DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.43.05.108>
УДК 621.317

О.М. Безвесільна¹, д-р техн. наук,

В.Д. Самойлов², д-р техн. наук, **М.В. Ільченко**³, канд. техн. наук

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Україна, 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37
тел. +308(095) 160 32 18, e-mail: o.bezvesilna@gmail.com

² Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України
Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15

³ Приватне акціонерне товариство «Науково-виробниче об'єднання»
«Київський завод автоматики»
Україна, 04116, м. Київ, вул. Старокиївська, 10
тел. +308(050) 569 98 71, e-mail: inv125@ukr.net

Математичні моделі основних вузлів та блоків автоматизованого приладового комплексу стабілізації

Наведено математичні моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу автоматизованого приладового комплексу стабілізації: пульта керування, гіротахметра ГТ46, датчика положення, блоку управління та ін. Розроблено математичні моделі каналів вертикального та горизонтального наведення з редуктором і двигуном та математичні моделі аналогового і цифрового тракту управління каналів горизонтального та вертикального наведення. Надано результати математичного моделювання окремих режимів управління вертикального та горизонтального каналів. Розроблені математичні моделі використовуються при моделюванні режимів управління стабілізатора, а також у дослідженні зміни моделі побудови стабілізатора для підвищення його точності. Достовірність отриманих результатів підтверджено результатами експериментів.

К л ю ч о в і с л о в а: комплекс стабілізації, математична модель, пульт управління, гіротахметр, датчик положення, модулятор.

Високоточні автоматизовані приладові комплекси стабілізації (АПКС) призначені для використання у легкій броньованій техніці (ЛБТ). Вони виконують функції пошуку, визначення координат рухомих об'єктів (РО) в екстремальних умовах, а також здійснюють спостереження за наземними, повітряними та надводними цілями [1—6].

© Безвесільна О.М., Самойлов В.Д., Ільченко М.В., 2021

Перспективним є використання АПКС в авіаційній гравіметрії для стабілізації виставлення осей чутливості навігаційних чутливих елементів (гравіметрів) [5, 7—10]. Наразі значно зросли вимоги до точності засобів та методів вимірювання механічних величин стабілізаторів. Розробка математичних моделей основних вузлів та блоків АПКС та моделювання сприяють пришвидшенню аналізу процесів його роботи, дозволяють узагальнити деякі основні моменти та сформулювати подальші пропозиції щодо удосконалення АПКС. Досягнення високої точності АПКС стало можливим завдяки високій якості сучасних елементів гіроскопічної техніки і значному розвитку теорії гіроскопічних пристроїв. Однак робіт, присвячених математичному моделюванню основних вузлів та блоків АПКС, яке значно пришвидшує аналіз процесів роботи стабілізатора та дозволяє сформулювати подальші пропозиції щодо удосконалення АПКС, недостатньо.

Мета даного дослідження — надати відомості про розроблені математичні моделі основних вузлів та блоків АПКС [11—21]. На основі створених математичних моделей наведення та стабілізації здійснено моделювання всіх режимів роботи стабілізатора з врахуванням зміни вхідних сигналів та регульованих параметрів у діапазонах, що передбачено конструкторською документацією на стабілізатор.

Постановка задачі і алгоритм розрахунку. При моделюванні основних блоків стабілізатора вирішувались такі задачі:

- моделювання похибок відпрацювання кутової швидкості режимів наведення і стабілізації та дослідження процесів відпрацювання малих швидкостей при задаванні їх з пульта управління;
- відпрацювання кутового положення стабілізатора при дії одиночних, багатократних збурень та збурень у вигляді гармонійного сигналу, який відповідає кутовому профілю типової траси;
- перевірка можливості забезпечення заданих вимог за умови обраного інтервалу дискретності (2,5 мс) та округлення значущих цифр у передавальних функціях основних ланок дискретних блоків управління до трьох значущих цифр;
- перевірка налаштувальних коефіцієнтів щодо можливостей налаштування каналів управління та ін.

