

УДК 629.3.025.2(045)

О.А. Сущенко, канд. техн. наук, доц.
С.П. Маляров, дир. НВК
Р.А. Сайфетдінов, нач. сектору
Г.Є. Янкелевич, канд. техн. наук, нач. СКБ

ОСОБЛИВОСТІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ СТАБІЛІЗАТОРА НАЗЕМНОГО РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

Розроблено повну математичну модель стабілізатора наземного рухомого об'єкта. Визначено особливості створення моделей досліджуваного класу. Подано та проаналізовано результати моделювання.

The total mathematical model of the ground moving object stabilizer is considered. Features of creation of such class models are defined. Simulation results are represented and analysed.

Постановка проблеми

Дослідження стабілізаторів із використанням двигунів постійного струму актуальне для багатьох класів об'єктів. При цьому для приладобудування України значний інтерес становлять гіроскопічні стабілізатори рухомих наземних об'єктів.

Зазвичай такі системи використовують для забезпечення стабілізації та наведення робочого блока, наприклад, кінокамери, встановленої на поворотній основі, системи стабілізації та наведення антени радіолокатора, встановленої в поворотному кардановому підвісі, та інших рухомих наземних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень

Основні питання створення стабілізаторів із двигуном постійного струму досить повно наведено в праці [1]. Але, по-перше, під час дослідження систем розглядуваного класу потрібно враховувати сучасні засоби математичного та комп'ютерного моделювання, а по-друге, слід детально розглянути особливості дослідження та математичного описування стабілізаторів, призначених для наземних рухомих об'єктів. При цьому доцільно враховувати положення, наведені в таких відомих працях, як [2–5].

Постановка завдання

До найважливіших питань дослідження стабілізатора рухомого наземного об'єкта слід віднести створення повної математичної моделі стабілізатора з урахуванням об'єкта керування, датчиків інформації, слідкувального привода.

Найбільш складним для моделювання є блок керування.

Водночас більшість актуальних питань для дослідження систем розглядуваного класу пов'язано саме з цим блоком. Отже, його модель має бути достатньо повною.

При цьому слід моделювати електронні пристрої, що входять до його складу, на підставі сучасних методів комп'ютерного моделювання (Workbench, Simulink) та передбачити можливість аналізу впливу інтервалу оновлення інформації на точнісні параметри стабілізатора.

Найскладніші питання, що виникають під час створення моделі такого класу, – це необхідність враховувати такі особливості модельованого стабілізатора, як наявність люфтів та пружного механізму. У багатьох випадках складним питанням є також організація зв'язку моделей стабілізатора та об'єкта керування, оскільки з точки зору створювача стабілізатора модель об'єкта керування має бути достатньо простою та водночас відтворювати всі особливості його впливу на характеристики стабілізатора.

Крім розв'язання цих питань в роботі подано та проаналізовано результати моделювання, отримані за допомогою моделі, створеної із урахуванням усіх раніше перерахованих особливостей стабілізатора рухомого наземного об'єкта.

Математична модель стабілізатора наземного об'єкта

Відповідно до призначення рухомого наземного об'єкта його математичний опис має забезпечити моделювання в режимах стабілізації та наведення як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Тобто повна модель стабілізатора рухомого наземного об'єкта має складатись із двох незалежних моделей: вертикального та горизонтального каналів. При цьому математична модель вертикального каналу містить:

- модель робочого блока;
- модель двигуна привода вертикального наведення, пов'язаного з робочим блоком через редуктор та пружну систему балансування;
- модель блока керування приводом вертикального наведення та підсилювача напруги;
- модель гіротахометра.

За принципом побудови моделі вертикального та горизонтального каналів дуже схожі.

Для горизонтального каналу відмінність полягає в об'єкті керування (у цьому випадку як такий об'єкт беруть поворотну основу) та в законах керування і відповідно, моделі блока керування.

Модель горизонтального каналу більш проста, тому, надаючи математичний опис стабілізатора, найбільшу увагу буде приділено вертикальному каналу, виходячи з його більшої складності. Зв'язок із рухомим об'єктом, на якому встановлюється поворотна основа з робочим блоком, пропонується здійснювати завданням відповідної переносної кутової швидкості.

Розроблені математичні моделі стабілізатора наземного рухомого об'єкта характеризуються такими особливостями.

1. Математичні моделі вертикального та горизонтального каналів створено з урахуванням впливу на стабілізатор моментів тертя, невідповідності та інерції. У математичній моделі вертикального каналу враховано наявність пружної системи балансування (у горизонтальному каналі такої системи немає).

