

УДК 629.3.025.2(045)

О.А. Сущенко, канд. техн. наук, доц.
Р.А. Сайфетдінов, нач. сектору

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХОМОГО НАЗЕМНОГО ОБ'ЄКТА В КОНТУРАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАВЕДЕННЯ

Подано підхід до створення математичної моделі наземного рухомого об'єкта, яка може бути використана для дослідження системи стабілізованого наведення в горизонтальній та вертикальній площинах.

Approach to creation of the ground moving object model is suggested. Such model may be used for research of the system of stabilized guidance in the vertical and horizontal planes.

Вступ

Останнім часом зростає актуальність розроблення систем стабілізації та наведення наземних рухомих об'єктів.

Одним із найбільш цікавих застосувань таких систем є їх використання для установа знімальної камери.

Створення нових сучасних систем стабілізації рухомими наземними об'єктами потребує наявності їх математичного опису. При цьому з погляду розробника систем стабілізації можливі різні підходи до створення моделі рухомого наземного об'єкта як складової частини моделей систем наведення в горизонтальній та вертикальній площинах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Інтегровану навігаційну систему рухомого об'єкта описано в праці [1], в якій робиться акцент на використанні автономних навігаційних систем.

Шляхи підвищення точності систем навігації наземних рухомих об'єктів розглянуто на конференції [2], де йдеться про поліпшення алгоритмів оброблення навігаційної інформації.

Розгляд же питань математичного опису систем стабілізації та особливо наведення рухомих наземних об'єктів потребує окремого дослідження.

Постановка проблеми

Розглядається система стабілізованого наведення блока апаратури (БА), установленого на деякій поворотній основі у вертикальній та горизонтальній площинах. Блок апаратури на поворотній основі встановлено в робочому модулі, який, в свою чергу, розміщено на рухомому наземному об'єкті.

Слід зазначити, що існує можливість керування системою оператором, для чого може бути задіяний відповідний пульт керування.

Мета цієї роботи – розроблення моделі наземного рухомого об'єкта з урахуванням пристроїв наведення в горизонтальній та вертикальній площинах та відповідно виконавчого пристрою, тобто двигуна.

Передбачається розроблення повної моделі системи стабілізованого наведення. Тут ітиметься про модель блока апаратури та виконавчого пристрою, які з'єднані між собою через редуктор.

Акцентується увага на досить спрощеному відтворенні руху об'єкта. Але водночас запропонована модель дуже зручна саме для створювача системи стабілізованого наведення.

Математична модель рухомого наземного об'єкта з урахуванням пристроїв вертикального та горизонтального наведення

Оскільки канали стабілізованого наведення незалежні, то математичну модель робочого модуля можна подати у вигляді двох математичних моделей:

– моделі динаміки блока апаратури з урахуванням редуктора та двигуна приводу вертикального наведення;

– моделі динаміки поворотної основи з урахуванням редуктора та двигуна приводу горизонтального наведення.

Під час розроблення запропонованої моделі враховувалися:

– моменти опору;

– моменти неврівноваженості;

– моменти інерції;

– наявність пружної системи балансування.

Такий підхід забезпечує відповідність створюваної моделі до реальної апаратури. З цієї ж метою до математичного опису об'єкта введено характеристики редукторів наведення в горизонтальній та вертикальній площинах з урахуванням їх жорсткості та люфтів.

Усі моменти, що входять до складу моделі, приводяться до осі обертання двигуна.

Вхідним сигналом як для моделі БА, так і для моделі поворотної основи є послідовність імпульсів деякої амплітуди та тривалості, яка в реальній апаратурі зазвичай формується за допомогою широтно-імпульсного модулятора. Щодо вихідних сигналів, то тут є деякі відмінності для каналів наведення у вертикальній та горизонтальній площинах. Вихідними сигналами моделі каналу системи стабілізованого наведення у вертикальній площині є сигнали керування за струмом та напругою, які надалі будуть використовуватись у системі стабілізованого наведення в цілому, а також відносна кутова швидкість блока апаратури.

Вихідними сигналами моделі каналу системи стабілізованого наведення в горизонтальній площині є сигнал керування за струмом, що надалі

буде

використовуватись у системі стабілізації в цілому, та відносна кутова швидкість поворотної основи.