Для створення математичних моделей та моделювання використано обчислювальну систему MATLAB, а для нелінійних моделей — пакет Simulink, що дозволило врахувати люфт приводу, який є основним джерелом внутрішніх збурень системи управління.

Математична модель стабілізатора — це сукупність математичних моделей основних пристроїв, які входять до його складу [11—15]. Модель враховує динаміку процесів у пристроях та у часі. Фактично моделю-

лю [14, 15] є система диференціальних рівнянь, які забезпечують необхідну точність для вирішення поставленої задачі. Модель реалізовано за замкнутою схемою. Вихідні сигнали моделі двигуна [16—18], що передаються через редуктор блоку наведення, надходять на входи вимірювальних пристроїв — гіротахметра (абсолютна кутова швидкість, яка є сумою вихідної кутової швидкості та переносної кутової швидкості), тахогенератора (кутова швидкість блоку озброєння (БО)); датчика положення (кут БО). Вихідні сигнали на пульт подаються користувачем. До математичної моделі входить також датчик струму. Він є сукупністю коригуючих ланок, які покращують якість перехідного процесу сигналу, що передається [3, 19, 20].

Пульт управління призначено для формування керуючого впливу, що компенсує сигнал абсолютної кутової швидкості, яка надходить на гіротахметр [21, 22]. Вхідним сигналом для пульта управління є кут повороту, що задається оператором. До складу математичної моделі каналу керування входить і ланка, що виконує функції послаблення.

Залежність сигналу пульта управління від вхідного кута повороту має наступний вигляд:

$$U = f(\gamma) = U_0 \frac{1 - \cos\left(\frac{2a_0}{\varphi_0} i \gamma\right)}{(1 - \cos a_0)},$$

де U — вихідна напруга, що знімається з потенціометрів горизонтального або вертикального каналів; U_0 — напруга потенціометрів відносно середньої точки, $U_0 = \pm (15 \pm 1,5)$, В; γ — поточний кут повороту корпусу, що задається за допомогою ручок потенціометра, його максимальне номінальне значення становить 30,6 град; φ_0 — кут робочої зони 330 град; a_0 — аргумент тригонометричної функції, 41 град 15'; i — передатне відношення, $i = 5$. Максимальне значення вихідної напруги становить 12,96 В.

Роботу математичної моделі пульта керування відображено на рис. 1, де показано вплив сигналів синусоїдальної та ступінчастої форми.

Залежність вихідної напруги пульта від поточного кута повороту — характеристика пульта управління — наведено на рис. 2. Коефіцієнт ослаблення по каналу пульта управління, визначений за результатами випробувань, орієнтовно становить 0,15.

Гіртахметр призначено для вимірювань сигналу абсолютної кутової швидкості, яка є сумою вихідної кутової швидкості блоку БО та переносної кутової швидкості. До математичного опису каналу гіртахметра [2, 14] входять математичні моделі власне гіртахметра, демодулятора,

Рис. 1. Відпрацювання пультом управління впливу синусоїдальної (а) та ступінчатої (б) форми, що задається

ланки, що виконує функції ослаблення сигналу Г-подібного фільтра, що є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійною часу, розрахованою на основі параметрів електричної схеми системи стабілізації.

Рис. 2. Характеристика пульта управління

Управління рухом гіротахометра щодо вихідної координати α та вихідної напруги U має наступний вигляд [23]:

$$I_n \ddot{\alpha} + 2V \sqrt{I_n C_T} \dot{\alpha} + M_\alpha = M_\Gamma - \dot{M}'_\Gamma + M_{\text{тр}} + M_d - \omega_s I_n,$$

