

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

АЛЕКСАНДРОВА ТЕТЯНА ЄВГЕНІВНА



УДК 681.5.013:623.412.6(043.3)

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ВИСОКОТОЧНИХ
ЦИФРОВИХ СИСТЕМ НАВЕДЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ
ТАНКОВОГО ОЗБРОЄННЯ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного аналізу та управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Куценко Олександр Сергійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри системного аналізу
та управління

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Казак Василь Миколайович,
Національний авіаційний університет
МОН України, м. Київ, професор кафедри
автоматизації та енергоменеджменту

доктор технічних наук, професор
Кузнєцов Борис Іванович,
Інститут технічних проблем магнетизму
НАН України, м. Харків, завідувач відділу
проблем управління магнітним полем

доктор технічних наук, професор
Канюк Геннадій Іванович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
м. Харків, професор кафедри теплоенергетики
та енергозбереження

Захист відбудеться 9 липня 2015 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 5 червня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Северин В. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з визначальних факторів вогневої могутності сучасного танка є точність стабілізації вісі каналу стволу гармати відносно напрямку на ціль. В усіх вітчизняних танках застосовується незалежна система стабілізації, в якій точність стабілізації вісі каналу стволу відносно напрямку на ціль визначається як точністю стабілізації лінії прицілювання відносно напрямку на ціль, так і точністю стабілізації вісі каналу стволу відносно лінії прицілювання. Подібні системи є об'єктом досліджень фахівців у галузі автоматизації процесів керування.

В закордонних танках третього післявоєнного покоління «Челенджер МК2» (Велика Британія), М1А2 «Абрамс» (США), «Леопард-2А4» (ФРН) та «Леклерк» (Франція) стабілізатори основного озброєння містять в контурі керування бортові цифрові обчислювальні машини (БЦОМ). Використання в стабілізаторах танкової гармати цифрових електронних блоків вітчизняними танкобудівниками стане можливим за умов: наявності адекватних математичних моделей збуреного руху об'єктів стабілізації, які враховують всю складність динамічних процесів цих об'єктів та адекватних імітаційних моделей випадкових зовнішніх збурень, що діють на об'єкти стабілізації; розробки практично реалізуємих методів синтезу цифрових стабілізаторів для складних дискретно-континуальних об'єктів стабілізації та практично реалізуємих методів вибору адитивних критеріїв якості, що враховують всю багаточинність вимог до цифрових стабілізаторів складних технічних об'єктів.

Таким чином, проблема створення теоретичних основ структурно-параметричного синтезу процесів керування та практична реалізація систем наведення та стабілізації є актуальною та визначає напрям досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими роботами, планами, темами. У відповідності з «Державною програмою модернізації колісної та гусеничної броньованої техніки», розробленої Міністерством оборони України і Міністерством промислової політики України згідно Закону України «Про визнання бронетанкової галузі однією з пріоритетних у промисловості України та заходів щодо надання їй державної підтримки» № 2211-III від 11 січня 2001 р., в НТУ «ХПІ» виконано комплекс держбюджетних тем МОН України: «Розробка наукових основ, методів параметричного синтезу, алгоритмічних і програмних засобів систем керування і зв'язку колісних та гусеничних машин спеціального призначення» (№ ДР 0103U007474), «Розроблення систем автоматичної стабілізації підвищеної точності для транспортних засобів спеціального призначення» (№ ДР 0106U001519), «Розроблення інваріантних виконавчих механізмів для колісних та гусеничних машин і транспортних роботів» (№ ДР 0107U000601), «Розроблення адаптивних систем керування зі змінною структурою для багатоцільових гусеничних та колісних машин» (№ ДР 0107U0008172), «Розробка наукових основ і методів синтезу систем

наведення і стабілізації танкового озброєння» (№ ДР 0105U000003), «Синтез та розробка робастної системи наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин на базі безплатформених інерціальних систем» (№ ДР 0103U000016) та госпдоговір на тему між Львівським науково-дослідним радіотехнічним інститутом і НТУ «ХПІ» «Інформаційно-керуючі системи для колісних та гусеничних машин спеціального призначення», в яких здобувач був відповідальним виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка цифрових систем керування процесом наведення і стабілізації для основного і допоміжного озброєння сучасного танка, що дозволяє підвищити точність та завадозахищеність зазначених систем. Для досягнення наміченої мети поставлені наступні задачі:

- здійснити аналіз існуючих систем наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння сучасних танків;
- з урахуванням особливостей цифрових систем керування процесом стабілізації розробити структуру й визначити значення параметрів цифрового стабілізатора лазерного променя танкового прицілу-далекоміру;
- розробити адекватну математичну модель збуреного руху танкової гармати з електрогідравлічним підсилювачем в каналі вертикального наведення та здійснити ідентифікацію її невизначених параметрів шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними;
- розробити імітаційну модель зовнішніх збурень, що діють на танкову гармату при русі танка в різних дорожніх умовах з різними швидкостями;
- сформулювати вимоги до системи керування процесом наведення і стабілізації танкової гармати, формалізувати їх і подати у вигляді вимог мінімумів системи функціоналів;
- розробити методику параметричного синтезу автоматизованої системи наведення і стабілізації танкової гармати, що знаходиться під впливом випадкових зовнішніх збурень;
- вирішити задачу структурно-параметричного синтезу інваріантної системи наведення і стабілізації танкової гармати в каналі вертикального наведення;
- вирішити задачу структурно-параметричного синтезу робастної системи наведення і стабілізації танкової гармати з електрогідравлічним підсилювачем в умовах нестабільності значень окремих параметрів об'єкта стабілізації;
- дослідити можливість використання принципів автоматизованих систем керування зі змінною структурою при структурно-параметричному синтезі стабілізатора танкової гармати;
- дослідити можливість використання і вирішити задачу структурно-параметричного синтезу безплатформеної системи наведення і стабілізації танкової гармати;

– вирішити задачу структурно-параметричного синтезу автоматизованої цифрової системи керування процесом наведення танкового зенітного кулемету.