Абсолютна кутова швидкість блока апаратури визначається сумарною швидкістю переносного кутового руху наземного об'єкта та відносного кутового руху блока апаратури. Абсолютна кутова швидкість поворотної основи визначається сумарною швидкістю переносного кутового руху наземного об'єкта та відносного кутового руху поворотної основи.

У цій роботі математичну модель рухомого наземного об'єкта в контурах стабілізованого наведення в горизонтальній та вертикальній площинах подано у вигляді диференціальних рівнянь, оскільки таке подання найбільш наочне для теоретичного опису складної динамічної системи. Безпосередньо програмну реалізацію як моделі наземного рухомого об'єкта в контурах наведення, так і моделі системи стабілізованого наведення в цілому буде здійснено засобами системи Simulink із використанням передавальних функцій основних пристроїв БА та поворотної основи. Такий підхід дозволить використовувати для математичного опису системи нелінійні ланки, тобто наблизити модель до реальної апаратурної реалізації та відповідно отримати надійний засіб дослідження вперше створюваних систем стабілізованого наведення на початкових етапах їх розроблення.

Відмінність між вертикальним та горизонтальним каналами системи стабілізованого наведення полягає лише в наявності деяких складових, а також у числових даних. Тому наводимо детальний математичний опис лише каналу стабілізованого наведення у вертикальній площині та визначаємо відмінності аналогічної моделі для горизонтального каналу.

Математична модель робочого модуля у вертикальному каналі наведення складається з математичних моделей двох основних пристроїв:

- блока апаратури;
- двигуна системи наведення.

У свою чергу, зі складу моделі двигуна можна виокремити:

- модель якоря;
- аперіодичну ланку, що враховує сталу часу двигуна;
- модель механічної частини двигуна.

Модель якоря можна подати в такому вигляді:

$$J = \frac{U_{\text{шм}} - c_e \dot{\varphi}_{\text{дв}}}{R_{\text{об}}}, \quad (1)$$

де J – струм, що протікає в колі якоря;

$U_{\text{шм}}$ – напруга широтно-імпульсного модулятора, тобто вхідний сигнал моделі;

c_e – постійна ЕРС;

$\dot{\varphi}_{\text{дв}}$ – кутова швидкість двигуна, яка являє собою сигнал за зворотним зв'язком;

$R_{\text{об}}$ – опір обмотки якоря.

Вихідними величинами моделі є струм, що надходить на блок, в якому формується керувальний момент двигуна, та коло зворотного зв'язку за струмом, а також напруга на обмотці двигуна:

$$U_{\text{об}} = U_{\text{шм}} - c_e \dot{\varphi}_{\text{дв}},$$

яка надходить до ланцюга формування сигналу зворотного зв'язку за напругою.

Сталу часу двигуна, що враховується через аперіодичну ланку з одиничним коефіцієнтом підсилення, можна записати в такому вигляді:

$$T_{\text{дв}} \dot{J}_{\text{кор}} + J_{\text{кор}} = J, \quad (2)$$

де $T_{\text{дв}}$ – стала часу двигуна;

$J_{\text{кор}}$ – відкоректований вихідний сигнал аперіодичної ланки, який надходить на механічну частину двигуна, а також являє собою вихідний сигнал керування за током для інших пристроїв системи стабілізованого наведення у вертикальній площині.

Математичні моделі двигуна згідно з працею [3] можна надати вигляду диференціального рівняння другого порядку:

$$J_{\text{дв}} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} + M_{\text{оп}} \text{sign} \dot{\varphi}_{\text{дв}} = c_m J_{\text{кор}} - c_p \frac{\varphi_{\text{л}} - \varphi_{\text{ба}} n_p}{n_p^2}, \quad (3)$$

де $J_{\text{дв}}$ – момент інерції двигуна;

$\varphi_{\text{дв}}$ – кут повороту двигуна;

$M_{\text{оп}}$ – момент опору обертанню двигуна;

c_m – постійний коефіцієнт моменту навантаження на валу двигуна;

$J_{\text{кор}}$ – вихідний сигнал аперіодичної ланки;

c_p – жорсткість редуктора;

$\varphi_{\text{л}}$ – кут повороту двигуна з урахуванням нелінійності, яка зумовлюється наявністю люфту двигуна;

$\varphi_{\text{ба}}$ – кут повороту БА;

n_p – передавальне число редуктора.

Вхідними величинами моделі механічної частини двигуна є струм, пропущений через аперіодичну ланку, кут повороту БА та кут повороту двигуна, пропущений через нелінійну ланку.

