} . Для визначення типу та виду цього впливу використовується двозначне предикатне рівняння:

$$Z_{21} = S_2 \left\{ \delta_{21} - \left[\Delta u_{ТД}(k+2) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ЕДМ}} \right) \Delta u_{ТД}(k+1) \right] u_{ПП}(k) - \left[\Delta u_{ТД}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ЕДМ}} \right) \Delta u_{ТД}(k) \right] u_{ПП}(k+1) \right\}; k = \overline{1, N}; \rho_{21}. \quad (7.23)$$

Чисельна оцінка відхилення коефіцієнта передачі обчислюється за допомогою формули:

$$\Delta \hat{k}_{ЕДМ} = \frac{1}{m T_0 k_{ТД}} \sum_{k=1}^m \frac{T_{ЕДМ} \Delta u_{ТД}(k+1) - (T_{ЕДМ} - T_0) \Delta u_{ТД}(k)}{u_{ПП}(k)}. \quad (7.24)$$

На рисунку 7.14 представлені графіки процесів діагностування виду дестабілізуючого впливу d_{21} . Експеримент проводився при подачі ступінчастого впливу $u_{УМ} = 2 \text{ В}$ в момент часу $t = 1 \text{ с}$ (рис. 7.14, а). До цього часу імітувалося зменшення коефіцієнта передачі $\tilde{k}_{УМ} = 250 \frac{\text{рад}}{\text{Вс}}$ (графік 2). Графік 1 відображає номінальні значення коефіцієнта передачі (рис. 7.14, б). Перехідна характеристика 2 відображає реакцію непрацездатного ЕДМ порівняно з працездатною, графік 1 (рис. 7.14, в). Різницевий сигнал $\Delta u_{ТД}$ свідчить про помилку функціонування (рис. 7.14, г). Булева ознака Z_2 приймає в момент часу $t = 1,8 \text{ с}$ значення «1», що свідчить про непрацездатність фрагмента ЕДМ + ТД (рис. 7.14, д). В момент часу $t = 2,4 \text{ с}$, булева ознака $Z_{21} = 1$, що означає встановлення причини непрацездатності – $k_{УМ}$ (рис. 7.14, е).

Чисельна оцінка величини відхилення коефіцієнта передачі з'являється у момент часу $t = 2,4 \text{ с}$. Таким чином, для діагностування відхилення коефіцієнта передачі потрібно $\Delta t = 1,4 \text{ с}$ машинного часу.

При виді дестабілізації d_{31} – зменшення коефіцієнта передачі ТД використовується та сама процедура діагностування.

Розглянемо особливості процедури діагностування виду дестабілізації d_{22} – збільшення постійного часу. Цей вид дестабілізації пов'язаний із збільшенням інерційних властивостей ЕДМ.

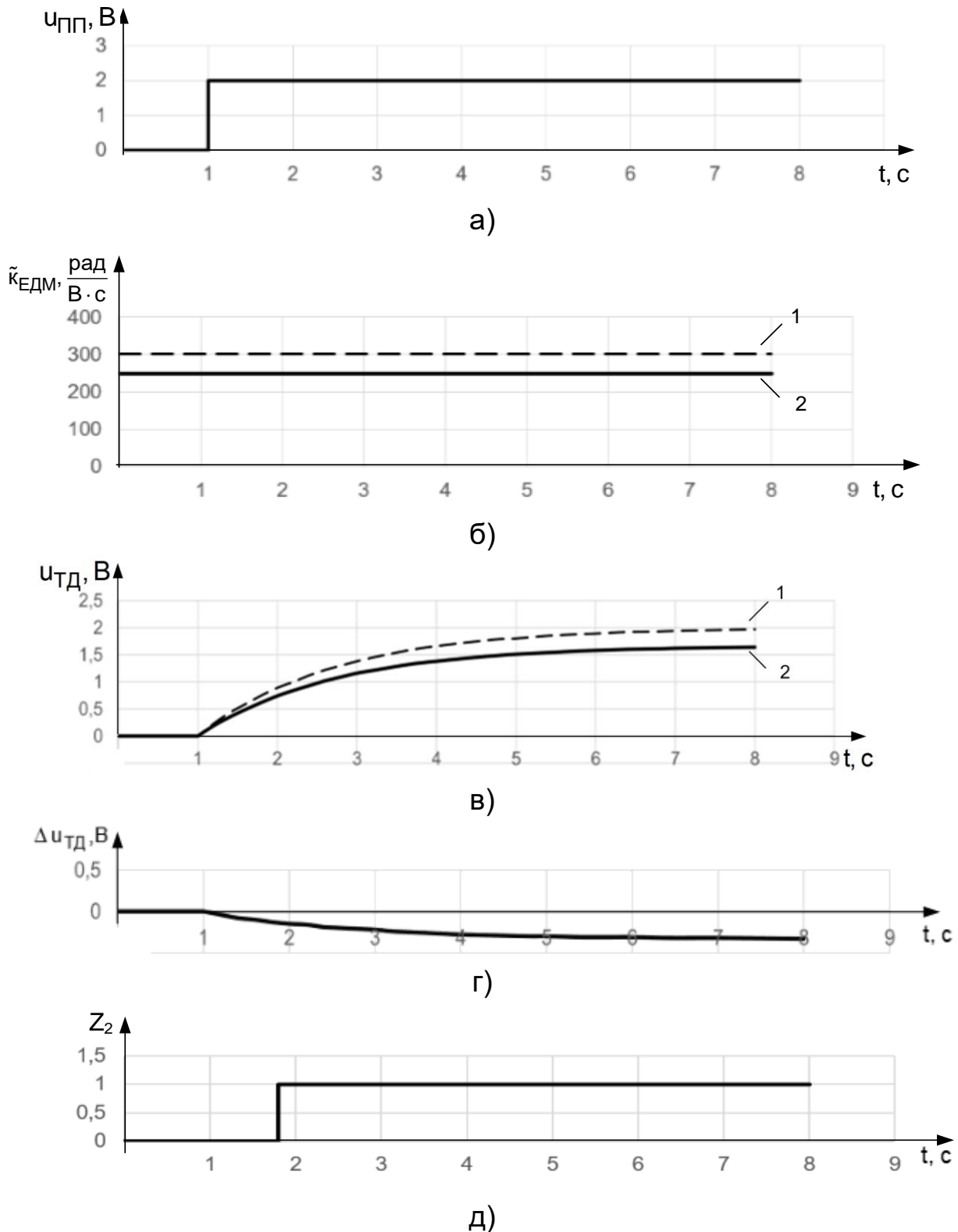
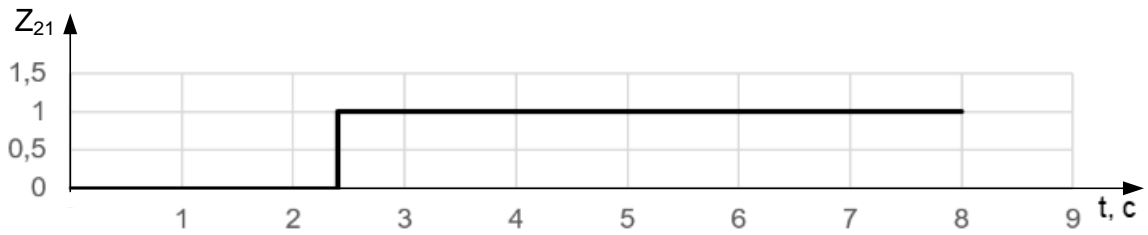
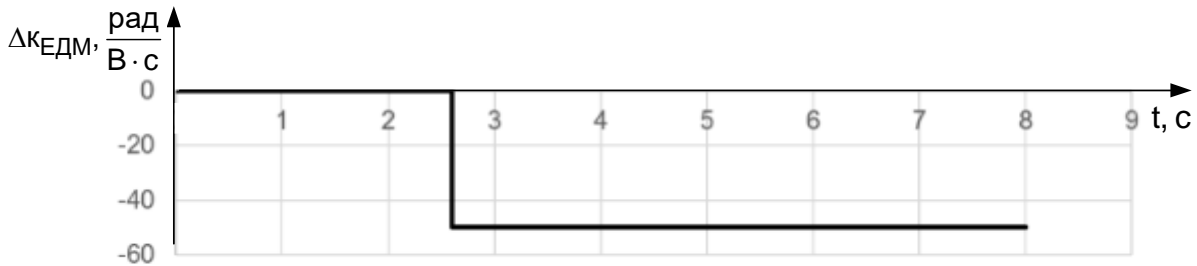


Рисунок 7.14 – Циклограма діагностування виду дестабілізації d_{21}



е)



ж)

Рисунок 7.14, аркуш 2

Ідентифікація цього виду дестабілізації починається з визначення типу за допомогою двозначного предикатного рівняння:

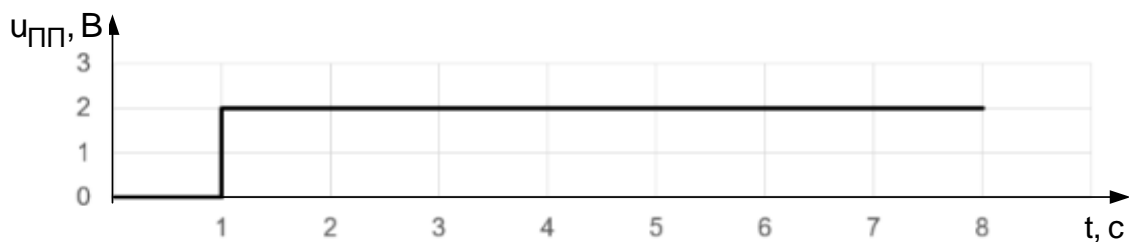
$$\begin{aligned}
 Z_{22} = S_2 \left\{ \delta_{22} - \left[\Delta u_{ТД}(k+2) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ЕДМ}} \right) \Delta u_{ТД}(k+1) \right] \times \right. \\
 \times \left[u_{ТД}(k) - k_{ЕДМ} k_{ТД} u_{ПП}(k) \right] - \left[\Delta u_{ТД}(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{T_{ЕДМ}} \right) \Delta u_{ТД}(k) \right] \times \\
 \left. \times \left[u_{ТД}(k+1) - k_{ЕДМ} k_{ТД} u_{ПП}(k+1) \right] \right\}; \quad k = \overline{1, N}; \quad \rho_{22}.
 \end{aligned} \quad (7.25)$$