Об'єктом дослідження є процеси керування в автоматизованих цифрових системах наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння сучасного танка.

Предмет дослідження – автоматизовані цифрові системи наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння сучасного танка.

Методи досліджень. Методи теоретичної та аналітичної механіки, технічної гідравліки, електротехніки, електроніки використані при створенні математичних моделей збуреного руху об'єктів стабілізації; методи імітаційного моделювання, теорії ймовірностей і теорії випадкових функцій – при моделюванні випадкових зовнішніх збурень, що діють на об'єкти стабілізації; методи теорії автоматичного керування, сучасної теорії керування, теорії оптимізації, теорії стійкості руху, теорії систем зі змінною структурою – при розробці методики параметричного синтезу стабілізаторів складних технічних об'єктів; методи теорії інваріантності – при розробці інваріантного стабілізатора танкової гармати; методи теорії чутливості – при розробці робастних стабілізаторів танкової гармати; методи лінійної алгебри, теорії матриць, динаміки твердого тіла – при розробці безплатформених стабілізаторів танкової гармати; методи експериментальних досліджень, теорії ідентифікації, теорії нелінійного програмування – при ідентифікації математичних моделей збуреного руху об'єктів стабілізації.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

– розроблена структура і отримані чисельні значення параметрів цифрової системи керування процесом стабілізації поля зору прицілу танкової гармати, яка відрізняється від існуючих підвищеною заводо захищеністю завдяки послідовно-паралельному застосуванню цифрових низькочастотних фільтрів Баттерворта і Ланцоша;

– отримана математична модель збуреного руху танкової гармати з електрогідравлічним підсилювачем в каналі вертикального наведення, яка враховує пружні коливання ствола, що дозволяє підвищити якість процесу стабілізації;

– проведена ідентифікація математичної моделі збуреного руху танкової гармати шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних, отриманих за допомогою оригінальних дослідницьких стендів, в результаті чого показана адекватність побудованої моделі реальному об'єкту;

– проведена декомпозиція моделі збуреного руху танкової гармати в розумінні розділення «швидких» і «повільних» рухів, в результаті чого доведена достатність урахування лише перших двох тонів пружних коливань ствола танкової гармати, що значно спрощує процес побудови автоматизованої системи керування об'єктом стабілізації;

– у загальному вигляді розроблена імітаційна модель зовнішніх збурень діючих на танкову гармату при русі танка по пересіченій місцевості, яка враховує криволінійний рух танка і дискретні перешкоди, та реалізується накладанням нормального двовимірного марківського поля і поля дискретних перешкод, що дає більш точний стохастичний опис процесів стабілізації;

– вирішені задачі структурно-параметричного синтезу інваріантного стабілізатора, робастного стабілізатора і стабілізатора зі змінною структурою (СЗС) в каналі вертикального наведення танкової гармати з застосуванням єдиного підходу, що дозволяє обрати оптимальну схему використання різних принципів керування на окремих етапах процесу наведення і стабілізації.

Отримали подальший розвиток:

– методика параметричного синтезу стабілізаторів складних технічних об'єктів, яка містить формалізацію вимог до стабілізатора, формування адитивного оптимізуємого функціоналу, вибір вагових коефіцієнтів адитивного функціоналу і використовує сучасні програмні продукти;

– структурно-параметричний синтез безплатформеного цифрового стабілізатора танкової гармати, що дозволяє створити заводо захищену та економічну систему стабілізації;

– розв'язання задачі структурно-параметричного синтезу системи наведення танкового зенітного кулемету, що містить вибір чисельних значень параметрів широтно-імпульсного модулятора, а саме періоду формування керуючих імпульсів та їх скважності, і дозволяє підвищити точність наведення та зменшити енергетичні витрати.

Практичне значення одержаних результатів полягає у збільшенні заводо захищеності стабілізатора лазерного променя танкового прицілу-далекоміра за рахунок використання послідовно-паралельного з'єднання цифрових фільтрів Баттерворта і Ланцоша в електронному блоці стабілізатора. Запропоновано використання принципів побудови систем зі змінною структурою в процесі наведення танкової гармати, що надає системі наведення властивості інваріантності та робастності при роботі в ковзному режимі. Доведено, що точність стабілізації осі каналу ствола відносно напрямку на ціль при використанні лінійного інваріантного стабілізатора вище, ніж при використанні нелінійного стабілізатора змінної структури. Здійснено вибір величини періоду квантування цифрових стабілізаторів танкової гармати і цифрової системи наведення танкового зенітного кулемета, який забезпечує високу точність стабілізації.

Результати дисертаційної роботи знайшли впровадження в промислових підприємствах і організаціях, що займаються розробкою, створенням і модернізацією бронетанкової техніки і комплектуючих агрегатів, а саме: Харківському конструкторському бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова, Державному підприємстві «Завод імені Малишева» (м. Харків), Державному підприємстві «Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут», Нау-