$$U = K_d \alpha + U_0,$$

де I_n — момент інерції підвісу, $3,376 \cdot 10^{-4}$ Нмс², кгм²; V — коефіцієнт демпфірування, $V = 0,25 \dots 0,7$; C_T — жорсткість торсіону, $C_T = 7,4 \dots 7,5$ Нм/рад; M_Γ — гіроскопічний момент, $M_\Gamma = S \omega_\xi \cos \alpha$; S — кінетичний момент при номінальній напрузі 36В та частоті 395Гц, $S = 0,359$ Нмс, кгм²/с; ω_ξ — вимірювана кутова швидкість; M'_Γ — гіроскопічний момент, обумовлений дією кутової швидкості, нормальної до вимірюваної, $M'_\Gamma = S \omega_\xi \cos \alpha$; $M_{\text{тр}}$ — момент тертя, що не перевищує $2 \cdot 10^{-6}$ Нм, $M_{\text{тр}} = -M_T \sin \dot{\alpha}$; M_d — момент дебалансу, $M_d = \zeta W$; $\xi \leq 2 \cdot 10^{-5}$ — зсув, обумовлений дебалансом, Нс²; W — лінійне прискорення, що викликає дебаланс, м/с; $\dot{\omega}_s$ — кутове прискорення щодо повздовжньої осі приладу, рад/с; K_d — вихідна характеристика індукційного датчика кута, $K_d = 3,9$ В/град; $U_0 < 70$ — нульовий сигнал датчика кута, мВ; M_α — момент, що враховує вплив гістерезису торсіону.

Рис. 3. Вихідний сигнал гіротахометра при впливі що задається ($\omega = 12,5$ град/с, $V = 0,5$): а — $V = 0,25$; б — $V = 0,7$

Особливістю моделі гіротахометра є врахування нелінійності гістерезисного типу, внесеної торсіюном. Розглянемо вираз для визначення моменту, що враховує вплив гістерезису торсіону. Позначимо кут α , при якому похідна $\dot{\alpha}$ змінює знак, символом α_0 . Можливі два варіанти:

1. Похідна $\dot{\alpha}$ стає менше нуля ($\dot{\alpha} \leq 0$), тобто кут α починає зменшуватися залежно від діапазону зміни кута α ; момент M_α визначається у такий спосіб [23]:

$$M_\alpha = C_T \alpha_0 \quad \text{при} \quad \alpha_0 - K_T \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0,$$

$$M_\alpha = C_T \alpha \quad \text{при} \quad \alpha < \alpha_0 (1 - K_T).$$

2. Похідна $\dot{\alpha}$ стає більше нуля ($\dot{\alpha} \geq 0$), тобто кут α починає збільшуватися залежно від діапазону зміни кута α ; момент M_α визначається у такий спосіб:

$$M_\alpha = C_T \alpha_0 \quad \text{при} \quad \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_0 + K_T \alpha_0,$$

$$M_\alpha = C_T \alpha \quad \text{при} \quad \alpha > \alpha_0 (1 + K_T).$$

Коефіцієнт K_T характеризує величину гістерезису. Його значення можуть коливатися в діапазоні $0,0015 \leq K_T \leq 0,0075$.

Вихідні напруги гіротахометра, отримані при однаковому постійному впливі, що задається, та при граничних значеннях коефіцієнта демпфірування V показано на рис. 3. Реакцію моделі гіротахометра на вплив, що постійно задається, без врахування гістерезису та з його врахуванням з параметром $K_T = 0,0075$, відображено відповідно на рис. 4, а та 4, б. При цьому частота коливань, обумовлених гістерезисом, становить 25 Гц. В моделі каналу гіротахометра враховується наявність порогового пристрою, що забезпечує обмеження рівня вихідного сигналу гіротахометра до 12 В, та напруга зсуву, яка підсумовується з вихідним сигналом гіротахометра.