Згадані кути являють собою сигнали зворотного зв'язку.

Вихідною величиною моделі є кут повороту двигуна. Запропонована модель механічної частини двигуна характеризується такими особливостями.

1. У моделі враховано не лінійність, притаманну реальній системі, для чого вихідний сигнал лі-

нійної моделі, тобто кут повороту двигуна $\varphi_{дв}$, пропускається через нелінійну ланку. Блок-схему формування кута повороту двигуна $\varphi_{л}$ з урахуванням дії нелінійності, зумовленого наявністю люфту двигуна, показано на рис. 1.

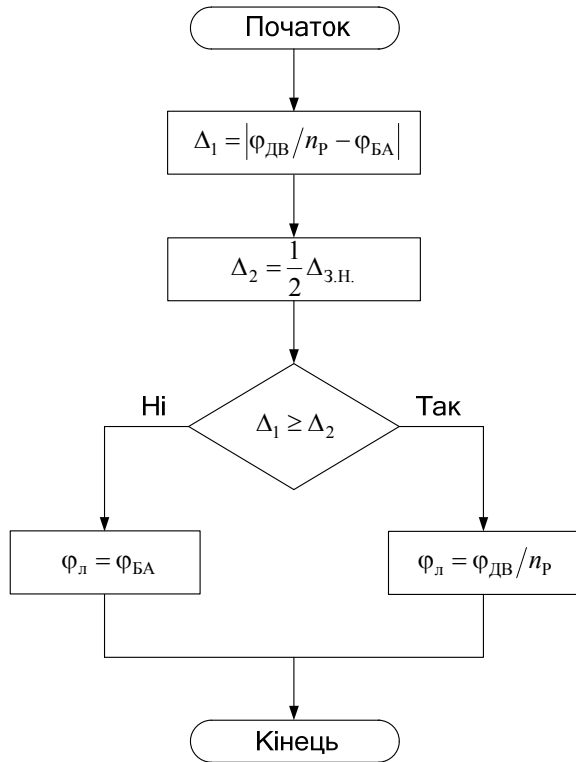


Рис. 1. Блок-схема формування кута повороту двигуна з урахуванням нелінійності, зумовленої люфтом двигуна ($\Delta_{3.н}$ – зона нелінійності)

2. Взаємозв'язок механічної частини двигуна та БА здійснюється через редуктор. Математично такий взаємозв'язок забезпечується введенням до рівняння (3) кута повороту БА.

3. З метою встановлення адекватності моделі та реального двигуна вводиться обнулення прискорення обертання двигуна за умови його нульової швидкості та виконання певних співвідношень між моментами, що діють на двигун.

Ці умови мають такий вигляд:

$$\left| c_m J_{корп} - c_p \frac{\varphi_{гіст} - \varphi_{БА} n_p}{n_p^2} \right| \leq | M_{оп} \text{sign} \dot{\varphi}_{дв} | \quad (4)$$

$$\ddot{\varphi}_{дв} = 0.$$

Математичну модель БА можна подати у вигляді диференціального рівняння другого порядку:

$$J_{ба} \ddot{\varphi}_{БА} + M_{тр} \text{sign} \dot{\varphi}_{БА} - M_{нр} \sin \varphi_{БА} + k_{пр} \varphi_{БА} + c_p \varphi_{БА} = k_{пр} A + c_p \varphi_{гіст} / n_p - M_{нр}, \quad (5)$$

де $J_{БА}$ – момент інерції БА;

$M_{тр}$ – момент тертя;

$M_{нр}$ – момент незрівноваженості;

$k_{пр}$ – жорсткість пружини;

A – початковий кут відхилення пружини.

Вхідними величинами моделі БА є кут повороту двигуна з урахуванням дії нелінійності $\varphi_{л}$ та кут повороту пружини A . При цьому необхідно враховувати дію момента незрівноваженості $M_{нр}$.

Блок-схему математичної моделі БА з урахуванням руху поворотної основи, на якій показано взаємозв'язок усіх її складових – (1)–(5), зображено на рис. 2.