ково-виробничому підприємстві «Хартрон-Аркос» (м. Харків), Державному підприємстві «Харківський бронетанковий завод». Також наукові та практичні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно: обґрунтування концепції переходу від силової стабілізації лінії прицілювання до індикаторної стабілізації на основі застосування цифрових стабілізаторів із цифровими низькочастотними фільтрами Баттерворта і Ланцоша; створення математичних та імітаційних моделей, що відтворюють динамічні процеси в замкнених системах наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння танків; розроблення методу параметричного синтезу складних динамічних систем, що знаходяться під впливом випадкових зовнішніх збурень, а також алгоритмічне і програмне забезпечення методу із застосуванням сучасних програмних продуктів; обґрунтування єдиності рішення задачі параметричного синтезу і методики вибору вагових коефіцієнтів адитивного критерію якості; розроблення конструкцій і вирішення задач параметричного синтезу інваріантного стабілізатора, робастного стабілізатора і стабілізатора зі змінною структурою, а також порівняльний аналіз перелічених типів стабілізаторів; обґрунтування доцільності побудови безплатформеного стабілізатора танкової гармати, що дозволяє відмовитися від використання висококоштовних і слабо захищених від завад гіроскопічних платформ; вирішення задач оптимізації системи наведення танкової зенітної установки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: XI, XVIII, XIX Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (Алушта, 2004; Одеса, 2011; Миколаївка, 2012); VI Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2004. Аерокосмічні системи моніторингу та керування» (Київ, 2004); IV, XI – XIV Міжнародних науково-технічних конференціях «Інтегровані технології та енергозбереження» (Алушта, 2004; Харків, 2011 – 2014); XVII – XX Міжнародних конференціях з автоматичного управління «Автоматика» (Харків, 2010; Львів, 2011; Київ, 2012; Миколаїв, 2013); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка і пневматика» (Мелітополь, 2010); XVI – XIX Міжнародних науково-технічних конференціях «Силова електроніка та енергоефективність» (Алушта, 2010 – 2013); IV і V Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (Львів, 2011, 2012); II Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобіль та електроніка» (Харків, 2011); XIV і XV Міжнародних конференціях з математичного моделювання «МКММ» (Херсон, 2013, 2014); 11 Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові «МСУІМЛ-11» (Львів, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Елек-

тронна техніка: проблеми і перспективи розвитку» (Харків, 2013); II Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST-2013» (Алушта, 2013); Міжнародній науково-методичній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології в науці і освіті» (Харків, 2013); I Науково-технічній конференції «Сергієвські читання», присвяченої 100-річчю від дня народження академіка В. Г. Сергієва (Харків, 2014).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 61 науковій публікації, з них: 40 статей у наукових фахових виданнях України, (15 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 2 – в іноземних періодичних фахових виданнях, 3 патенти України, 11 – у матеріалах науково-технічних конференцій, симпозіумів і семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 10 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 371 сторінку, включаючи 94 рисунка по тексту, 32 рисунка на 27 окремих сторінках, 9 таблиць по тексту, 363 найменування використаних джерел на 42 сторінках, 9 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, викладені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача в розробку теми дисертаційної роботи. Наведені дані про впровадження результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного стану електронних систем керування процесом наведення і стабілізації основного (танкова гармата) і допоміжного (спарений з гарматою кулемет і танковий зенітний кулемет) озброєння танка. Значний прогрес в розвиток танкових систем наведення і стабілізації досягнений завдяки дослідженням О. С. Белоновського, В. В. Корнеєва, К. О. Безенкіна, Р. І. Свердлова, І. Є. Лайхтмана, Г. А. Пейсаховича, В. К. Кутузова, Г. К. Сліпенко, В. М. Хромушкіна, О. К. Аблесімова, М. Д. Борисюка, Р. Х. Гафіятуліна, В. Л. Кодкіна, Г. Б. Бармасова, Б. І. Гінзбурга, М. З. Сомельсона, Б. О. Оліярника та інших фахівців. Аналіз патентної літератури довів, що в Україні системи наведення і стабілізації танкового озброєння створюють і вдосконалюють В. І. Гордієнко, О. Я. Хомченко, Л. Д. Ревякін, В. М. Замосенчук, Л. А. Фролов, О. П. Коростильов, Б. І. Доценко, О. М. Корольов, Л. О. Семенов, В. П. Кузьмін, В. М. Глущенко, В. П. Корсун, В. С. Медвідь, Ю. М. Бусяк, Л. К.-А. Магерамов, В. В. Заозерський, В. М. Мошнін, Е. В. Єрдаков, Є. О. Гутніченко та інші.

Аналіз науково-технічної літератури з розробки танкового озброєння дозволяє зробити висновок, що стабілізатори, які використовують аналогові електронні блоки, вичерпали свої можливості. Розвиток обчислювальної те-

хніки, сучасної теорії автоматичного керування та її елементної бази дозволило поставити проблему створення високоточної цифрової системи наведення і стабілізації танкового озброєння: основного озброєння – танкової гармати при стрільбі снарядами і керованими ракетами і допоміжного озброєння – спареного з гарматою кулемета, і танкового зенітного крупнокаліберного кулемета.

Одним з основних шляхів підвищення точності танкової гармати зі спареним кулеметом є покращення процесу стабілізації поля зору прицілу танкової гармати за допомогою цифрового стабілізатора індикаторного типу. Синтез високоточного стабілізатора танкової гармати передбачає розробку математичної моделі збуреного руху об'єкта стабілізації, що адекватно відтворює динамічні властивості об'єкта, а також адекватної імітаційної моделі зовнішніх збурень, які діють на об'єкт стабілізації. Розробка методики параметричного синтезу систем керування відповідно до заданих вимог дозволяє створити високоточний цифровий стабілізатор танкового озброєння. Для підвищення точності стабілізації осі каналу ствола танкової гармати відносно лінії прицілювання необхідно розглянути можливість надання цифровому стабілізатору властивостей інваріантності до дії зовнішніх збурень і робастності до випадкових змін параметрів об'єкта керування. Перспективною є побудова цифрових СЗС і безплатформених цифрових стабілізаторів.

Вирішення перерахованих завдань є можливим завдяки розвитку сучасної теорії керування, зокрема, теорії оптимального управління, теорії інваріантних і робастних систем керування, теорії систем зі змінною структурою та інших напрямків сучасної теорії керування.

У **другому розділі** доведено, що одним з найважливіших чинників підвищення точності стрільби є підвищення точності стабілізації лінії прицілювання відносно напрямку на ціль. Лінія прицілювання визначається лазерним променем танкового прицілу-далекоміру. Відносно лазерного променю стабілізується вісь каналу ствола танкової гармати, а також здійснюється наведення на ціль керованої ракети. В сучасних вітчизняних танках Т-46 Б «Булат» і Т-80 УД «Береза» лінія прицілювання стабілізується відносно напрямку на ціль шляхом механічного зв'язку головного дзеркала прицілу з гіроплатформою, вісі якої зберігають незмінний напрямок у просторі. Доведено, що високочастотні коливання рамок гіроплатформи, які виникають внаслідок «сухого» тертя у вісях гіроплатформи і релейної характеристики системи розвантаження, передаються на головне дзеркало прицілу, що приводить до зниження точності стабілізації лазерного променю відносно напрямку на ціль. Робиться висновок про необхідність переходу від силової стабілізації лінії прицілювання до індикаторної стабілізації з застосуванням цифрового стабілізатора лінії прицілювання.