2. Кутовий рух від двигунів на робочий блок та поворотну основу передається через редуктори. Математичні моделі враховують також наявність люфтів та пружність конструкції привода за допомогою алгоритмів оригінальної розробки.

3. Керування кутовим рухом двигунів приводів вертикального та горизонтального каналів стабілізатора здійснюється за допомогою сигналу, що являє собою послідовність імпульсів заданої амплітуди, тривалість яких визначається за допомогою моделі широтно-імпульсного модулятора. Така модель має забезпечувати моделювання процесів, наближених до реальної реалізації, тому вона є достатньо складною, хоча її використання позначається на тривалості процесів моделювання. Тому в деяких випадках за потреби моделювання довготривалих процесів вважається доцільним використовувати спрощену модель за умови збереження характеру змінювання перехідних процесів за основними параметрами стабілізатора.

4. Керування рухом робочого блока та поворотної основи здійснюється на підставі інформації про їх абсолютну кутову швидкість, отримувану від гіротахометрів.

5. Формування законів керування рухом робочого блока здійснюється з урахуванням зворотних зв'язків за напругою та струмом в обмотці якоря двигуна (вертикальний канал).

Горизонтальний канал не має зворотного зв'язку за напругою, це його особливість.

6. Алгоритм формування пружного зв'язку між двигуном та робочим блоком у вертикальному каналі реалізується на підставі інформації про кут розвороту робочого блока відносно поворотної основи та кут повороту двигуна.

7. Абсолютна кутова швидкість робочого блока визначається швидкістю переносного кутового руху наземного об'єкта та швидкістю кутового відносного руху робочого блока.

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

Основні складові математичної моделі стабілізатора наземного рухомого об'єкта мають такий вигляд.

Математичну модель робочого блока описують диференціальним рівнянням вигляду

$$J_{\text{рб}} \ddot{\varphi}_{\text{рб}} + M_{\text{тр}} \text{sign} \dot{\varphi}_{\text{рб}} - M_{\text{нвр}} \sin \varphi_{\text{рб}} + k_{\text{пр}} \varphi_{\text{рб}} + c_{\text{р}} \varphi_{\text{рб}} = k_{\text{пр}} A + c_{\text{р}} \frac{\varphi_{\text{нл}}}{n_{\text{р}}} - M_{\text{нвр}}, \quad (1)$$

де $J_{\text{рб}}$ – момент інерції робочого блока;

$\varphi_{\text{рб}}$ – кут повороту робочого блока або поворотної основи для горизонтального каналу;

$M_{\text{тр}}$ – момент тертя у початковий момент часу;

$M_{\text{нвр}}$ – момент невідповідності;

$k_{\text{пр}}$ – жорсткість пружини;

A – кут взведення пружини пристрою балансування;

$c_{\text{р}}$ – жорсткість редуктора;

$\varphi_{\text{нл}}$ – кут повороту ротора двигуна з урахуванням нелінійності, зумовленої наявністю люфту двигуна;

$n_{\text{р}}$ – передавальне число редуктора.

У процесі налагодження моделі було встановлено, що для відповідності моделі об'єкта керування реальній системі слід уводити обнуління прискорення обертання двигуна за умови досягнення нульової швидкості та виконання певних співвідношень між моментами, що діють на робочий блок або поворотну основу для горизонтального каналу.

Ці умови мають такий вигляд:

$$\left| M_{\text{нвр}} \sin \varphi_{\text{рб}} - k_{\text{пр}} \varphi_{\text{рб}} - c_{\text{р}} \dot{\varphi}_{\text{рб}} + k_{\text{пр}} A + c_{\text{р}} \frac{\varphi_{\text{нл}}}{n_{\text{р}}} - M_{\text{нвр}} \right| \leq |M_{\text{тр}}|,$$

$$\dot{\varphi}_{\text{рб}} = 0.$$

Абсолютну кутову швидкість робочого блока для вертикального каналу та поворотної основи для горизонтального каналу визначають додаванням кутової швидкості робочого блока (відносної швидкості) $\dot{\varphi}_{\text{рб}}$ та кутової швидкості корпусу

об'єкта (переносної швидкості) $\dot{\varphi}_{\text{корп}}$:

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

Отриманий сигнал абсолютної кутової швидкості $\dot{\varphi}_{\text{абс}}$ являє собою вхідний сигнал для гіротахметра, який виконує функції вимірювача абсолютної кутової швидкості робочого блока або поворотної основи для вертикального та горизонтального каналів відповідно.