Для максимального наближення до реальних схемо-технічних рішень у модель каналу гіротахометра включено модель однополуперіодного де-

Рис. 4. Вихідний сигнал гіротахометра без врахування (а) та з врахуванням (б) впливу гістерезису при $\omega = 12,5$ град/с, $V = 0,5$

Рис. 5. Блок-схема однополуперіодного демодулятора

модулятора, блок-схему якого подано на рис. 5, де $K_{дк}$ — крутість сигналу гіротахометра.

Результати роботи моделі демодулятора при постійному впливі, що задається, показано на рис. 6. Попереднє значення коефіцієнта ослаблення по каналу гіротахометра дорівнює 0,7 і буде уточнюватись на етапі ідентифікації моделі за результатами лабораторних випробувань.

В модель гіротахометра вводиться Г-подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійною часу. Її визначено за параметрами електричної схеми:

$$T = RC = 10^3 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6} = 0,00015 \text{ с.}$$

Рис. 6. Вихідний сигнал однополуперіодного демодулятора при постійному впливі, що задається $\omega = 5$ град/с

Рис. 7. Вихідний сигнал у ланці гіротахметра при постійному впливі, що задається $\omega = 5$ град/с, і однакових (а) та різних (б) постійних часу Γ -подібного фільтра

Особливостями Γ -подібного фільтра є формування передніх і задніх фронтів моделюючих коливань із різними постійними часу. Для переднього фронту постійна часу є розрахунковою, а для заднього фронту — розрахункове значення трохи збільшується для того, щоб забезпечити вповільнене зменшення амплітуди сформованого сигналу. Порівняльну характеристику моделюючих коливань при однакових і різних постійних часу показано на рис. 7.

Вихідні сигнали керуючих впливів, що сформовано у каналах пульта управління та гіротахметра, підсумовуються з коефіцієнтами відповідно 1 і 0,42 та надходять на інтегратор, постійна часу якого становить

$$T = R(C_1 + C_2 + C_3 + C_4) = 10 \cdot 10^3 \cdot 44 \cdot 10^{-6} = 0,44 \text{ с.}$$

Вихідний сигнал інтегратора після обмеження за рівнем 9 В надходить на вхід суматора для формування керуючого впливу. Вхідним сигналом для моделі датчика положення $U_{\text{д.п}}$ є кут $\varphi_{\text{БО}}$, який утворюється при поворотах БО, $U_{\text{д.п}} = \sin \varphi_{\text{БО}}$ ($U_{\text{д.п}} = 20 \text{ В}$). При проходженні по каналу сигнал послаблюється з коефіцієнтом послаблення 0,17 і надходить на Γ -подібний фільтр, який є аперіодичною ланкою з постійною часу:

$$T = RC = 10 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 0,01 \text{ с.}$$

Рис. 8. Вихідний сигнал двополуперіодного демодулятора при постійному впливі збудження $U = 1$ В, що задається

Вхідний сигнал каналу датчика положення надходить на суматор для формування керуючого впливу.

Суматор здійснює формування закону керування залежно від режиму роботи системи стабілізації. У загальному випадку керуючий вплив може формуватися за сигналом, що надходить від інтегратора, та сигналом, сформованим в ланцюзі каналу датчика струму. У деяких режимах замість сигналу інтегратора використовується сигнал датчика положення. Коефіцієнтами підсилення для визначених вище сигналів обираються задані у технічному завданні значення (відповідно 21,5; 11; 0,6 і 2,7). Остаточний добір коефіцієнтів підсилення є одним з основних завдань моделювання системи стабілізації.