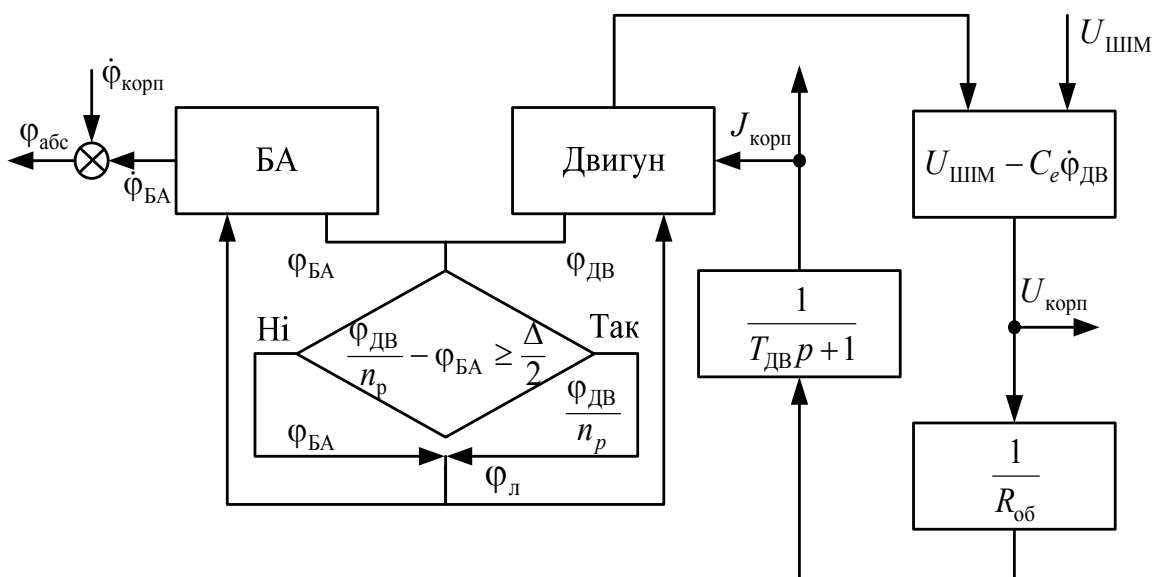


Рис. 2. Блок-схема математичної моделі БА з урахуванням руху поворотної основи

Вихідною величиною моделі є кутова швидкість БА $\dot{\varphi}_{\text{БА}}$, яка являє собою вертикальну складову відносної швидкості робочого модуля. Остаточним диференціальним рівнянням вертикального каналу робочого модуля є рівняння, яке дозволяє визначити його абсолютну кутову швидкість $\dot{\varphi}_{\text{абс}}$ складанням кутової швидкості БА (відносної швидкості) $\dot{\varphi}_{\text{БА}}$ та кутової швидкості об'єкта (переносної швидкості) $\dot{\varphi}_{\text{корп}}$:

$$\dot{\varphi}_{\text{абс}} = \dot{\varphi}_{\text{БА}} + \dot{\varphi}_{\text{корп}}.$$

Отриманий сигнал абсолютної швидкості $\dot{\varphi}_{\text{абс}}$ після інтегрування являє собою вихідний сигнал для гіротахметра, що входить до складу системи стабілізованого наведення робочого модуля у вертикальній площині.

Математичну модель динаміки поворотної основи можна описати аналогічними співвідношеннями за винятком:

– використання напруги обмотки двигуна для формування сигналу зворотного зв'язку за напругою;

– використання пристрою балансування ($k_{\text{пр}} = 0$).

Висновки

Запропоновано підхід до створення моделі наземного рухомого об'єкта у контурах вертикального та горизонтального наведення, спрямованої на подальше використання у системі стабілізованого наведення у вертикальній та горизонтальній площинах. Такий підхід забезпечує можливість моделювання вперше створюваних систем керування наземними рухомими об'єктами за умови виконання жорстких точнісних вимог і водночас забезпечує достатню простоту та прозорість моделі наземного рухомого об'єкта.

Література

1. Збруцький О.В., Гогун Ю.В. Інтегрована навігаційна система рухомого наземного об'єкта // Сб. докл. III міжнарод. науч.-техн. конф. "Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование подвижных объектов", 19–20 квіт. 2001 р. – К., 2001. – С. 168 – 173.
2. Корольов В.М. Шляхи підвищення точності систем навігації наземних рухомих об'єктів // Сб. докл. V міжнарод. науч.-техн. конф. "Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование подвижных объектов", 21–22 квіт. 2005 р. – К., – 2005. – С. 124 – 129.
3. Следящие приводы / Под ред. Б. К. Чемоданова. Кн. 1. – М.: Энергия, 1976. – 480 с.

Стаття надійшла до редакції 31.01.07.