На основі аналізу частотних характеристик цифрового стабілізатора лінії прицілювання доведена необхідність застосування в цифровому пропор-

ційно-диференціальному (ПД) стабілізаторі цифрових низькочастотних фільтрів. Проведений аналіз різних нерекурсивних і рекурсивних цифрових фільтрів та про доцільність використання в цифровому ПД-стабілізаторі лазерного променю танкового прицілу-далекоміру рекурсивних фільтрів Баттерворта і фільтрів Ланцоша другого порядку з дискретними передавальними функціями:

$$W_B(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_0 z^{-2}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}, \quad W_L(z) = c_0 + c_1 z^{-1} - c_1 z^{-3} - c_0 z^{-4}, \quad (1)$$

а також визначені значення параметрів фільтрів (1), які складають: $a_0 = 0,08073$, $a_1 = 0,16147$, $b_0 = 1,48256$, $b_1 = -1,83854$, $b_2 = 0,67789$, $c_0 = 5$, $c_1 = 2,5$.

Проведений порівняльний аналіз двох ПД-стабілізаторів з паралельним і послідовно-паралельним з'єднанням фільтрів Баттерворта і Ланцоша. В першому випадку передавальна функція стабілізатора має вигляд

$$W_C(z) = k_\phi W_B(z) + k_\phi W_L(z), \quad (2)$$

де k_ϕ і k_ϕ – варійовані коефіцієнти стабілізатора. У другому випадку

$$W_C(z) = k_\phi W_B(z)[1 + k_\phi W_L(z)]. \quad (3)$$

Порівняльний аналіз стабілізаторів (2) і (3) довів доцільність використання стабілізатора (3) з послідовно-паралельним з'єднанням фільтрів (1), в якому значно ефективніше здійснюється пригнічення високочастотних завад. Стабілізатор (3) захищений патентом на винахід.

Алгоритм, що реалізується цифровим стабілізатором (3), має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U[nT] = & k_\phi \{d_0 \phi[nT] + d_1 \phi[(n-1)T] + d_0 \phi[(n-2)T] + \\ & + k_\phi [f_0 \phi[nT] + f_1 \phi[(n-1)T] + f_2 \phi[(n-2)T] - f_2 \phi[(n-4)T] - \\ & - f_1 \phi[(n-5)T] - f_0 \phi[(n-6)T]\} - l_1 U[(n-1)T] - l_2 U[(n-2)T], \end{aligned} \quad (4)$$

де $U[nT]$ – цифровий сигнал керування, $\phi[nT]$ – кутова розбіжність між лазерним променем і напрямком на ціль.

Коефіцієнти алгоритму (4) визначаються формулами:

$$d_0 = \frac{a_0}{b_0}, \quad d_1 = \frac{a_1}{b_0}, \quad f_0 = c_0, \quad f_1 = \frac{b_0 c_1 + b_1 c_0}{b_0}, \quad f_2 = \frac{b_1 c_1 + b_2 c_0}{b_0}, \quad l_1 = \frac{b_1}{b_0}, \quad l_2 = \frac{b_2}{b_0}.$$

При використанні фільтрів Баттерворта і Ланцоша доцільно здійснювати побудову цифрового ПД-стабілізатора по послідовно-паралельною схемою, що забезпечує підвищення його фільтруючих властивостей.

Третій розділ присвячений розробці математичної моделі збуреного руху танкової гармати як об'єкта стабілізації. Модель побудована з застосуванням принципу Острогадського-Гамільтона та має вигляд:

$$I_{II} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} - \int_r^l m_1(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} dx = M_C(t) + M_B(t), \quad (5)$$

$$m_1(x) \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] + \\ + \zeta \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial x^2 \partial t} \right] = F(x,t); \quad (6)$$

де I_{II} – момент інерції танкової гармати відносно вісі цапф, $\varphi(t)$ – кут розбіжності між недеформованою віссю каналу стволу танкової гармати і лінією прицілювання, r – відстань від вісі цапф до місця з'єднання пружної частини стволу з казенною частиною гармати, l – відстань від вісі цапф до дульного зрізу, $m_1(x)$ – величина, пов'язана з погонною масою співвідношенням

$$m_1(x) = m(x)(x - r), \quad (7)$$

$y(x,t)$ – відхилення поточної точки деформованої вісі каналу стволу від умовно недеформованої вісі; $M_C(t)$ – стабілізуючий момент, $M_B(t)$ – збурюючий момент, $m(x)$ – погонна маса стволу, $EI(x)$ – згинна жорсткість стволу, $F(x,t)$ – розподілене зусилля, обумовлене вертикальними коливаннями підресореної частини корпусу танка

$$F(x,t) = m(x)[\ddot{z}_k(t) - g], \quad (8)$$

$z_k(t)$ – координата вертикальних коливань; ζ – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу стволу, g – прискорення сили тяжіння.

Доведено, що збурюючий момент $M_B(t)$ обумовлений тертям у вісі цапф танкової гармати і визначається формулами

$$\begin{cases} M_B(t) = m_c \operatorname{sign}[\dot{\phi}_\delta(t) - \dot{\phi}(t)] + \mu[\dot{\phi}_\delta(t) - \dot{\phi}(t)], \\ \dot{\phi}_\delta(t) = \dot{\phi}_k(t) \cos \alpha(t) + \dot{\vartheta}_k(t) \sin \alpha(t), \end{cases} \quad (9)$$

де m_c – момент «сухого» тертя у вісі цапф, $\dot{\phi}_\delta(t)$ – кутова швидкість подовжньо-кутових коливань башти, $\dot{\phi}_k(t)$ і $\dot{\vartheta}_k(t)$ – координати подовжньо-кутових і поперечно-кутових коливань підресореної частини корпусу танка; μ – коефіцієнт рідинного тертя, $\alpha(t)$ – кут повороту башти відносно власної подовжньої вісі підресореної частини корпусу.