Вихідний сигнал суматора обмежується рівнем 9 В, демодулюється (рис. 8) та надходить на підсилювач напруги, який є аперіодичною ланкою, з коефіцієнтом підсилення 27,6 В та постійною часу, розрахункове значення якої становить

$$T = RC = 2,2 \cdot 10^{-3} = 0,0022 \text{ с.}$$

Необхідно зазначити, що через відмінності лабораторних випробувань (за якими проводиться ідентифікація параметрів моделі) від реальних умов експлуатації постійною часу прийнято значення $T = 0,01 \text{ с.}$

Вихідний сигнал підсилювача напруги без врахування демодулятора відтворено на рис. 9, а, з врахуванням демодулятора — на рис. 9, б. Перед тим як потрапити на вхід моделі широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) з вихідним сигналом підсилювача напруги виконуються наступні операції:

інвертування (необхідність виконання цієї операції було встановлено при перевірці відповідності фазування моделі реальній системі стабілізації);
обмеження вихідної напруги за рівнем 6 В;

Рис. 9. Вихідний сигнал підсилювача без врахування (а) та з врахуванням (б) демодулятора при постійному впливі збудження $U = 0,1$ В, що задається

Рис. 10. Нелінійні ланки ланцюга підсилювача напруги

формування зони нечутливості вихідної напруги $0,1$ В;

обнулення вихідної напруги при досягненні певних значень кута, сформованого БО (характеристики зазначених нелінійностей наведено на рис. 10).

Широтно-імпульсний модулятор реалізує формування послідовності імпульсів, амплітуда й тривалість яких визначається співвідношенням

$$U_{\text{ШИМ}} = (27 - 1 - 0,04 \cdot |I|) \text{sign } U_{\text{вх}}, \quad t_{\text{ШИМ}} = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}} \tau,$$

де $U_{\text{вх}}$ — вхідна напруга; I — струм якоря двигуна; $U_{\text{оп}}$ — опорна напруга ШІМ, $U_{\text{оп}} = 6$ В; τ — тактова частота ШІМ, $\tau = 2,5$ мс.

При створенні моделі ШІМ враховувалося те, що розрахункова тривалість формованого імпульсу не може перевищувати його заданої тактової частоти. Результати роботи моделі ШІМ відтворено на рис. 11. Формування струму якоря двигуна описується формулою

$$I = \frac{U_{\text{ШИМ}} - C_e \dot{\phi}_{\text{дв}}}{R_{\text{об}}},$$

де $U_{\text{ШИМ}}$ — вихідна напруга ШІМ; C_e — постійна електрорушійна сила; $R_{\text{об}}$ — опір обмотки якоря; $\dot{\phi}_{\text{дв}}$ — кутова швидкість двигуна (сигнал, що забезпечує зворотний зв'язок).

Рис. 11. Вихідний сигнал ШІМ при постійному впливі напруги $U = 1,5 \text{ В}$, що задається

Отримане значення струму якоря двигуна надходить на ШІМ, а також на коригувальну ланку, яка є аперіодичною ланкою з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійною часу, що дорівнює $0,01 \text{ с}$. Відкоригований струм якоря двигуна надходить безпосередньо на модель двигуна, а також у канал датчика струму. Каналом датчика струму є послідовність наступних ланок:

ланки посилення ($K = 0,11$);

аперіодичної ланки з одиничним коефіцієнтом підсилення й постійною часу $T = 0,003$;

аперіодичної ланки з коефіцієнтом підсилення $K = 0,1$ та постійною часу $T = 0,001$;

форсуючої ланки з постійною часу $T = 0,02$;

нелінійної ланки, яка є обмеженням за рівнем 9 В .

Сформований вихідний сигнал струму надходить на суматор для формування сумарного керуючого впливу.

Висновки

Розроблені математичні моделі основних вузлів та блоків, що входять до складу АПКС, дозволяють підтвердити правильність прийнятих схемотехнічних рішень при його створенні, підтримувати коригування режимів його роботи та забезпечення параметрів.

Створені математичні моделі забезпечують моделювання всіх основних режимів роботи цифрових стабілізаторів.