Чисельна оцінка величини відхилення постійної часу обчислюється так:

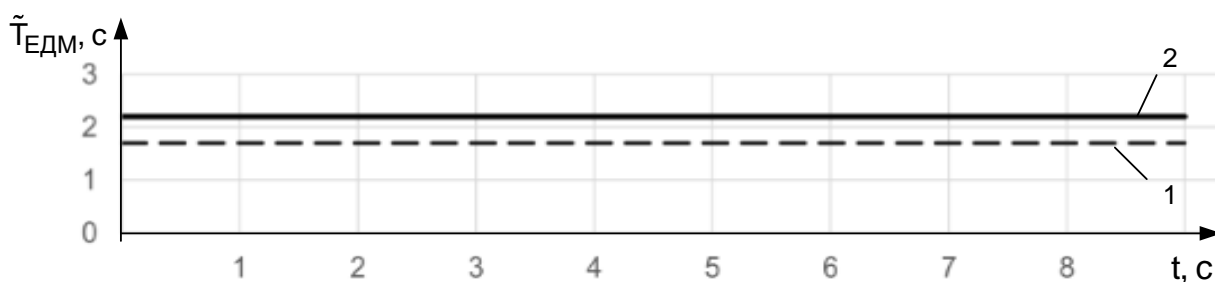
$$\Delta \hat{T}_{ЕДМ} = \frac{T_{ЕДМ}}{m T_0} \sum_{k=1}^m \frac{T_{ЕДМ} \Delta u_{ТД}(k+1) - (T_{ЕДМ} - T_0) \Delta u_{ТД}(k)}{u_{ТД}(k) - k_{ЕДМ} k_{ТД} u_{ПП}(k)}. \quad (7.26)$$

На рисунку 7.15 представлені сигнали, що відображають процес діагностування виду дестабілізації d_{31} . Експеримент проводився при тестовому впливі $u_{ПП} = 2$ В (рис. 7.15, а) і при збільшеній постійній часу $\tilde{T}_{ЕДМ} = 2,2$ с – графік 2. Графік 1 відображає номінальні значення (рис. 7.15, б). Затягнута – 2 проти номінальної – 1 перехідні характеристики зображені на рис. 7.15, в. Через різницевий сигнал $\Delta u_{ТД}$ (рис. 7.15, г) булева ознака Z_1 набуває значення «1» в момент часу $t = 1,6$ с.

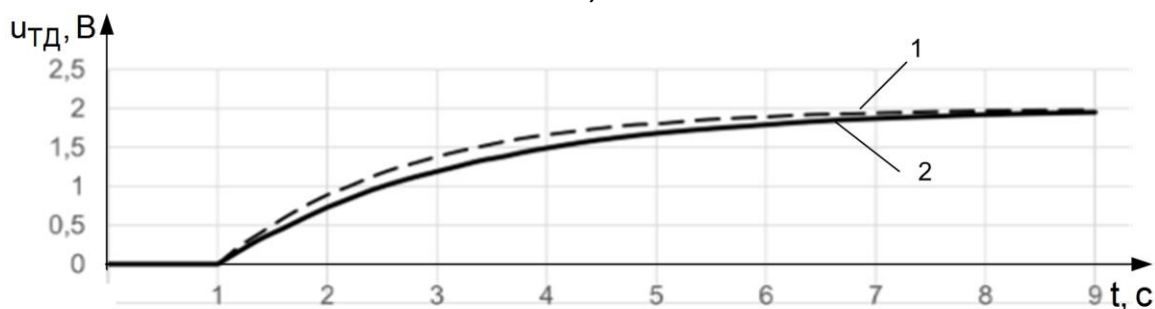
Значення булевої ознаки $Z_{22} = 1$ в момент $t = 2,2$ с свідчить про знайдену причину дестабілізації ЕДМ (рис. 7.15, е). На діагностування d_{22} було витрачено $\Delta t = 1,2$ с.



а)



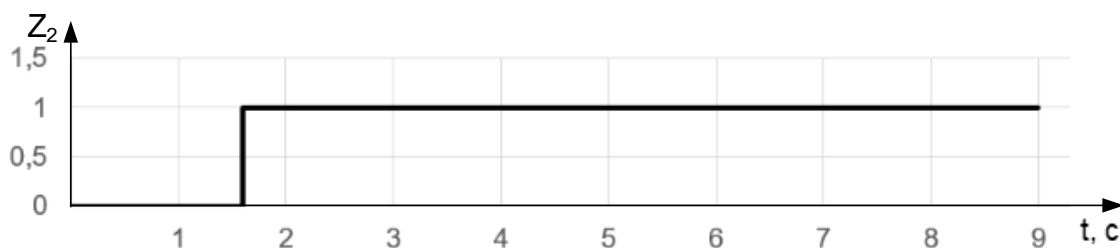
б)



в)

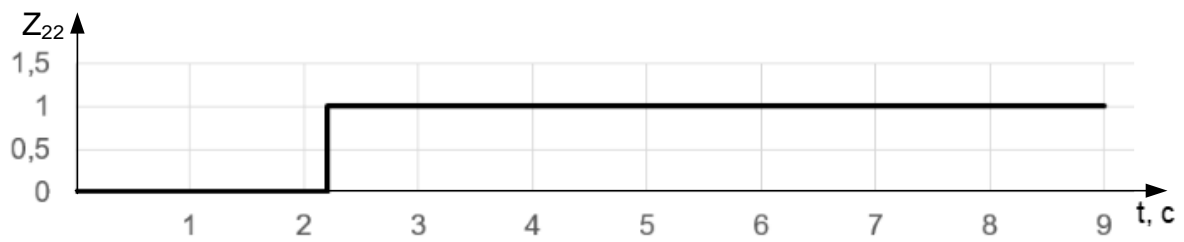


г)

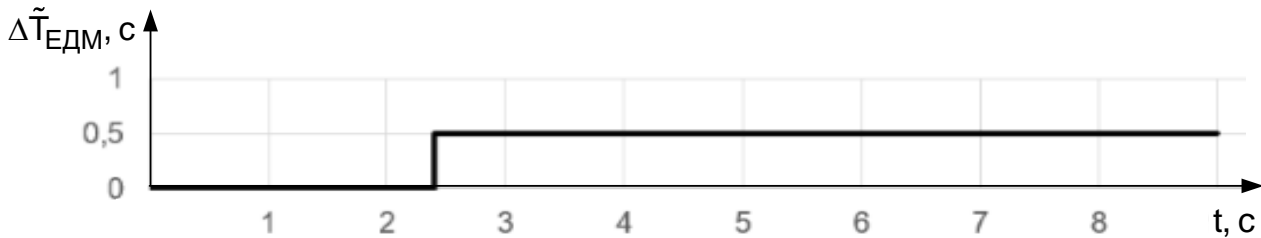


д)

Рисунок 7.15 – Циклограма діагностування виду дестабілізації d_{31}



е)



ж)

Рисунок 7.15, аркуш 2

Розглянемо як здійснюється ідентифікація виду дестабілізуючого впливу d_{32} для ТД. За допомогою двозначного предикатного рівняння (7.17) встановлюється, по-перше, що дестабілізуючий вплив d_{32} порушив працездатність ТД, по-друге, що з усіх дестабілізуючих впливів з множини D_3 це можуть бути впливи d_{32} та d_{33} , що призводять до дрейфу нуля. Таким чином, при $Z_4 = 1$ тип впливу визначений – це дрейф нуля. Для визначення конкретного виду потрібно виявити знак дрейфу нуля та чисельне значення його величини. Знак дрейфу нуля встановлюється за допомогою двозначного предикатного рівняння:

$$Z_{41} = S_2 \{ \Delta u_{ТД}(k) - \delta_{41} \}; k = \overline{1, N}; \rho_{41}. \quad (7.27)$$

Чисельне значення величини дрейфу нуля обчислюється як середньоарифметичне дискретних значень різницевого сигналу

$$\hat{u}_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \Delta u_{ТД}(k). \quad (7.28)$$

На рисунку 7.16 наведено графіки експериментальних досліджень алгоритму та програми діагностування дестабілізуючого впливу d_{32} – позитивного дрейфу нуля ТД. До подачі тестового впливу $u_{ПП} = 2$ В дрейф нуля вже був у ТД (рис. 7.16, б). Вихідний сигнал $\Delta \tilde{u}_{ТД}$ з моменту часу $t = 1$ с – постійний і позитивний. Значення булевої ознаки $Z_2 = 1$ свідчить про дестабілізацію з'єднання ЕДМ + ТД. В результаті знаходження дестабілізованого ТД булева ознака Z_4 приймає значення

«1». Потім за допомогою булевої ознаки визначається, що в ТД позитивний дрейф нуля (рис. 7.16, з) та чисельне значення його величини становить $\hat{u}_0 = 0,3 \text{ В}$. На діагностування цього виду дестабілізуючого впливу витрачено $\Delta t = 1,4 \text{ с}$ машинного часу і при цьому точність оцінки склала не більше 2 %.