Згідно з методом Фур'є для рівнянь (5), (6) покладемо

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i(x) T_i(t).$$

Тоді диференціальні рівняння (5), (6), з урахуванням крайових умов:

$$y(x,t)|_{x=r} = 0, \quad \left. \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right|_{x=r} = 0, \quad EI(x) \left. \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left[EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right] \right|_{x=l} = 0$$

та умов ортогональності власних форм пружних коливань стволу $\gamma_i(x)$, $i = \overline{1, n}$, записуються у вигляді еквівалентної системи звичайних диференціальних рівнянь $2(n+1)$ порядку:

$$\begin{cases} I_{II} \ddot{\phi}(t) - \sum_{i=1}^n a_i \ddot{T}_i(t) = M_C(t) + M_B(t), \\ a_i \ddot{\phi}(t) + c_i \ddot{T}_i(t) + \zeta b_i \dot{T}_i(t) + b_i T_i(t) = k_i [\ddot{z}_k(t) - g], \quad i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (10)$$

де n – число тонів пружних коливань стволу, що враховуються, а відповідні коефіцієнти системи (10) обчислюються за формулами:

$$a_i = \int_r^l m_1(x) \gamma_i(x) dx, \quad b_i = \int_r^l \frac{\partial^2}{\partial x^2} [I(x) \gamma_i''(x) \gamma_i(x)] dx, \quad c_i = \int_r^l m(x) \gamma_i^2(x) dx, \\ f_i(x) = \int_r^l F(x, t) \gamma_i(x) dx, \quad k_i = \int_r^l m(x) \gamma_i(x) dx, \quad i = \overline{1, n}.$$

Значення коефіцієнтів системи (10) приведені в таблиці 1.

Таблиця 1. – Коефіцієнти математичної моделі збуреного руху танкової гармати

№ тону	$a_i, \text{Н} \cdot \text{с}^2$	$b_i, \text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$	$c_i, \text{Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$	$k_i, \text{Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$
1	$9,721 \cdot 10^2$	$2,213 \cdot 10^5$	$2,152 \cdot 10^3$	$3,612 \cdot 10^2$
2	$7,999 \cdot 10^2$	$3,194 \cdot 10^6$	$1,941 \cdot 10^3$	$3,994 \cdot 10^2$
3	$6,340 \cdot 10^2$	$1,786 \cdot 10^7$	$2,144 \cdot 10^3$	$2,286 \cdot 10^2$

Математична модель збуреного руху об'єкта стабілізації (10) містить коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу стволу ζ , значення якого для різних сталей знаходиться в межах $\zeta = (0,002 \div 0,009)$ с. Для визначення цього коефіцієнта вирішувалася задача ідентифікації математичної моделі (5)-(10) шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних, отриманих за допомогою дослідницького стенду на базі танка Т-64Б «Булат». Для фіксації пружних коливань стволу танкової гармати використовуються тензорезистори.

Вихідні сигнали тензорезисторів подаються до входів підсилювача 8-АНЧ-7М, виходи якого електрично з'єднані зі входами світло променевого осцилографа К-20-22. Джерелом збудження дослідницького стенду є генератор коливань синусоїдальної форми ГЗ-16, з виходу якого сигнал синусоїдальної форми подається на обмотку керування електромагніту електрогідравлічного підсилювача стабілізатора. Таким чином, розроблений експерименталь-

ний стенд працює на нерухомому танку, а коливання підресореної частини корпусу імітуються синусоїдальними сигналами з виходу джерела збудження.

Аналіз осцилограм процесів, що реєструються за допомогою осцилографа для різних частот сигналу збудження, дозволяє визначити оцінку коефіцієнта $\zeta = 0,0082$ с.

Структурна схема електрогідравлічного підсилювача (ЕГП) каналу вертикального наведення танкової гармати приведена на рис. 1.

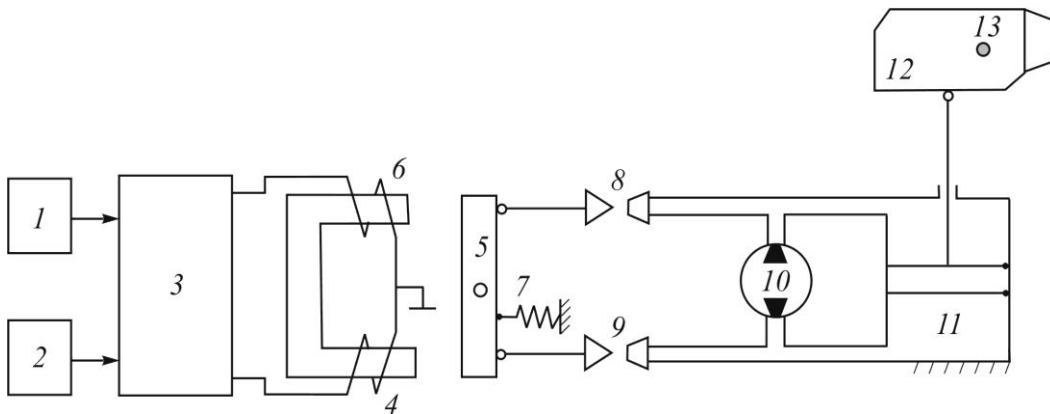


Рисунок 1. – Структурна схема електрогідравлічного підсилювача: 1 і 2 – гіроскопічні датчики, 3 – цифровий електронний блок, 4 – електромагніт, 5 – коромисло, 6 – керуюча обмотка електромагніту, 7 – фіксуюча пружина, 8 і 9 – голки, 10 – гідронасос, 11 – гідроциліндр, 12 – казенна частина гармати, 13 – вісь цапф