Проведене моделювання та відповідне коригування параметрів АПКС свідчать про переваги перед відомими стабілізаторами. Точність вітчизняного стабілізатора у два рази вище, а вартість у $2,5$ рази менше внаслідок використання вузлів та компонентів вітчизняного виробництва [6, 24].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Елисеєв А.Д.* Исследование быстродействующего привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения со статическим преобразователем / А.Д. Елисеєв, Б.В. Новоселов // Оборонная техника, 2011, № 8, с. 24—29.
2. *Елисеєв А.Д.* Математическая модель статического преобразователя стабилизатора танкового вооружения как нелинейной импульсной системы / А.Д. Елисеєв, В.А. Шаталов // Вопросы оборонной техники. Серия IX, 2012, № 6 (258).
3. *Елисеєв А.Д.* Модернизация привода горизонтального наведения стабилизатора танкового вооружения. Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы III научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых. В трех частях. Часть 1. Ковров, 2008, с. 157—161.
4. *Веселов В.А.* Гироскопические измерительные приборы и устройства. / В.А. Веселов, Р.Н. Гробовой, О.С. Ипатов, В.Г. Кузнецов, В.И. Медведев / Учеб. пособие. Балтийский государственный технический университет, 2003, 122 с.
5. *Bezvesilna O.M.* Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers / Bezvesilna O.M., Petrenko O., Galycky V., Ilchenko M. // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2020, № 1/9 (103), с. 39—45.
6. *Безвесільна О.М., Квасніков В.П., Цірук В.Г., Чіковані В.В.* Системи наведення та стабілізації озброєння. Житомир: ЖДТУ, 2014, 176 с.
7. *Bezvesilna O.M.* Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Nowicki M., Szewczyk R. // Springer International Publishing Switzerland Journal. Challenges in Automation, Mobile Robotics and Measurement Techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, Vol. 10, pp. 753-755.
8. *Bezvesilna O.M.* Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system / Bezvesilna O.M., Korobiichuk I., Tkachuk A., Chilchenko T. // Systems, Control and Information Technology, Warsaw, POLAND, 20-21.05.16, 29 p.
9. *Безвесільна О.М.* Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance / Безвесільна О.М., Ткачук А.Г., Хильченко Т.В., Нечай С.О. // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2016, № 6/7 (84), с. 50—57.
10. *Bezvesilna O.M.* Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravimetric System with Any Type of Gravimeter / Bezvesilna O.M., A. Tkachuk, L. Chepyuk, S. Nechai, T. Khylychenco // Ibid, 2017, № 1/7 (85), с. 45—56.
11. *Терехин В.В.* Основы моделирования в MATLAB. Ч. 2. Simulink / Учеб. пособие. Новокузнецк: РИО НФИ Кем ГУ, 2004, 376 с.
12. *Васильев В.В.* Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK / В.В. Васильев, Л.А. Симак, А.М. Рыбникова / Учеб. пособие. Киев: НАУ, 2008, 91 с.
13. *Бусленко Н.Г.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978, с. 400.
14. *Советов Б.Я.* Моделирование систем. Учеб. для ВУЗов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. М.: Высшая школа, 2001, 343 с.
15. *Егоренко Д. Л.* Основы математического моделирования. Построение и анализ моделей с примерами на языке Matlab / Д. Л. Егоренко, А.Л. Фратков, В.Ю. Харламов. Под. ред. д-ра техн. наук А.Л. Фраткова / Учеб. пособие. спб: БГТУ, 1994.
16. *Кочергин В.В.* Следящие системы с двигателем постоянного тока. Л.: Энергоатомиздат, 1988, 168 с.
17. *Копылов И. П.* Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1994, 318 с.