Математична модель гіротахметра може бути подана у вигляді передавальної функції [4]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{\omega_{\text{в}}(p)} = \frac{k_{\text{гт}}}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1},$$

де U – вихідна напруга;

$\omega_{\text{в}}$ – вимірювана кутова швидкість;

$k_{\text{гт}}$ – коефіцієнт передачі гіротахметра;

T_0 – стала часу;

p – оператор Лапласа;

ξ – відносний коефіцієнт демпфірування.

Математичну модель датчика положення визначають співвідношенням

$$U_{\varphi} = k_{\varphi} \sin \varphi,$$

де φ – кут розвороту робочого блока або поворотної основи відносно корпусу наземного об'єкта;

k_{φ} – крутизна вихідної характеристики датчика.

Математична модель двигуна може бути подана у вигляді диференціального рівняння:

$$J_{\text{дв}} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} + M_{\text{оп}} \text{sign} \dot{\varphi}_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \frac{\varphi_{\text{нл}} - \varphi_{\text{рб}} n_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2}, \quad (2)$$

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

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

$M_{\text{дв}}$ – момент керування двигуном;

$M_{\text{оп}}$ – момент опору обертанню.

Момент керування двигуном визначають на підставі співвідношення

$$M_{\text{дв}} = c_{\text{м}} J_{\text{корп}},$$

де $c_{\text{м}}$ – стала моменту навантаження на валу двигуна;

$J_{\text{корп}}$ – відкоректований струм.

Рівень струму в обмотці якоря двигуна з урахуванням сталої часу якоря двигуна $T_{\text{я}}$ визначають співвідношеннями:

$$I_{\text{кор}} = \frac{U_{\text{кор}}}{R_{\text{об}}};$$

$$T_{\text{я}} p U_{\text{кор}} + U_{\text{кор}} = U_{\text{об}}.$$

Напругу на обмотці якоря двигуна визначають співвідношенням

$$U_{\text{об}} = U_{\text{шім}} - c_{\text{ерс}} \dot{\varphi}_{\text{дв}},$$

де $U_{\text{шім}}$ – вихідна напруга широтно-імпульсного модулятора;

$c_{\text{ерс}}$ – стала електрорушійної сили;

$\dot{\varphi}_{\text{дв}}$ – кутова швидкість двигуна.

У математичній моделі двигуна, як і у випадку з робочим блоком (поворотною основою), слід обнулювати прискорення двигуна за умови його нульової швидкості та виконання деякого співвідношення між моментами, що діють на двигун.

Ці умови мають вигляд:

$$\left| M_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \frac{\varphi_{\text{нл}} - \varphi_{\text{рб}} n_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2} \right| \leq |M_{\text{оп}}|;$$

$$\dot{\varphi}_{\text{дв}} = 0.$$

Як виходить із рівнянь (1), (2), слідкувальний привід з об'єктом керування розглядають як єдиний пристрій відтворення сигналу керування, взаємозв'язок між якими здійснюється через редуктор із урахуванням його жорсткості.

Люфт двигуна урахують відповідно до алгоритму, зображеного на рис. 1.

Результати моделювання стабілізатора наземного рухомого об'єкта

Програмну реалізацію моделі здійснено за допомогою системи Simulink із поданням окремих ланок блоків керування вертикального та горизонтального каналів у вигляді передавальних функцій.

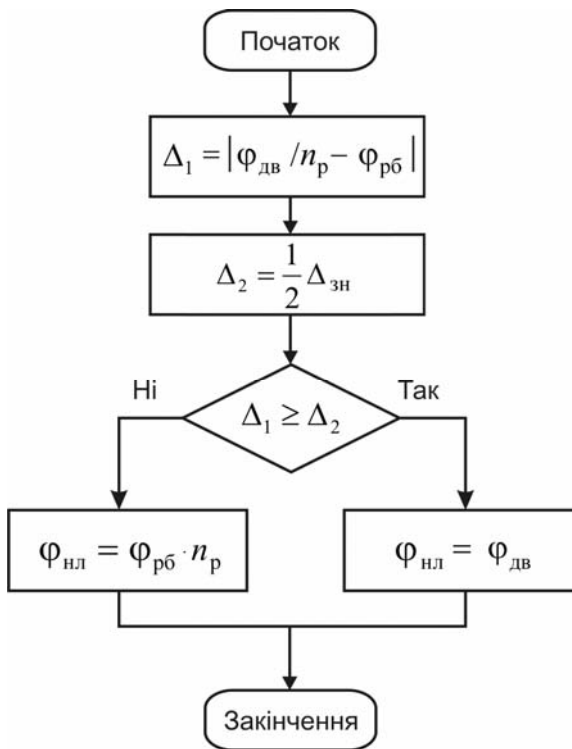


Рис. 1. Алгоритм урахування люфту двигуна

Крім того, використовуючи можливості системи Simulink, до моделі уведено усі потрібні нелінійні ланки, а саме обмежувачі сигналів, зони нечутливості та ін.