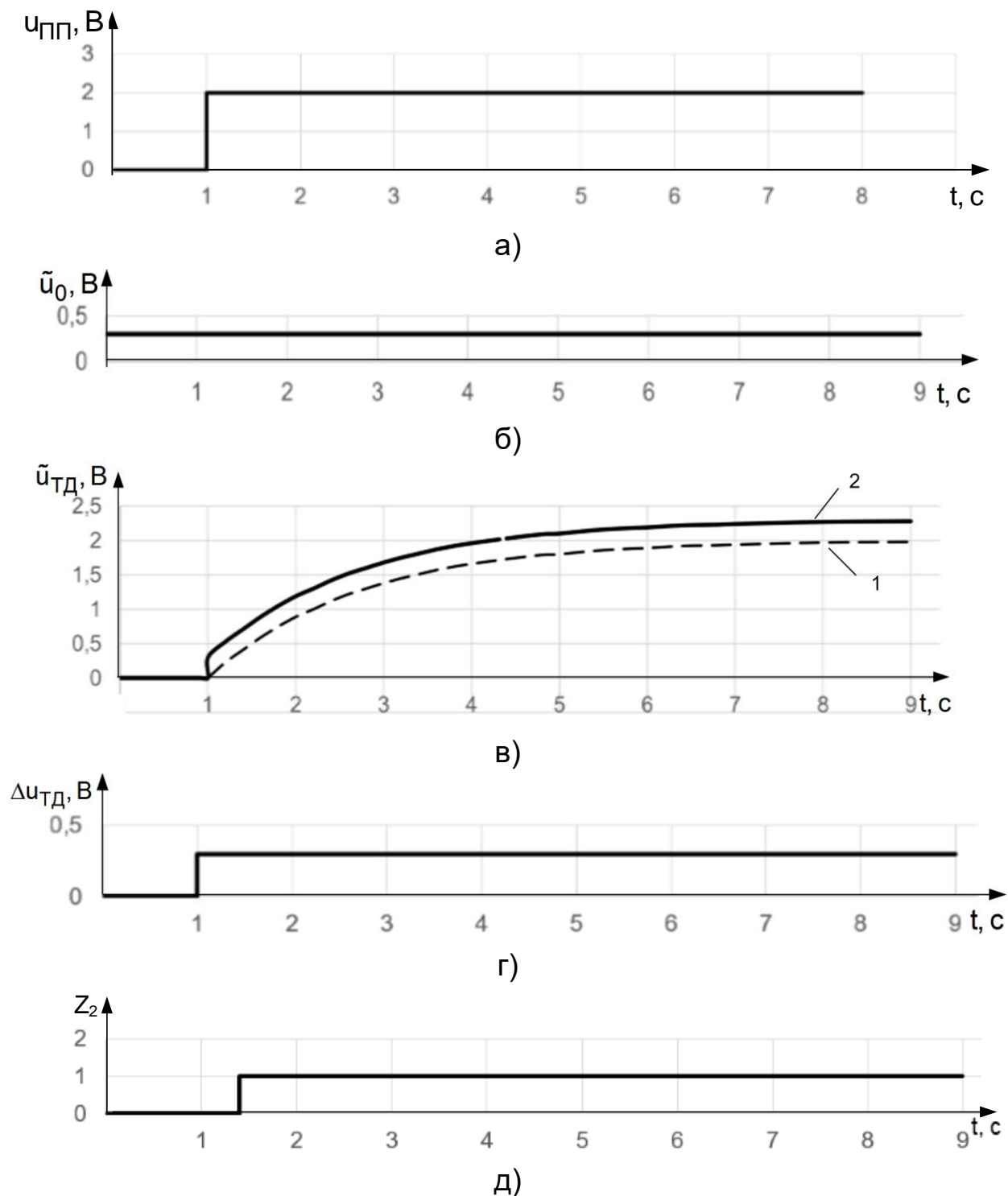
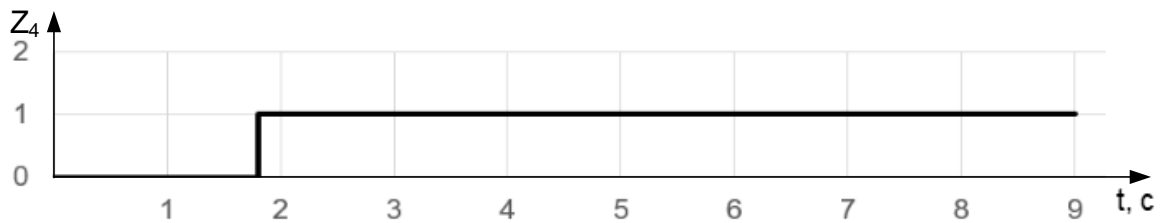
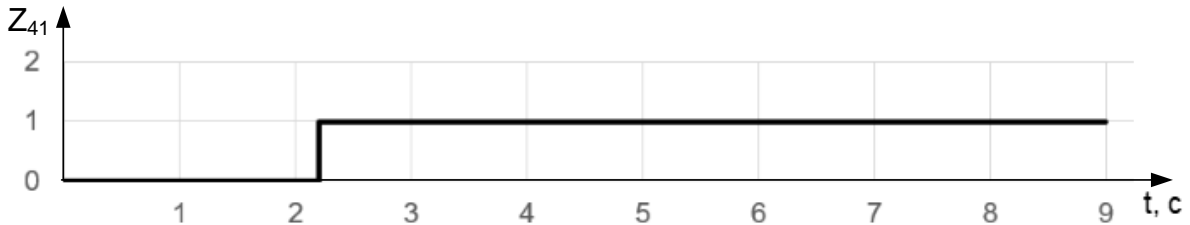


Рисунок 7.16 – Графіки процесів діагностування виду дестабілізації d_{32}



е)



ж)



з)

Рисунок 7.16, аркуш 2

Експериментальне дослідження алгоритмів та програм ідентифікації інших не представлених видів дестабілізуючих впливів дозволило встановити достовірну можливість визначення їх типу та виду за період $\Delta t = 1,5\text{с}$ із точністю оцінки величини 3%.

7.4. Відновлення працездатності макетного блока електродвигунів-маховиків

Дестабілізуючі впливи з множин D_1 , D_2 і D_3 призводять до порушення функціонування ОРУ, іншими словами, до порушення його працездатності. Для відновлення працездатності ОРУ необхідні засоби компенсації наслідків від дестабілізуючих впливів, алгоритми та програми їх використання. В експериментальній установці реалізований найпростіший варіант вибору засобів компенсації, коли кожному виду дестабілізуючого впливу відповідає свій засіб компенсації його наслідків, що забезпечує відновлення працездатності ОРУ. Розглянемо ці засоби докладніше.

Отже, в результаті діагностування ПП виявляються такі види дестабілізуючих впливів як d_{11} – зменшення коефіцієнта передачі; d_{12} – позитивний дрейф; d_{13} – негативний дрейф; d_{14} – обрив по входу.

При дестабілізуючому впливі d_{11} його негативний вплив компенсується за допомогою сигнального підстроювання. При цьому до задавального сигналу $u_3(k)$ підсумовується компенсуючий сигнал

$$u_k(k) = \Delta \hat{k}_{\text{ПП}} u_3(k), \quad (7.29)$$

тоді новий задавальний сигнал

$$u'_3(k) = (1 + \Delta \hat{k}_{\text{ПП}}) u_3(k) \quad (7.30)$$

забезпечуватиме працездатність ОРУ.

При позитивному дрейфі – d_{12} його компенсація виробляється сигналом впливу, що задає виду:

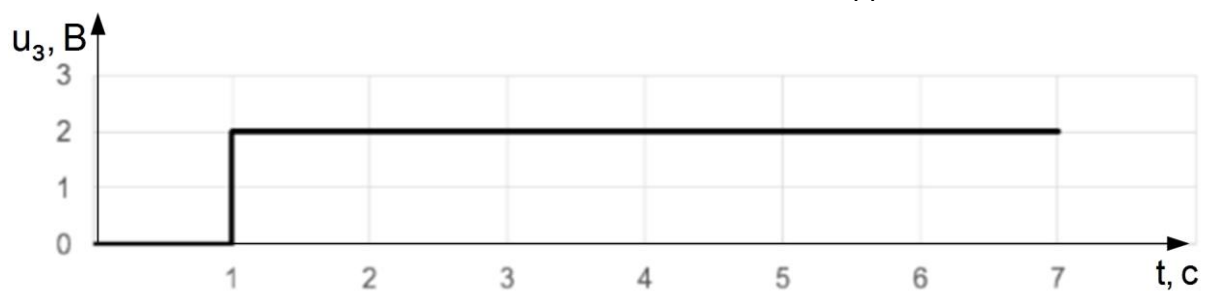
$$u'_3(k) = u_3(k) - \hat{u}_0. \quad (7.31)$$

При негативному дрейфі – d_{13} задавальний сигнал зміщується на величину оцінки – \hat{u}_0 , тобто

$$u'_3(k) = u_3(k) + \hat{u}_0. \quad (7.32)$$

При дестабілізуючому впливі d_{14} спостерігається повна відмова ПП і тому ОРУ виводиться з функціонування макетного блоку відключенням живлення та блокуванням його вхідних та вихідних сигналів.

На рисунку 7.17 наведено графіки процесів відновлення працездатності ОРУ при дестабілізуючому впливі d_{11} .