18. Семенов А.С. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB / А.С. Семенов, В.М. Хубиева, М.Н. Петрова // *Фундаментальные исследования*, 2015, № 10(3), с. 523—528.
19. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. М.: Наука, 1975, 768 с.
20. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: Физматлит, 2005, 320 с.
21. Шарма Д.Н. Уравнения в частных производных для инженеров / Д.Н. Шарма, К. Синг. М.: Техносфера, 2002, 320 с.
22. Ханукаев Ю.И. О кватернионах. Конечные перемещения твердого тела и точки. *Электронный журнал «Исследовано в России»*, с. 338—346. [Электронный ресурс] <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/033.pdf>.
23. Мелешко В.В. Методические указания к домашним заданиям по курсу "Теория и расчет приборов и систем." Киев: НТУУ «КПИ», 2011, 81 с.
24. Безвесільна О.М., Гльченко М.В. Методи та засоби підвищення точнісних характеристик приладової системи вимірювання механічних параметрів та стабілізації. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. ДП «Редакція інформаційного бюлетеня». «Офіційний вісник Президента України», 2020, 208 с.

Отримано 19.04.21

REFERENCES

1. Eliseev, A.D. (2011), "Investigation of the high-speed drive of horizontal guidance of the stabilizer of tank armament with a static converter", *Oboronnaya tekhnika*, Vol. 8, pp. 24-29.
2. Eliseev, A.D. (2012), "Mathematical model of the static converter of the stabilizer of tank armament as a nonlinear pulse system", *Voprosy oboronnoy tekhniki. Series IX*, Vol. 6, no 258.
3. Eliseev, A.D. (2008), "Modernization of the drive of horizontal guidance of the stabilizer of tank armament", *Vooruzheniye. Tekhnologiya. Bezopasnost'. Upravleniye. Materialy III nauchno-tekhnicheskoy konferentsii aspirantov i molodykh uchenykh. V trekh chastyakh. Chast 1* [Weapons. Technology. Security. Management. Proceedings of the III scientific and technical conference of graduate students and young scientists. In three parts. Part 1], pp. 157–161.
4. Veselov, V.A. (2003), *Giroskopicheskiye izmeritelnyye pribory i ustroystva* [Gyroscopic measuring instruments and devices], Baltic State Technical University.
5. Bezvesilna, O.M. (2020), "Devising and Introducing a Procedure for Measuring a dynamic Stabilization error in Weapon stabilizers", *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, Vol. 1/9, no 103, pp. 39-45.
6. Bezvesilna, O.M., Kvasnikov, V.P., Tsiрук, V.G. and Chikovani, V.V. (2014), *Systemy navedennya ta stabilizatsiyi ozbroynennya* [Armament guidance and stabilization systems], ZHDTU, Zhytomyr, Ukraine.
7. Bezvesilna, O.M. (2016), "Piezoelectric Gravimeter of the Aviation Gravimetric System", *Springer International Publishing Switzerland Journal. Challenges in Automation, Mobile Robotics and Measurement Techniques. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 10, pp. 753-755.
8. Bezvesilna, O.M. "Two-channel MEMS gravimeter for the automated aircraft gravimetric system", *Systems, Control and Information Technology*, pp. 29.
9. Bezvesilna, O.M. (2016), "Simulation of influence of perturbation parameters of the new dual-channel capacitive MEMS gravimeter performance", *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, Vol. 6/7, no 84, pp. 50-57.