Такий підхід дозволяє наблизити модель до реальної апаратної реалізації стабілізатора та підвищує цінність отриманих під час моделювання результатів.

Основні особливості побудовання моделі стабілізатора з неперервним блоком керування показано на рис. 2.

Моделювання стабілізатора було проведено для вертикального та горизонтального каналів у неперервному та дискретному виконанні. Найбільш цікаві результати показано на рис. 3.

Створена модель дозволяє досліджувати важливі питання проектування стабілізатора рухомого наземного об'єкта, а саме:

- забезпечення точнісних параметрів;
- аналіз показників якості перехідних процесів;
- вибір дискретності інтервалу обробки інформації;
- забезпечення точності процесів стабілізації та наведення для малих швидкостей;
- визначення жорсткості стабілізатора;
- визначення реакції стабілізатора на задані пробні сигнали.

Забезпечення точності процесів стабілізації та наведення підтверджується рис. 3, а, б, на яких показані перехідні процеси абсолютної швидкості робочого блока для заданої переносної швидкості 20 град/с. Як виходить із результатів моделювання, під час руху об'єкта з кутовою швидкістю 20 град/с відхилення абсолютної швидкості відносно нульового рівня не перевищує заданого значення та відбувається забезпечення показників за тривалістю перехідних процесів.

На рис. 3, в, г показано вихідний сигнал ланки зворотного зв'язку за напругою і током обмотки якоря двигуна, після якої має здійснюватись аналого-цифрове перетворення в разі переходу до дискретного каналу керування. При цьому видно, що введення фільтра дозволяє суттєво зменшити змінну складову вихідного сигналу зворотного зв'язку за напругою і током.

Аналіз частоти вихідного сигналу вказує на можливість використання аналого-цифрового перетворювача з дискретністю перетворення сигналів 2,5 мс, оптимальною з точки зору досягнення компромісу між точністю та зручністю програмної реалізації цифрового блока керування.

Для стабілізаторів високої точності значний інтерес викликають результати моделювання відпрацювання малих швидкостей наведення, які задають за допомогою пульта.

При цьому забезпечується досить мала швидкість наведення на рівні 0,01 град/с та лінійний характер змінювання абсолютного кута повороту стабілізатора (рис. 3, д, е).

Зазвичай для випробувань наземних об'єктів досліджуваного класу використовують пробні синусоїдальні сигнали. Відпрацювання такого сигналу за абсолютним кутом показано на рис. 3, ж. У процесі моделювання було встановлено, що похибка відпрацювання може бути зменшена за рахунок вибору настроювальних параметрів.

Рис. 3, з підтверджує, що так звана жорсткість стабілізатора, що характеризує його реакцію на задані зовнішні збурення, забезпечується у межах заданих вимог.

Наведений графік демонструє змінювання абсолютного кута стабілізатора під час дії заданого зовнішнього збурення.

Після дії збурення у 770 Нм значення абсолютного кута стабілізатора встановлюється на рівні $\varphi_1 = -0,072$ град. Після дії додаткового збурення у 250 Нм значення кута змінюється до $\varphi_2 = -0,092$ град, тобто кутове прирощення становить $|\Delta\varphi| = 0,02$ град.