Математична модель збуреного руху ЕГП записується у вигляді

$$\begin{cases} L_y \frac{di_y(t)}{dt} + r_y i_y(t) = u(t), \\ I_K \ddot{\beta}(t) + f \dot{\beta}(t) + c \beta(t) = k_e i_y(t), \\ T_G \Delta \dot{p}(t) + \Delta p(t) = -k_D \beta(t), \end{cases} \quad (11)$$

де L_y – індуктивність обмотки керування, $i_y(t)$ – струм в обмотці керування, r_y – електричний опір керуючої обмотки електромагніту, $u(t)$ – вихідний сигнал цифрового електронного блоку, I_K – момент інерції коромисла, $\beta(t)$ – кут повороту коромисла, f – коефіцієнт рідинного тертя у вісі коромисла, c – коефіцієнт жорсткості фіксуючої пружини, k_e і k_D – коефіцієнти пропорційності, T_G – постійна часу гідравлічної частини ЕГП, $\Delta p(t)$ – різниця тисків у порожнинах гідроциліндра.

Для визначення величин I_K , f , c і T_G в роботі вирішена задача ідентифікації математичної моделі ЕГП (11) шляхом порівняння АЧХ розімкненого гідроприводу каналу вертикального наведення, а саме, розрахункової АЧХ $M_p(\omega)$, побудованої за допомогою математичної моделі (11), і експериментальної АЧХ $M_e(\omega)$, отриманої за допомогою дослідницького стенду, створеного на Машинобудівному заводі «ФЕД» (м. Харків).

Невідомі параметри ЕГП визначаються шляхом мінімізації функції

$$J = \sum_{i=1}^N [M_e(\omega_i) - M_p(\omega_i)]^2, \quad (12)$$

де N – число точок порівняння АЧХ. В результаті мінімізації функції (12) отримані невідомі параметри ЕГП, які складають: $I_K = 0,98 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с}^2$, $f = 0,55 \text{ Н} \cdot \text{ м} \cdot \text{ с}$, $c = 3,21 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{ м}$, $T_T = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Величини постійних часу T_T і $T_y = L_y / r_y$ досить малі, тому математичну модель (11) доцільно подати у вигляді

$$I_K \ddot{\beta}(t) + f \dot{\beta}(t) + c \beta(t) = \frac{k_e}{r_y} u(t). \quad (13)$$

Тоді математична модель замкненої системи наведення і стабілізації записується у вигляді системи (14):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{II} \ddot{\phi}(t) - \sum_{i=1}^n a_i \ddot{T}_i(t) = -k_M k_D \beta(t) + M_B(t); \\ a_i \ddot{\phi}(t) + c_i \dot{T}_i(t) + \zeta b_i \dot{T}_i(t) + b_i T_i(t) = k_i [\ddot{z}_k(t) - g], \quad i = \overline{1, n}; \\ I_K \ddot{\beta}(t) + f \dot{\beta}(t) + c \beta(t) = \frac{k_e}{r_y} u(t); \\ u(t) = \begin{cases} u[nT], & nT \leq t < (n+1)T; \\ u[(n+1)T], & (n+1)T \leq t < (n+2)T; \end{cases} \\ u[nT] = \begin{cases} \sigma_\phi[nT], & u^* \leq |\sigma_\phi[nT]| \leq u^{**}; \\ u^* \text{ sign } \sigma_\phi[nT], & |\sigma_\phi[nT]| < u^*; \\ u^{**} \text{ sign } \sigma_\phi[nT], & |\sigma_\phi[nT]| > u^{**}; \end{cases} \\ \sigma_\phi[nT] = F \{ \tilde{u}_\phi[nT], \tilde{u}_\omega[nT] \}; \\ \tilde{u}_\phi[nT] = a_1 k_{BT} \{ \phi[nT] + 2\phi[(n-1)T] + \phi[(n-2)T] \} - \\ - d_1 \tilde{u}_\phi[(n-1)T] - d_2 \tilde{u}_\phi[(n-2)T]; \\ \tilde{u}_\omega[nT] = a_1 k_c k_{BT} \{ \omega_\phi[nT] + 2\omega_\phi[(n-1)T] + \omega_\phi[(n-2)T] \} - \\ - d_1 \tilde{u}_\omega[(n-1)T] - d_2 \tilde{u}_\omega[(n-2)T]. \end{array} \right. \quad (14)$$

де T – період квантування сигналів у цифровому електронному блоці; $u[nT]$ – решітчаста функція керування, що формується цифровим електронним блоком; $\sigma_\phi[nT]$ – алгоритм керування; u^* і u^{**} – мінімальне та максимальне обмеження вихідного сигналу цифрового електронного блоку; $\phi[nT]$ – решітчаста функція, що відповідає випростаному вихідному сигналу обертового

трансформатору гіроскопічного датчика кута; $\omega_\varphi[nT]$ – решітчаста функція, що відповідає випростаному вихідному сигналові обертового трансформатору гіроскопічного датчика кутової швидкості; $\tilde{u}_\varphi[nT]$, $\tilde{u}_\omega[nT]$ – відфільтровані фільтрами Баттерворта решітчасті функції $\varphi[nT]$ і $\omega_\varphi[nT]$; a_1 , d_1 , d_2 – параметри фільтра Баттерворта.

При застосуванні штатного ПД-стабілізатора танкової гармати алгоритм наведення і стабілізації формується у вигляді

$$\sigma_\varphi[nT] = k_\varphi \tilde{u}_\varphi[nT] + k_{\dot{\varphi}} \tilde{u}_\omega[nT], \quad (15)$$

де k_φ і $k_{\dot{\varphi}}$ – варійовані константи.

Декомпозиція математичної моделі замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати дозволило істотно спростити модель. Зроблено висновок про необхідність використання в електронному блоці цифрового стабілізатора танкової гармати цифрових низькочастотних фільтрів Баттерворта.