10. Bezvesilna, O.M. (2017), "Introducing The Principle of Constructing an Aviation Gravitometric System With Any Type of Gravimeter", *Skhidno-Yevropeys'kyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, №1/7, no 85, pp. 45-56.
11. Terekhin, V.V. (2004), *Osnovy modelirovaniya v MATLAB. Ch. 2. Simulink* [Fundamentals of modeling in MATLAB. Part 2. Simulink], RIO NFI Kem GU, Novokuznetsk, Russia.
12. Vasiliev, V.V. (2008), *Matematicheskoye i kompyuternoye modelirovaniye protsessov i sistem v srede MATLAB/SIMULINK* [Mathematical and computer modeling of processes and systems in the environment MATLAB / SIMULINK], National Aviation University, Kyiv, Ukraine.
13. Buslenko, N.G. (1978), *Modelirovaniye slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems], Nauka, Moscow, Russia.
14. Sovetov, B.Ya. (2001), *Modelirovaniye sistem. Uchebnik dlya VUZov* [Systems modeling. Textbook for universities], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
15. Egorenko, D.L. (1994), *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya. Postroyeniye i analiz modeley s primerami na yazyke Matlab* [Fundamentals of mathematical modeling Construction and analysis of models with examples in the Matlab language], BSTU, Saint Petersburg, Russia.
16. Kochergin, V.V. (1988), *Sledyashchiye sistemy s dvigatelem postoyannogo toka* [Tracking systems with DC motor], Energoatomizdat, Saint Petersburg, USSR.
17. Kopylov, I.P. (1994), *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
18. Semyonov, A.S. (2015), "Mathematical modeling of DC motor operation modes in MATLAB medium", *Fundamentalnyye issledovaniya*, Vol, 10, no 3, pp. 523-528.
19. Besekersky, V.A. (1975), *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems], Nauka, Moscow, Russia.
20. Samarskiy, A.A. (2005), *Matematicheskoye modelirovaniye: Idei. Metody. Primery* [Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples], Fizmatlit, Moscow, Russia.
21. Sharma, D.N. (2002), *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh dlya inzhenerov* [Equations in partial derivatives for engineers], Tekhnosfera, Moscow, Russia.
22. Hanukaev, Y.I. (2002), "About quaternions. Finite displacements of a rigid body and a point", *Electronic journal "Issledovano v Rossii"*, pp. 338–346, available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/033.pdf>.
23. Meleshko, V.V. (2011), *Metodicheskiye ukazaniya k domashnim zadaniyam po kursu "Teoriya i raschet priborov i sistem"* [Methodical instructions for homework on the course "Theory and calculation of devices and systems"], NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine.
24. Bezvesilna, O.M. and Ilchenko, M.V. (2020), *Metody ta zasoby pidvyshchennya tochnistnykh kharakterystyk pryladovoyi systemy vymiryuvannya mekhanichnykh parametriv ta stabilizatsiyi* [Methods and means of increasing the accuracy characteristics of the instrument system for measuring mechanical parameters and stabilization], KPI im. Ihorya Sikorskoho, Kyiv, Ukraine. Received 19.04.21.

Received 19.04.21

O.M. Bezvesilna, V.D. Samoylov, M.V. Ilchenko

MATHEMATICAL MODELS OF MAIN UNITS AND UNITS
OF AUTOMATED STABILIZATION INSTRUMENT COMPLEX

This work presents the developed mathematical models of the main components and units that are part of the stabilizer: control panel, gyrotachometer GT46, position sensor, control unit, etc. Mathematical models of the armament unit and turret with gearbox and motor are obtained. A mathematical model of analog and digital control path of the horizontal guidance channel is obtained; vertical guidance channel; results of mathematical modeling of control modes: for vertical channel, for horizontal channel. Mathematical models have been developed, which are used in modeling the stabilizer control modes, as well as in the study of changes in the circuit-technical solution of the weapon stabilizer in order to increase its accuracy. The reliability of the obtained results was confirmed by the results of experimental testing.

Key words: stabilization complex, mathematical model, control panel, gyrotachometer, position sensor, modulator.

БЕЗВЕСІЛЬНА Олена Миколаївна, д-р техн. наук, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». В 1972 р. закінчила Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — методи вимірювання механічних величин, гравіметричні системи.

САМОЙЛОВ Віктор Дмитрович, д-р техн. наук, професор, гол. наук. співробітник Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1960 р. закінчив Українську академію сільськогосподарських наук. Область наукових досліджень — комп'ютерні технології моделювання, тренажери, професійна діагностика в енергетиці.

ІЛЬЧЕНКО Микола Васильович, канд. техн. наук, нач. конструкторського технологічного управління Публічного акціонерного товариства «Науково-виробниче товариство «Київський завод автоматики». В 1972 р. закінчив Київський політехнічний інститут. Область наукових досліджень — методи та засоби вимірювання механічних величин.