а)



б)

Рисунок 7.17 – Графіки перехідних процесів при виді дестабілізації d_{11}

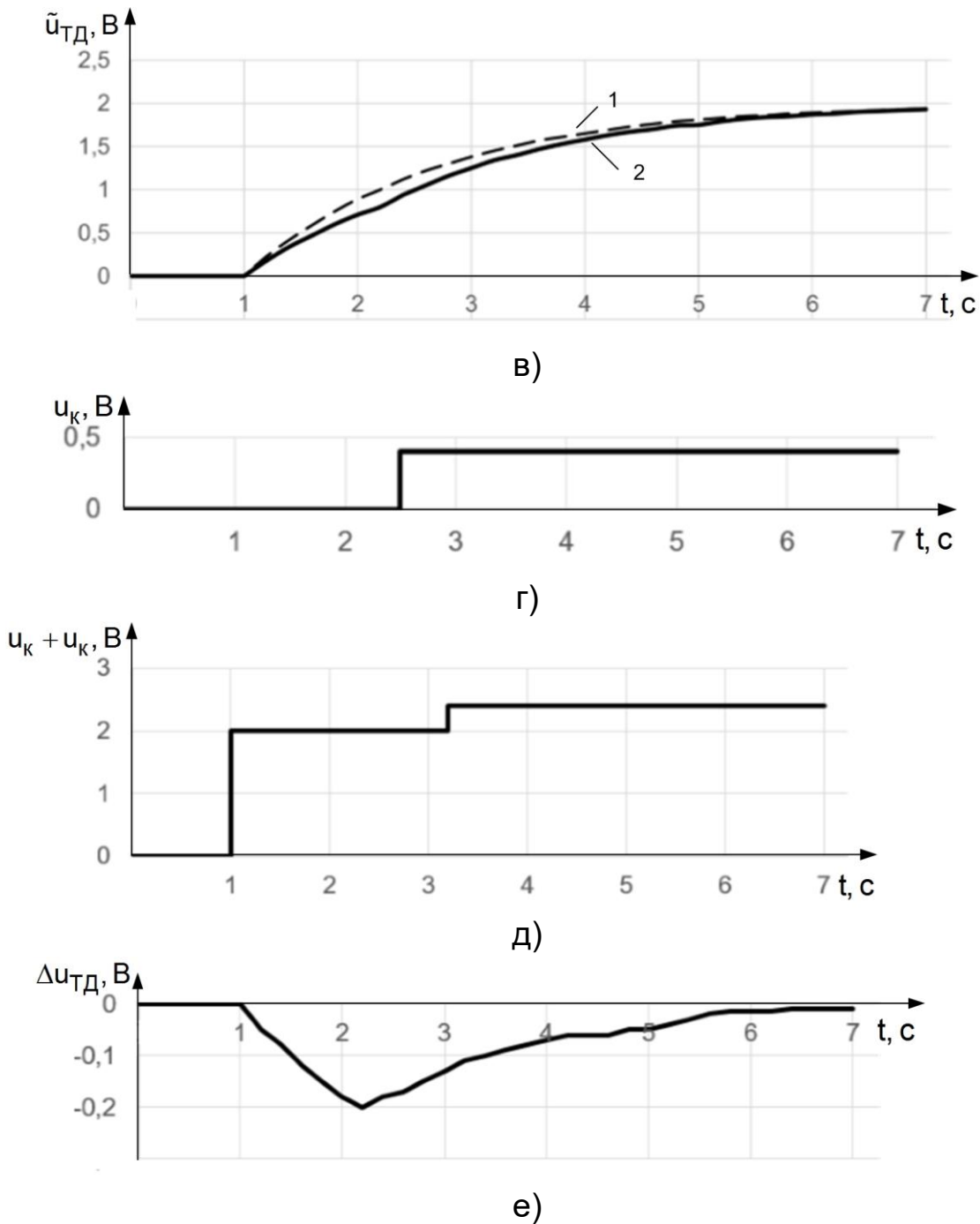


Рисунок 7.17, аркуш 2

На рисунку 7.17, а представлено задавальний вплив ступінчастого типу, що подається на ОРУ при $t=1\text{c}$. Дестабілізуючий вплив введено при $t=0$ величиною $\tilde{k}_{\text{ПП}} = 0,8$ (рис. 7.17, б). На рисунку 7.17, в наведено два графіки перехідних процесів: 1 – номінальний, 2 – збурений. До моменту часу $t=2,5\text{c}$ відбувається діагностування, а після - відновлення працездатності. Компенсувальний сигнал з'являється після діагностування (рис. 7.17, г) і сумарний сигнал задавального впливу представлений на рис. 7.17, д. Різницевий сигнал у найбільш явній

формі характеризує особливості діагностування та відновлення працездатності ОРУ (рис. 7.17, е). Отже, процес діагностування починається з $t = 1$ с обробкою $\Delta u_{ТД}$. Діагностування триває до моменту $t = 2,5$ с і при цьому якість функціонування ОРУ погіршується, оскільки різницевий сигнал відображає помилку функціонування щодо номінального режиму. Після моменту $t = 3$ с сформовано сигнал $u_k(k)$ (7.29) і сформовано новий задавальний вплив (рис. 7.17, д що призводить до зменшення і до моменту часу $t = 4,5$ с до повної компенсації різницевого сигналу - помилки функціонування. Отже, процес діагностування та відновлення працездатності ОРУ зайняв $\Delta t = 3,5$ с. Час перехідного процесу як у номінальному, так і в дестабілізованому режимах не змінився і становить $t_{ПП} = 4,5$ с (рис. 7.17, в, графік 1).

Розглянемо процеси компенсації наслідків від виду дестабілізуючого впливу d_{12} – положительный дрейф нуля. позитивний дрейф нуля. На рисунку 7.18 подано графіки, що характеризують процес діагностування та відновлення працездатності ОРУ.

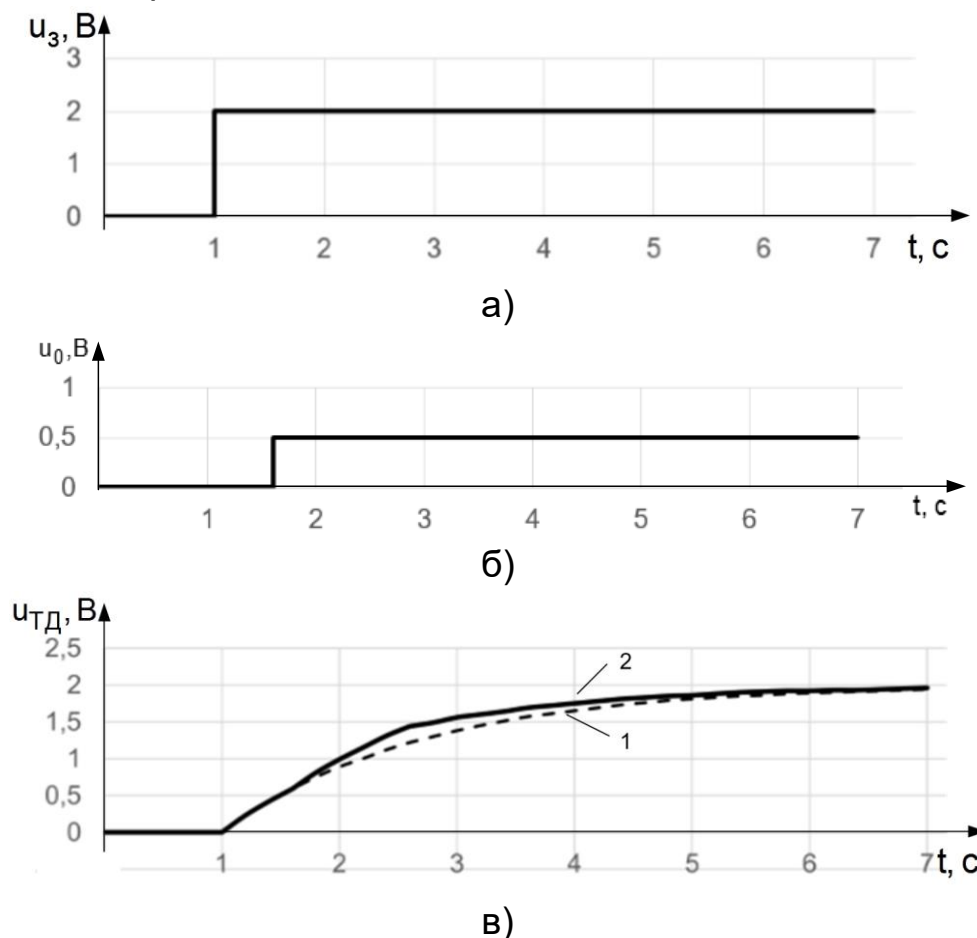
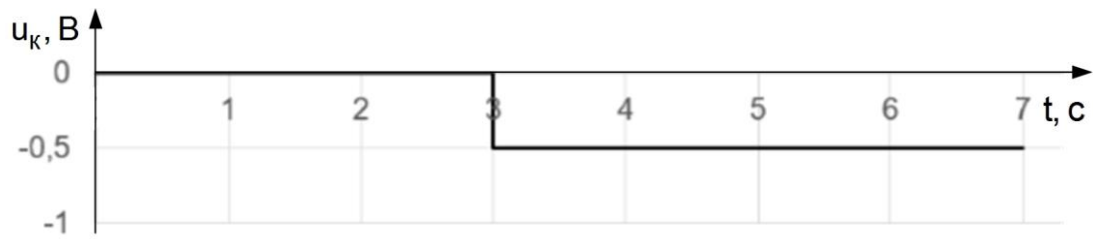
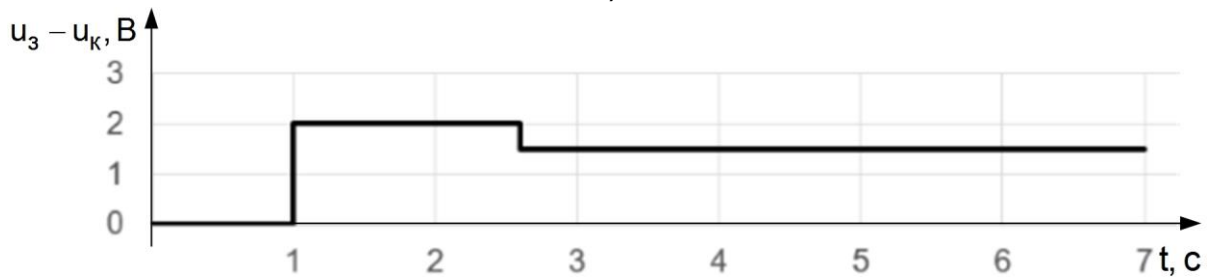