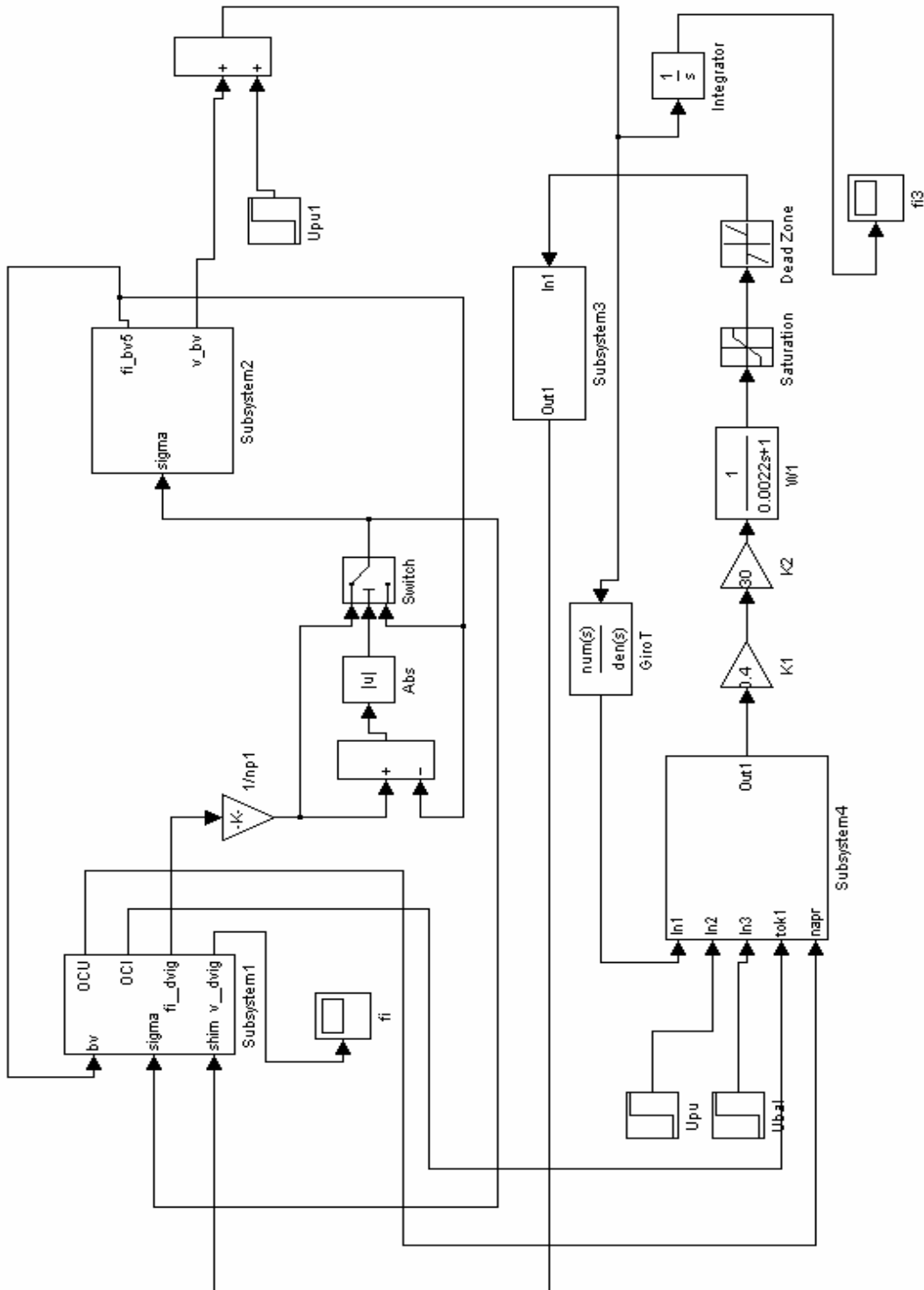


Рис. 2. Обчислювальна схема неперервного вертикального каналу стабилизатора

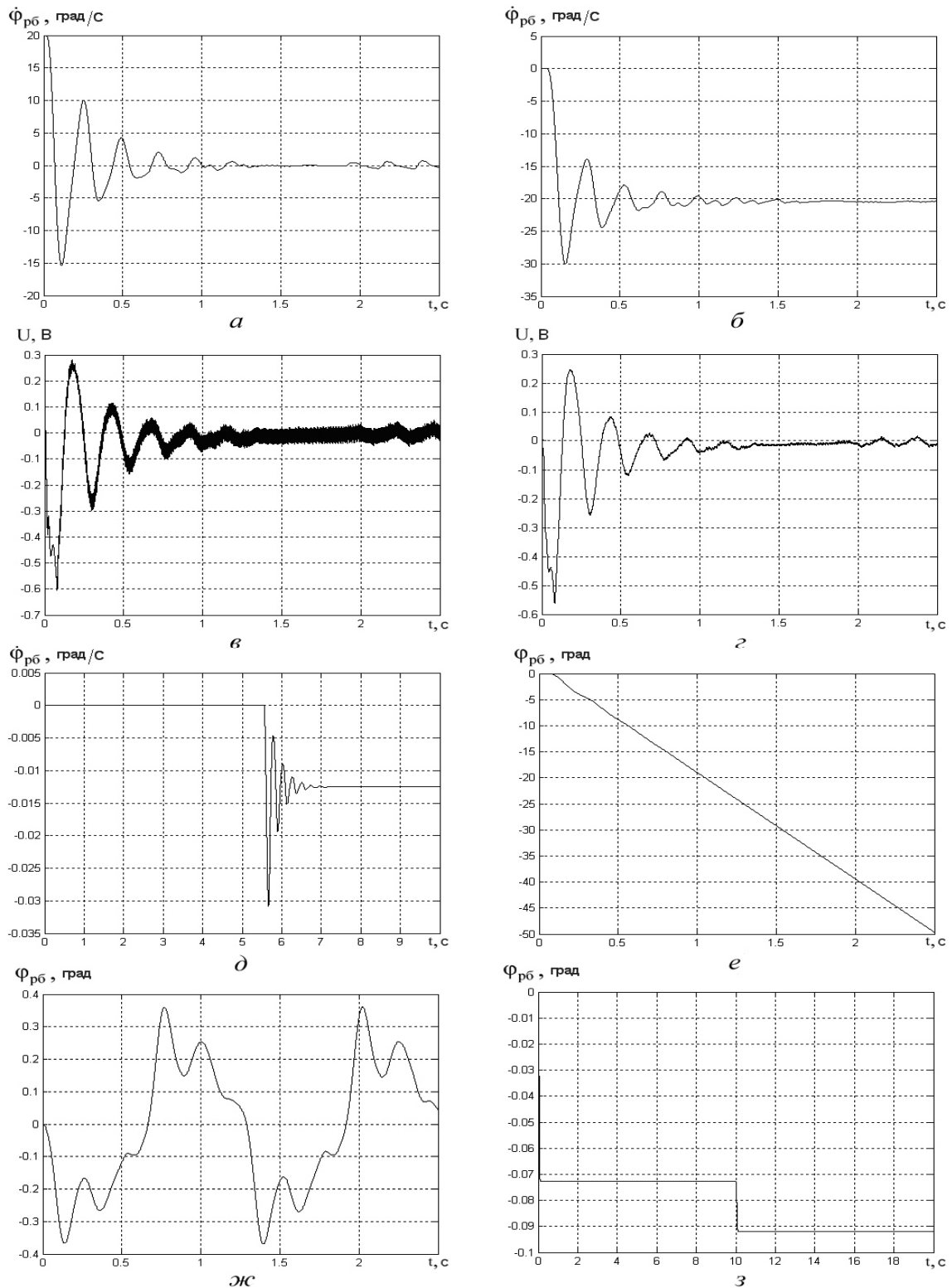


Рис. 3. Моделювання стабілізатора:

- a* – абсолютна кутова швидкість в режимі стабілізації;
- б* – точність відпрацювання швидкості, яка задається з пульта;
- в, г* – вихідні сигнали ланки блока керування до і після фільтрації;
- д, е* – відпрацювання малої кутової швидкості та відповідного кута повороту робочого блока;
- ж* – відпрацювання гармонічної заданої кутової швидкості;
- з* – результати перевірки стабілізатора на жорсткість

У реальних стабілізаторах зазвичай передбачено можливість корекції точнісних показників за допомогою настроювальних коефіцієнтів. Розроблена модель дозволяє виконати дослідження таких можливостей.

Висновки

Створено повну модель стабілізатора наземного рухомого об'єкта з урахуванням нелінійностей, притаманних реальним системам. Запропоновано деякі оригінальні алгоритми математичного опису стабілізатора рухомого наземного об'єкта. Виконано комп'ютерне моделювання в системі Simulink та проаналізовано отримані результати.

Література

1. *Кочергин В.В.* Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
2. *Следящие приводы.* Кн. 1 / Под ред. Б. К. Чемоданова. – М.: Энергия, 1976. – 480 с.
3. *Артамонов В.М.* Следящие системы радиолокационных станций автоматического сопровождения и управления. – Л.: Судостроение, 1969. – 488 с.
4. *Васильев Д.В., Чуич В.Г.* Системы автоматического управления. – М.: Высш. шк., 1967. – 419 с.
5. *Юревич Е.И.* Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1975. – 414 с.
6. *Ключев В.И.* Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

Стаття надійшла до редакції 09.11.07.