У **четвертому розділі** роботи вирішується задача імітаційного моделювання випадкових зовнішніх збурень, що діють на танкову гармату в процесі криволінійного руху танка по пересіченій місцевості. При цьому підресорена частина корпусу здійснює випадкові вимушені коливання: вертикальні коливання, що характеризуються узагальненою координатою $z_k(t)$ і узагальненою швидкістю $\dot{z}_k(t)$, подовжньо-кутові коливання $\varphi_k(t)$ і $\dot{\varphi}_k(t)$, а також поперечно-кутові коливання з узагальненою координатою $\vartheta_k(t)$ і швидкістю $\dot{\vartheta}_k(t)$.

Доведено, що випадкове нормальне марківське двомірне поле (НМД-поле) $H(x, y)$ в прямокутнику $\{x \in [0, a], y \in [0, b]\}$ визначається рівнянням Ланжевена

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2\beta_x \frac{\partial}{\partial x} + \Omega_x^2 \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2\beta_y \frac{\partial}{\partial y} + \Omega_y^2 \right) h(x, y) = \sigma u(x, y), \quad (16)$$

яке у кожній фіксованій точці (x^*, y^*) визначає висоту нерівності $h(x^*, y^*)$, а $u(x, y)$ – гаусівський двомірний «білий шум» одиничної інтенсивності.

Якщо стохастичні властивості НМД-поля у напрямках Ox і Oy однакові, то $\beta_x = \beta_y = \beta$, $\Omega_x = \Omega_y = \Omega$. Для різних типів ґрунтів значення констант рівняння (16) наведені в таблиці 2.

Під пересіченою місцевістю будемо розуміти випадкову поверхню, яка має властивості ґрунтової дороги з випадково розміщеними на ній дискретними перешкодами у вигляді ям, воронок, надовбів, повалених дерев тощо. Запропонована методика побудови двомірного поля дискретних перешкод (ДП-поля) $S(x, y)$.

Таблиця 2. – Константи рівняння Ланжевена для різних типів ґрунтів

Тип ґрунту	$\beta, \text{м}^{-1}$	$\Omega, \text{м}^{-1}$	$\sigma, \text{м}$
асфальтобетон	0,191	0,444	0,012
мостова	0,105	0,669	0,024
ґрунтова дорога	0,337	1,065	0,105

Тоді пересічена місцевість імітується накладенням НМД-поля, що відповідає ґрунтовій дорозі, і ДП-поля. В результаті накладення цих полів виникає поле пересіченої місцевості (ПМ-поле) $R(x, y)$, причому

$$R(x, y) = H(x, y) + S(x, y).$$

З першого рівняння математичної моделі замкненої системи (14) виділяється сумарне навантаження, що діє на танкову гармату при русі танка по випадковій поверхні

$$M_f(t) = M_B(t) + \sum_{i=1}^n a_i \ddot{T}_i(t), \quad (17)$$

На рис. 2 приведені гістограми випадкової функції (17) при русі танка по середньо пересіченій місцевості з різними швидкостями по кожному з тонів пружних коливань стволу. Аналіз цих гістограм свідчить, що основний внесок у формування збурюючого моменту (17) вносить перший тон пружних коливань стволу (до $250 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і до $100 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). Величина збурюючого моменту від другого тону при русі по середньо пересіченій місцевості не перевищує $50 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і $30 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Збурюючий момент від третього тону пружних коливань стволу не перевищує $1 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і $0,6 \text{Н} \cdot \text{м}$ при $V = 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким чином, стохастичний аналіз зовнішніх збурень довів, що найбільш інтенсивні збурення виникають при русі танка з швидкістю $(4 \div 6) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, що відповідає резонансним коливанням підресореної частини корпусу. Зовнішні збурення від пружних коливань стволу визначаються першими двома тонами пружних коливань, які необхідно враховувати при імітаційному моделюванні випадкових зовнішніх збурень.

П'ятий розділ присвячений розробці методики параметричного синтезу динамічної системи

$$\dot{X}(t) = \Phi[X(t), \alpha] + F(t), \quad (18)$$

де $X(t)$ – n -вимірний вектор стану динамічної системи, α – s -вимірний вектор варійованих параметрів системи, $F(t)$ – m -вимірний вектор випадкових зовнішніх збурень. Задача параметричного синтезу системи (18) складається з вибору вектору варійованих параметрів $\alpha \in G_\alpha$, який на рішеннях системи (18) надає мінімум інтегральному квадратичному функціоналу