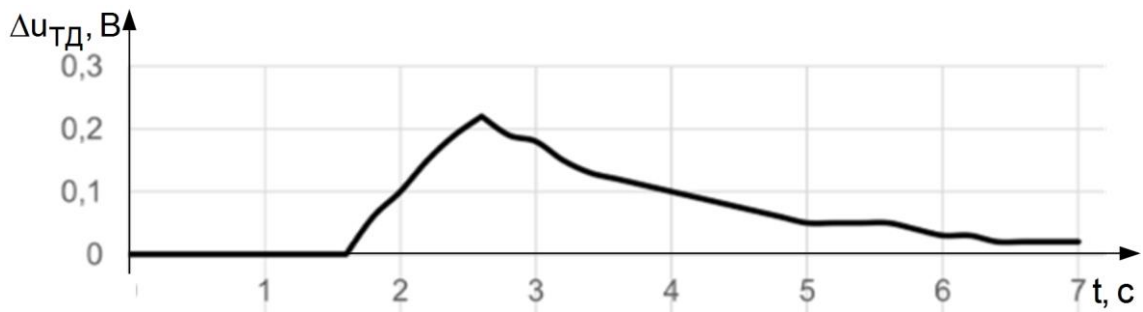
Рисунок 7.18 – Графіки перехідних процесів за виду дестабілізації d_{12}



г)



д)



е)

Рисунок 7.18, аркуш 2

Під час подавання ступінчастого задавального впливу $u_3 = 2\text{В}$ в ОРУ починається перехідний процес (рис. 7.18, в). У момент часу $t = 1,5\text{с}$ стрибкоподібно збільшується дрейф нуля $u_0 = 1\text{В}$ (рис. 7.18, б), що призводить до відхилення перехідного процесу ОРУ від номінального (пунктирна крива) (рис. 7.18, в). До моменту часу $t = 3\text{с}$ закінчується процес діагностування і сформовано чисельне значення напруги компенсації $u_k = -0,5\text{В}$ (рис. 7.18, г). З цього моменту часу задавальний вплив стрибкоподібно зменшується (рис. 7.18, д). У результаті процесів діагностування та відновлення добре ілюструє різницевий сигнал (рис. 7.18, е). На цьому графіку видно, що в період діагностування $\Delta t = 1,5\text{с}$ різницевий сигнал зростає. З моменту часу $t = 3\text{с}$ починається процес компенсації дрейфу нуля і різницевий сигнал асимптотично зменшується до моменту закінчення номінального перехідного процесу ОРУ. Весь

процес діагностування та відновлення не вийшов за межі часу перехідного процесу ОРУ.

Діагностування фрагмента ЕДМ + ТД дає змогу визначити такі види дестабілізуючих впливів: d_{21} – зменшення коефіцієнта передачі; d_{22} – збільшення постійної часу; d_{23} – обрив ланцюга управління; d_{31} – зменшення коефіцієнта передачі; d_{32} – позитивний дрейф; d_{33} – негативний дрейф; d_{34} – обрив виходу.

У разі зменшення коефіцієнта передачі ЕДМ відновлення його працездатності можливе за допомогою сигнального підстроювання, яке полягає в такому додатковому до основного сигналу управління, що відновлюється колишнє значення кутової швидкості $\omega(t)$, а отже і момент $m(t)$. Додатковий постійний сигнал обчислюється таким чином:

$$u_k(k) = \Delta \hat{k}_{\text{ЕДМ}} k_{\text{ТД}} u_3(k), \quad (7.33)$$

тоді скоригований задавальний сигнал

$$u'_3(k) = (1 + \Delta \hat{k}_{\text{ЕДМ}} k_{\text{ТД}}) u_3(k). \quad (7.34)$$

Такий новий задавальний сигнал забезпечує якісну компенсацію дестабілізуючого впливу d_{31} та відновлення працездатності ОРУ.

У разі дестабілізуючого впливу d_{32} – збільшення постійної часу для відновлення працездатності ОРУ використовується процедура фазового випередження задавального сигналу за допомогою такого алгоритму:

$$u'_3(k+2) = u'_3(k+1) - \left(1 - \frac{T_0}{a}\right) [u_3(k) - \tilde{u}_{\text{ТД}}(k)], \quad (7.35)$$

де a – коефіцієнт, що залежить від величини оцінки $\Delta T_{\text{ЕДМ}}$.

У разі обриву в ланцюзі управління – вид d_{23} канал повністю непрацездатний і тому використовується процедура виведення його з процесу функціонування вимиканням живлення всіх функціональних елементів ОРУ та блокуванням вхідних і вихідних сигналів.

При d_{31} – зменшенні коефіцієнта передачі ТД, а цей дестабілізуючий вплив не можна відрізнити від дестабілізуючого впливу d_{21} – зменшення коефіцієнта передачі ЕД, для відновлення працездатності використовується скоригований задавальний сигнал вигляду:

$$u'_3(k) = (1 + k_{\text{ЕДМ}} \Delta \hat{k}_{\text{ТД}}) u_3(k), \quad (7.36)$$

який забезпечує повне та якісне відновлення працездатності ОРУ.

За появи позитивного дрейфу d_{32} у функціюванні ТД вихідний сигнал $\tilde{u}_{ТД}(k)$ зміщується на величину оцінки дрейфу

$$\hat{u}_{ТД}(k) = \tilde{u}_{ТД}(k) - \hat{u}_0. \quad (7.37)$$

За появи негативного дрейфу в ТД вихідний сигнал відновлюється так:

$$\hat{u}_{ТД}(k) = \tilde{u}_{ТД} + \hat{u}_0. \quad (7.38)$$

Якщо дестабілізуючий вплив являє собою обрив виходу ТД – d_{34} , тоді можна скористатися оціночними значеннями еталонної моделі $\hat{u}_{ТД}(k)$.

Розглянемо, як відбувається відновлення працездатності ОРУ у разі появи виду дестабілізуючого впливу d_{22} – збільшення постійної часу ЕДМ. Графіки процесів, що відбуваються в системі раціонального управління, дають змогу відобразити це наочніше (рис. 7.19).

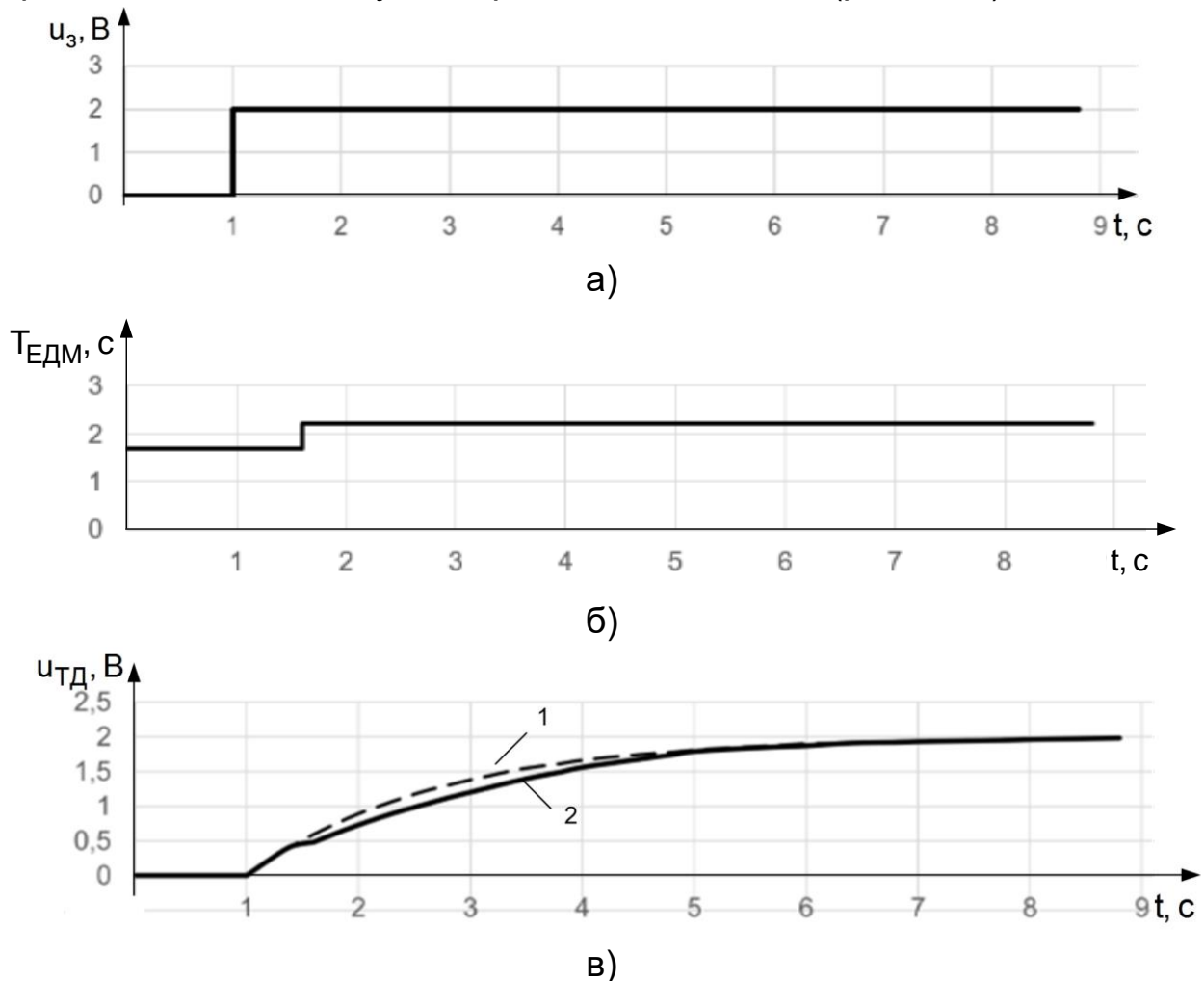


Рисунок 7.19 – Графіки перехідних процесів за виду дестабілізації d_{22}

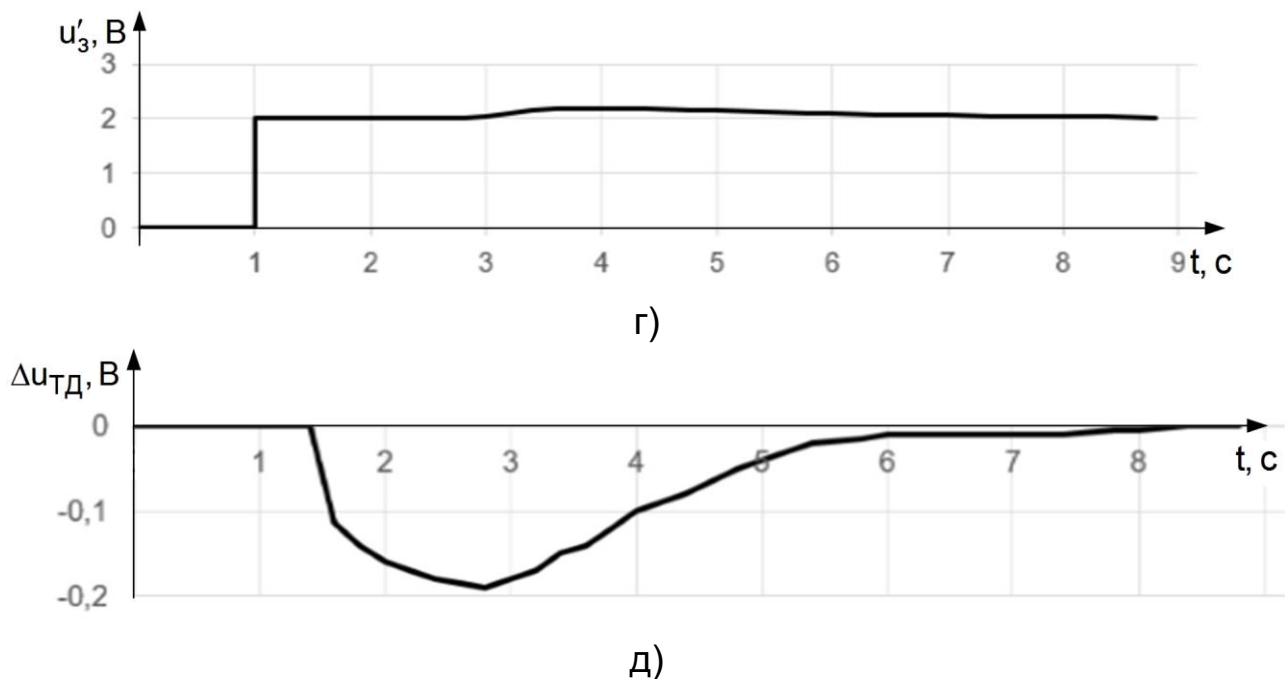


Рисунок 7.19, аркуш 2

Експеримент проводили під час подання ступінчастого впливу $u_3 = 2 \text{ В}$ в момент часу $t = 1 \text{ с}$. Імітація стрибкоподібного збільшення постійної часу ЕДМ проводиться в момент часу $t = 1,5 \text{ с}$ на величину $\Delta T_{\text{ЕДМ}} = 0,5 \text{ с}$ (рис. 7.19, б). Перехідний процес в ОРУ з $t = 1 \text{ с}$ до $t = 1,5 \text{ с}$ – номінальний (рис. 7.19, в). Після діагностування виду дестабілізації формується новий задавальний вплив u'_3 за допомогою алгоритму (7.35), що чинить форсувальну дію на ОРУ (рис. 7.19, г). У результаті чого відбувається відновлення працездатності ОРУ (рис. 7.19, в). Різницевий сигнал дає змогу одержати кількісні оцінки часу діагностування та відновлення працездатності $\Delta t = 1,5 + 2 \text{ с} = 3,5 \text{ с}$, а також максимальної помилки $\Delta u_{\text{ТД}} = 0,2 \text{ В}$ й точності відновлення працездатності, $\Delta u_{\text{ТД}}(\infty) = 0,1 \text{ В}$.

Отримані експериментальні дані свідчать про продуктивність процедур діагностування та відновлення працездатності ОРУ за такого виду дестабілізуючого впливу як збільшення інерційної властивості ОРУ.

За від'ємного дрейфу нуля ТД – це вид дестабілізуючого впливу d_{33} , відбувається зміщення сигналу ТД на величину дрейфу. Перехідні процеси, спричинені імітацією, діагностуванням і відновленням працездатності ОРУ представлені на рисунку 7.20.

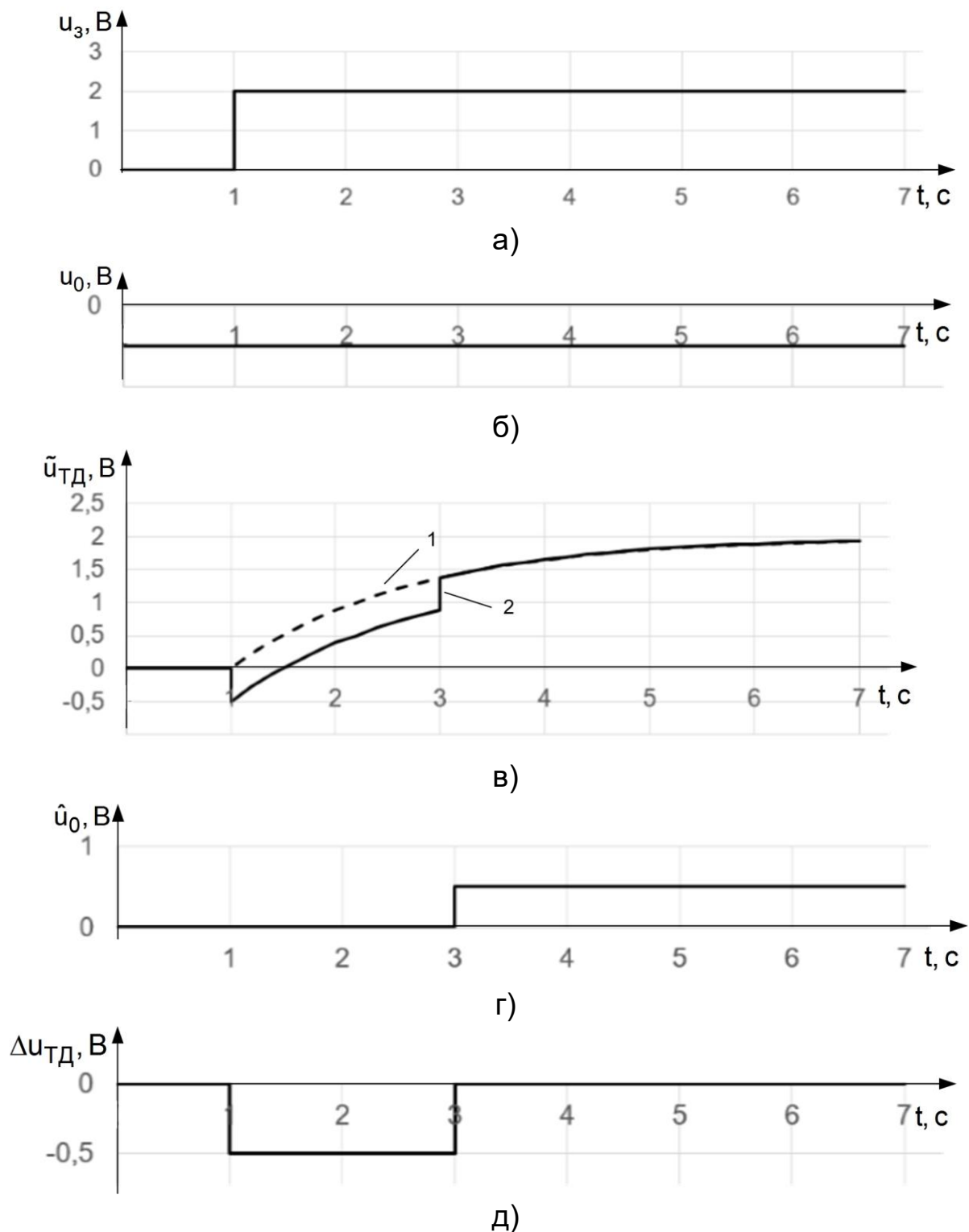


Рисунок 7.20 – Графіки перехідних процесів за виду дестабілізації d_{33}

Перед подачею задавального впливу в момент часу $t = 0$ вводиться негативний дрейф нуля $u_0 = -0,5 \text{ В}$ рис. 7.20, б. Реакція ОРУ на ступінчастий задавальний вплив зміщена відносно номінальної на величину дрейфу (рис. 7.20, в) до моменту часу $t = 3,5 \text{ с}$. У момент часу

$t = 3,5$ с після діагностування та відновлення з'являється оцінка дрейфу \hat{u}_0 (рис. 7.20, г), яке відповідно до алгоритму (7.38) забезпечує відновлення вихідного сигналу ТД до номінального. За різницеvim сигналом $\Delta u_{\text{ТД}}$ очевидна тривалість процесів діагностування та відновлення вимірювань ТД, а також точність відновлення та характер і тривалість помилки в разі позаштатної ситуації, пов'язаної з негативним дрейфом нуля ТД. Результати експериментів із появою у функціонуванні ТД позитивних дрейфів аналогічні розглянутому.

Повна відмова ТД породжує складну нештатну ситуацію для ОРУ, пов'язану з відсутністю інформації про стан ЕДМ. Для дослідження цієї ситуації в макетному блоці ЕДМ імітувався вид дестабілізації d_{34} – обрив виходу ТД. На рисунку 7.21 наведено характеристики, що відображають процеси діагностування та відновлення працездатності ВРП за відсутності сигналу з ТД.

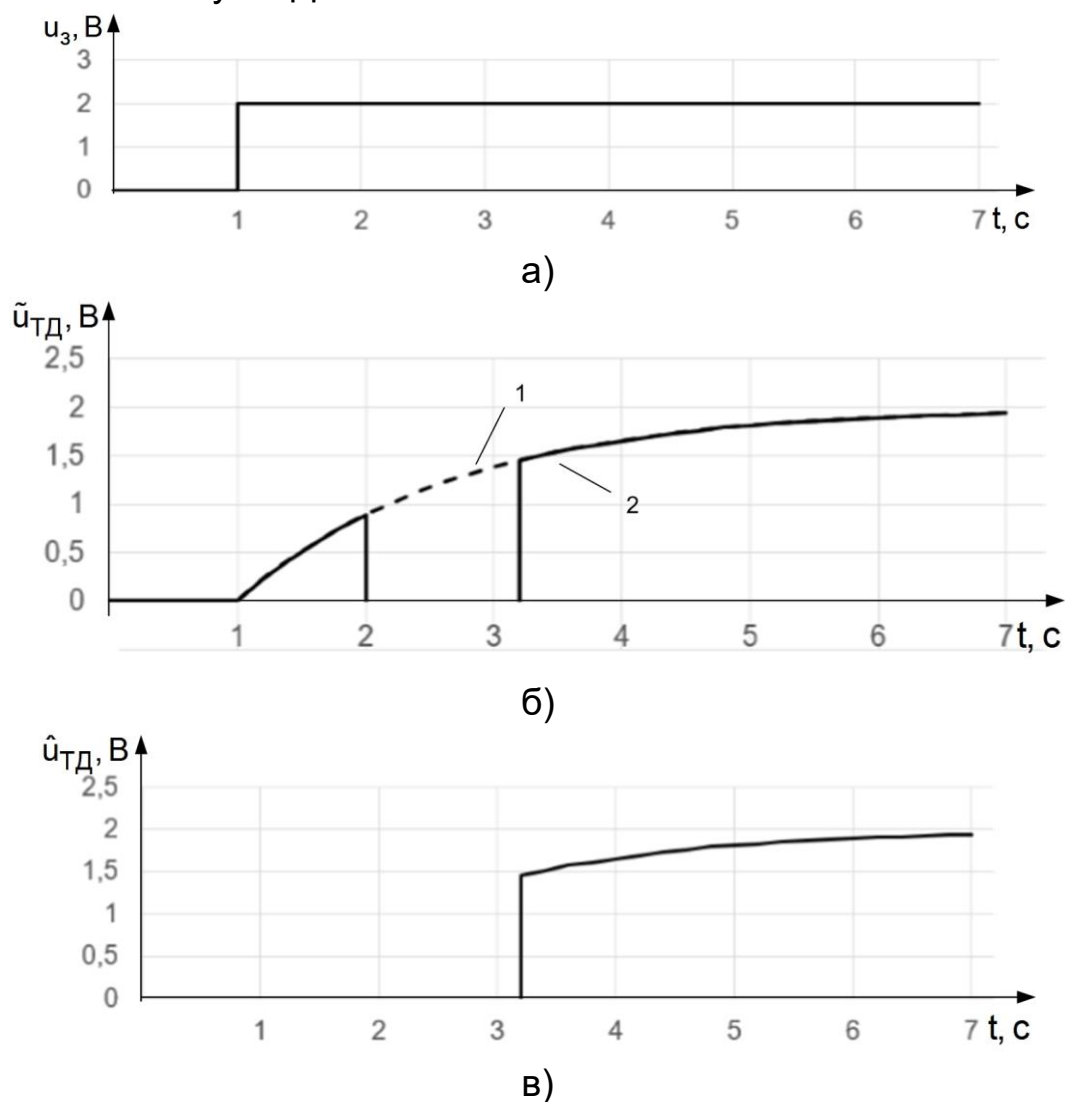
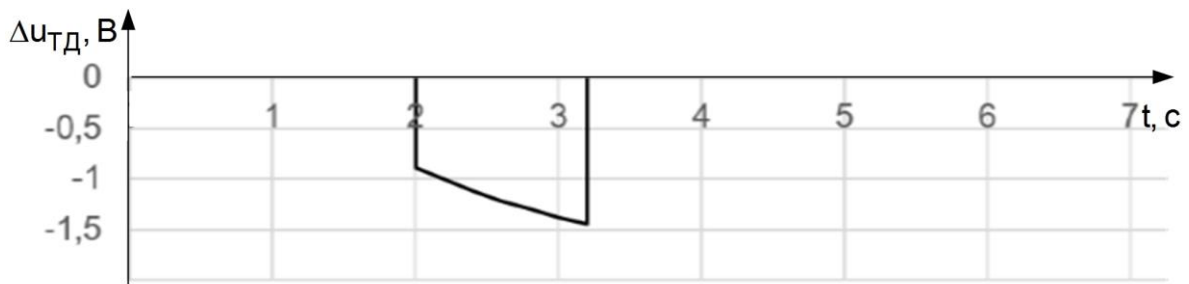


Рисунок 7.21 – Графіки перехідних процесів за виду дестабілізації d_{34}



г)

Рисунок 7.21, аркуш 2

При поданні ступінчастого задавального впливу $u_3 = 2$ В в момент часу $t=1$ с в ОРУ починається перехідний процес (рис. 7.21, б). Перехідний процес триває до $t=2$ с, оскільки в цей момент часу імітовано обрив виходу ТД. Сигнал із ТД зникає (рис. 7.21, б). Відсутність сигналу триває до моменту часу $t = 3,5$ с. За цей період часу проведено діагностування й ухвалено рішення про відновлення вимірювань ТД за допомогою еталонної моделі. У момент часу $t=3,5$ с здійснено підключення даних з еталонної моделі (рис. 7.21, в). Як видно на графіку (рис. 7.21, б) з моменту часу $t = 3,5$ с відбулося відновлення вимірювань ТД, а отже, і відновлення працездатності ОРУ. Різницевий сигнал $\Delta u_{ТД}$ (рис. 7.21, г) дає змогу отримати кількісні оцінки процесів діагностування та відновлення працездатності. Так, машинний час, витрачений на діагностування та відновлення, становить $\Delta t = 1,5$ с. Максимальна помилка функціонування ОРУ у позаштатній ситуації склала $\Delta u_{ТД\max} = 1,5$ В. Точність відновлення вимірювань склала $\Delta u_{ТД}(\infty) = 0,1$ В.

Експерименти з імітацією інших видів дестабілізації працездатності ОРУ дали змогу переконатися в принциповій можливості діагностувати в реальному масштабі часу та відновлювати працездатність у період перехідного процесу для діагностованих видів дестабілізації макетного блока ЕДМ.

ВИСНОВОК

*Недостатньо лише здобути знання:
треба знайти їм додаток.
Недостатньо лише бажати, треба
робити.*

*Йоганн Вольфганг Гете (1749 –
1832) – один із основоположників
німецької літератури, один із
найбільших дослідників природи
свого часу*

Використання електродвигунів-маховиків у системах орієнтації та стабілізації космічних апаратів різного призначення є трендовим напрямком у космонавтиці. Потреба тривалих космічних місіях породжує необхідність пошуку нових принципів управління, які б забезпечували функціонування систем орієнтації і при неминучих позаштатних ситуаціях ефективніше, ніж використовувані мажоритарні структури. Очевидно, що нові принципи мають базуватись на ідеях та інструментальних засобах адаптивного управління. Одним із нових принципів адаптивного управління є принцип управління за діагнозом. Реалізація цього принципу пов'язана з використанням ідей глибокого діагностування причин нештатних ситуацій та гнучкого управління надмірними ресурсами для їхнього парировання. Розробка моделей та методів діагностування та відновлення працездатності дозволили сформулювати новий клас адаптивних систем управління: раціональних систем управління.

У монографії представлено можливе застосування інструментальних засобів раціонального управління до систем електромеханічної орієнтації космічних апаратів.

Результати проведених досліджень підтвердили принципову можливість глибокого діагностування каналу управління електродвигуном-маховиком під час перехідного процесу та можливість гнучкого відновлення його працездатності до закінчення перехідного процесу при імітації низки дестабілізуючих впливів.

Отримані результати відкривають можливість перейти до вирішення нових завдань щодо формування комплексної модульної структури програмного забезпечення з діагностування та відновлення працездатності всього блоку ЕДМ.

Пірамідальна структура макетного блоку ЕДМ є надмірною структурою і тому актуальним є вирішення завдання використання інших каналів управління при повній відмові одного з них.

Видається також необхідним розширити можливості процедур діагностування за допомогою використання сигналів з датчиків кутових положень космічного апарату. Таке використання дозволить розширити безліч діагностованих дестабілізуючих впливів та підвищити оперативність отримання повного діагнозу.

Вирішення цих та інших завдань, які неминуче виникнуть в результаті подальших науково-дослідних та експериментальних робіт, дозволить розробляти ефективніші електромеханічні виконавчі органи на базі ЕДМ для систем орієнтації сучасних та перспективних КА тривалих космічних місій.

Бібліографічний список

1. Раушенбах, Б. В. Управление ориентацией космических аппаратов [Текст] / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – М. : Наука, 1974. – 600 с.
2. Алексеев, К. Б. Управление космическим аппаратом [Текст] / К. Б. Алексеев, Г. Г. Бебекин. Под. ред. В. А. Боднера. – М. : Машиностроение, 1964. – 402 с.
3. Васильев, В. Н. Системы ориентации космических аппаратов [Текст] / В. Н. Васильев. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
4. Каргу, Л. И. Системы угловой стабилизации космических аппаратов [Текст] / Л. И. Каргу – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
5. Боднер, В. А. Системы управления летательными аппаратами [Текст] / В. А. Боднер. – М. : Машиностроение, 1973. – 506 с.
6. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст]: учебник / Ю. С. Алексеев, Е. В. Белоус, Г. В. Беляев и др. / Под общ. ред. Ю. С. Алексеева, Ю. М. Златкина, В. С. Кривцова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», НПП Хартрон-Аркас, 2012. – 680 с.
7. Бортовые системы управления космическими аппаратами [Текст] / А. Г. Бронкин, Б. Г. Бурдыгов, С. В. Гордийко и др. Под ред. А. С. Сырова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.
8. Иосифьян А. Г. Электромеханика в космосе [Текст] / А. Г. Иосифьян. – Серия Знание, № 3, 1977. – 63 с.
9. Reaction wheels on the global market [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.satsearch.co/2019-07-25-reaction-wheels-an-overview-of-attitude-control-systems-available-on-the-global-marketplace-for-space>. – 15.02.2023 р.
10. Математический энциклопедический словарь [Текст] / Под ред. Ю. В. Прохорова. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2003. – 845 с.
11. Смирнова, И. М. Правильные, полуправильные и звездчатые многогранники [Электронный ресурс] / И. М. Смирнова, В. А. Смирнова. – Режим доступа: http://emtom.ru/books/reg_pol.pdf. – 15.02.2023 р.
12. Саган, К. Космос. Эволюция Вселенной, жизни и цивилизации [Текст] / К. Саган. – СПб. : Амфора, 2008. – 370 с.

13. Кухлинг, Х. Справочник по физике [Текст] / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1982. – 520 с.
14. Rinard, L. A. Reaction Wheel Supplier Survey [Электронный ресурс] / L. A. Rinard, E. L. Chapman, S. C. Ringler. – Режим доступа: [https://discovery.larc.nasa.gov/PDF_FILES/ATR-2011\(5389\)-2_ReactionWheelSurvey.pdf](https://discovery.larc.nasa.gov/PDF_FILES/ATR-2011(5389)-2_ReactionWheelSurvey.pdf). – 15.02.2023 р.
15. Купон КА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aboutspacejournal.net/2017/11/12/12>. – 15.02.2023 р.
16. Ткачев, С. С. Исследование управляемого углового движения аппаратов с ротирующими элементами [Электронный ресурс] / С. С. Ткачев. – Режим доступа: <https://keldysh.ru/council/1/tkachev-diss.pdf>. – 15.02.2023 р.
17. Спутник дистанционного зондирования Земли EgyptSat 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ecoruspace.me/EgyptSat+1.html>. – 15.02.2023 р.
18. MS-2-8 satellite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yuzhmash.com/en/products/spacescraft/ms-2-8-satellite/>. 15.02.2023 р.
19. Меланченко, А. Г. Отказоустойчивое управление космическим аппаратом наблюдения Земли с избыточной конфигурацией двигателей-маховиков [Текст] / А. Г. Меланченко // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 28–37.
20. Монитор-Э [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://innoter.com/sputniki/monitor-e/>. – 15.02.2023 р.
21. Токарь, Е. Н. О рациональном построении систем гиросиловых стабилизаторов [Текст] / Е. Н. Токарь // Космические исследования. – 1978. – Т. 16, вып. 1. – С. 22–30.
22. Кулик, А. С. Элементы теории рационального управления объектами [Текст] / А. С. Кулик – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 255 с.
23. Пат. 116162 Україна, МПК G05D 1/10, G05B 13/02. Система автоматичного раціонального керування [Текст] / А. С. Кулік, І. А. Кулік; заявник і власник пат. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». – № 116162; заявл. 04.04.16; опубл. 12.02.18, Бюл. № 3.
24. Кулик, А. С. Рациональное управление работоспособностью автономных летательных аппаратов. Ч. 1 [Текст] / А. С. Кулик // Проблемы управления и информатики. – 2017. – № 3. – С. 25–38.

25. Кулик, А. С. Методы моделирования объектов автоматического управления [Текст]: учеб. пособие / А. С. Кулик, С. Н. Пасичник. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2018. – 168 с.
26. Симонов, В. Ф. Метод пространства состояний в теории непрерывных линейных систем [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Симонов. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1983. – 122 с.
27. Дорф, Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Б. Бишоп. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
28. Кулик, А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] : монография / А. С. Кулик // Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» : Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
29. Сироджа, И. Б. Математическое и программное обеспечение интеллектуальных компьютерных систем [Текст] : учеб. пособие / И. Б. Сироджа. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 101 с.
30. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход [Текст] / С. Рассел, П. Норвиг, 2-е изд. – М. : Издательский центр «Вильямс», 2007. – 1410 с.
31. Рвачёв, В. Л. Теория R-функций и некоторые её приложения [Текст] : монография / В. Л. Рвачёв. – К. : Наук. думка. 1082. – 552 с.
32. Кормент, Т. Алгоритмы: построение и анализ [Текст] / Т. Кормент, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М. : МЦНМО, 2000. – 960 с.
33. Рациональное управление объектами: теория и приложения [Текст] : монография / Е. В. Гавриленко [и др.]. Под общ. ред. А. С. Кулика. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2018. – 308 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
Розділ I. СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ	9
1.1. Загальні відомості про системи орієнтації космічних апаратів.....	9
1.2. Класифікація систем орієнтації.....	14
1.3 Приклади систем управління космічних апаратів.....	16
1.4 Електродвигуни-маховики.....	24
Розділ II. СХЕМИ ВСТАНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ	29
2.1. Основні положення про різноманітність можливих схем встановлення.....	29
2.2. Схема кубічної установки.....	35
2.3. Схеми пірамідальної установки.....	43
2.4. Перспективні схеми установки.....	48
Розділ III. ЕЛЕКТРОДВИГУН-МАХОВИК ЯК ОБ'ЄКТ РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ	59
3.1. Основні положення раціонального управління.....	59
3.2. Формування функціональної схеми раціонального управління електродвигуном-маховиком.....	65
3.3. Моделі номінального функціонування електродвигуна-маховика як об'єкта автоматичного управління.....	71
3.4. Моделі нештатного функціонування об'єкта автоматичного управління.....	78
Розділ IV. ДІАГНОСТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТА РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ	86
4.1. Виявлення дестабілізації.....	86
4.2. Пошук дестабілізуючих функціональних елементів.....	91
4.3. Визначення типів дестабілізуючих впливів.....	98
4.4. Визначення видів дестабілізації.....	106
Розділ V. РЕАБІЛІТАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТА РАЦІОНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ	114
5.1. Відновлення працездатності підсилювача потужності.....	114
5.2. Відновлення працездатності електродвигуна-маховика.....	119
5.3. Відновлення працездатності датчика кутової швидкості.....	127
5.4. Відновлення працездатності датчика струму.....	134

Розділ VI. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО БЛОКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ.....	142
6.1. Призначення та склад експериментальної установки.....	142
6.2. Пристрій макетного блока електродвигунів-маховиків.....	147
6.3. Пристрій раціонального управління макетним блоком.....	154
6.4. Управління експериментальною установкою.....	169
Розділ VII. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО БЛОКА ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ.....	175
7.1. Виявлення дестабілізації в макетному блоці електродвигунів- маховиків.....	175
7.2. Пошук дестабілізуючих функціональних елементів у макетному блоці.....	183
7.3. Ідентифікація дестабілізуючих впливів.....	195
7.4. Відновлення працездатності макетного блока електродвигунів- маховиків.....	206
ВИСНОВОК.....	217
Бібліографічний список.....	219

Наукове видання

**Джуглаков Віталій Георгійович,
Дергачов Костянтин Юрійович,
Кулік Анатолій Степанович та ін.**

**РАЦІОНАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ МАКЕТНОГО
БЛОКА ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ**

Редактор С. М. Пасічник

Зв. план, 2023. Підписано до друку 17.03.2023. Формат 60x84 1/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 13,2. Обл.-вид. арк. 14,5. Наклад 100 пр.
Замовлення 0317/23. Ціна вільна.

Видавець

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001

Виготовлювач

Надруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Азамаєв В. Р.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 24800170000026884 від 25.11.1998 р.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції.
Серія ХК № 135 від 23.02.05 р.
м. Харків, вул. Познанська 6, к. 84, тел. (057) 778-60-34,
[e-mail:bookfabrik@mail.ua](mailto:bookfabrik@mail.ua)