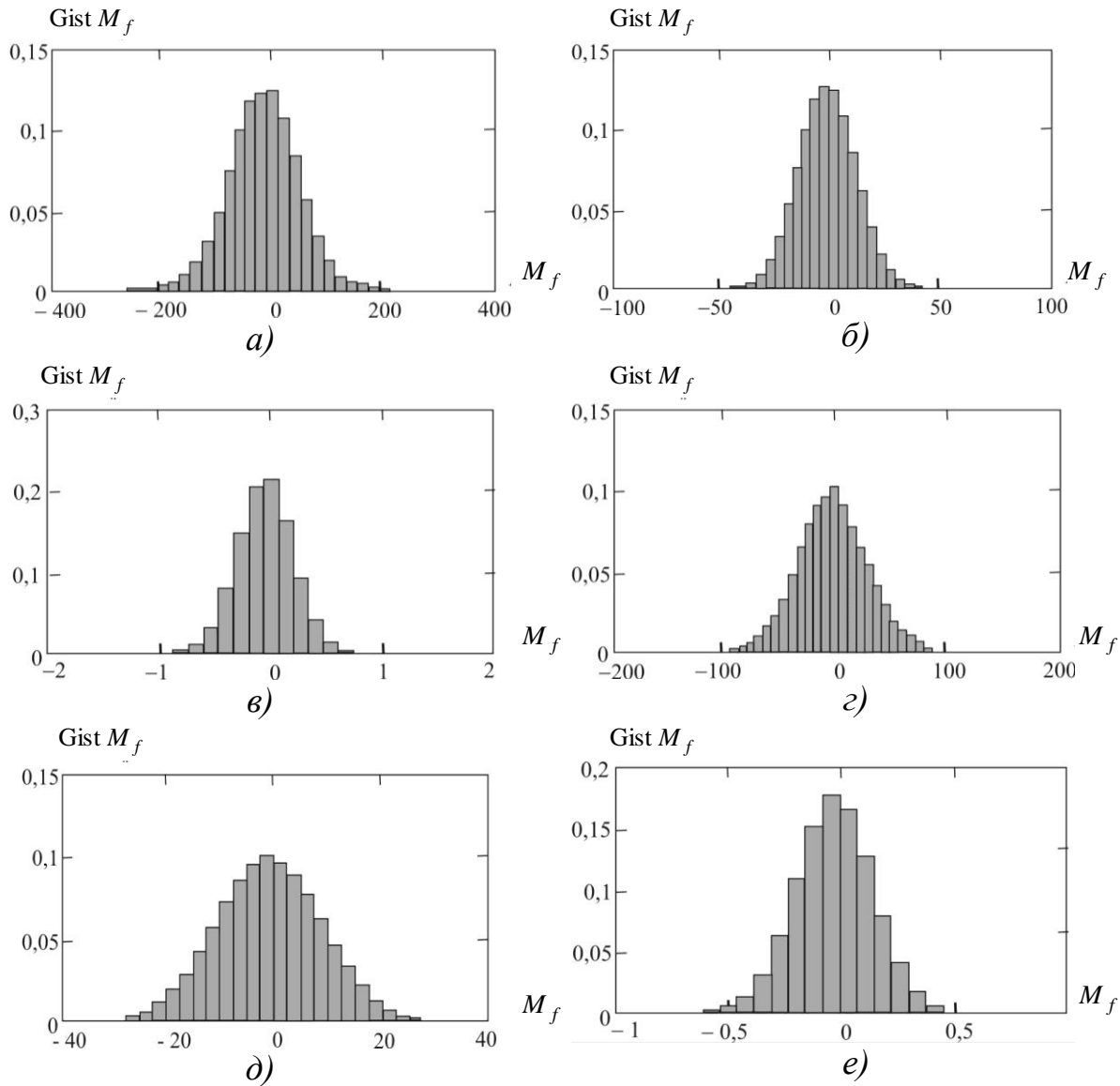


Рисунок 2. – Гістограми реалізації випадкової функції $M_f(t)$:
 а) перший тон, $V = 5$ м/с ; б) другий тон, $V = 5$ м/с ; в) третій тон, $V = 5$ м/с ;
 г) перший тон, $V = 10$ м/с ; д) другий тон, $V = 10$ м/с ;
 е) третій тон, $V = 10$ м/с

$$I(\alpha) = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T \langle X^j(t, \alpha), QX^j(t, \alpha) \rangle dt \right\}, \quad (19)$$

де $\underset{(j=1, N)}{M} \{ \bullet \}$ – символ математичного очікування величини $\{ \bullet \}$, обчисленої по реалізаціям випадкового процесу $X^j(t, \alpha)$, $j = \overline{1, N}$, Q – квадратна сільвестрова матриця.

До системи (18) n -го порядку додамо ще одне рівняння

$$\dot{x}_{n+1}^j(t, \alpha) = \langle X^j(t, \alpha), QX^j(t, \alpha) \rangle; \quad j = \overline{1, N}. \quad (20)$$

До входу системи (18), (20) подається j -та реалізація випадкового процесу $F^j(t)$ і знаходиться рішення $X^j(t, \alpha)$, $x_{n+1}^j(t, \alpha)$. Для N реалізацій випадкового процесу $F^j(t)$, $j = \overline{1, N}$ знаходимо N реалізацій випадкової функції $x_{n+1}^j(t, \alpha)$, $j = \overline{1, N}$. Із співвідношень (19), (20) отримуємо оцінку функціонала (19)

$$\hat{I}(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{n+1}^j(T, \alpha). \quad (21)$$

Рекомендується в якості множини G_α використовувати область стійкості системи (18) в просторі варійованих параметрів α_i , $i = \overline{1, s}$. Доведено, що в множині G_α функціонал (19) має єдиний глобальний мінімум.

Матриця Q зазвичай обирається у вигляді діагональної матриці з діагональними елементами $\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2$. Тоді функціонал (19) приводиться до вигляду

$$I(\alpha) = \underset{(j=\overline{1, N})}{M} \left\{ \int_0^T (\beta_1^2 [x_1^j(t, \alpha)]^2 + \beta_2^2 [x_2^j(t, \alpha)]^2 + \dots + \beta_n^2 [x_n^j(t, \alpha)]^2) dt \right\}. \quad (22)$$

Розроблена методика вибору вагових коефіцієнтів $\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2$ адитивного функціоналу (22). Згідно цієї методики вагові коефіцієнти розраховуються за формулами:

$$\beta_i = \frac{x_{i \max}}{I_i^* \sum_{j=1}^n \frac{x_{j \max}^2}{I_j^*}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (23)$$

де $x_{i \max}$, $i = \overline{1, n}$ – максимально можливі значення компонентів вектору стану об'єкта $X(t)$; I_i^* , $i = \overline{1, n}$ – мінімальні значення часткових функціоналів:

$$I_i(\alpha) = \underset{(j=\overline{1, N})}{M} \left\{ \int_0^T [x_i^j(t, \alpha)]^2 dt \right\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (24)$$

які отримані шляхом рішення задачі параметричного синтезу для кожного окремого часткового функціоналу (24).

Запропоновано алгоритм рішення задачі параметричного синтезу системи наведення та стабілізації танкової гармати і розроблено його програмне забезпечення. Структурна схема алгоритму надана на рис. 3.

Алгоритм представляє собою сукупність чотирьох послідовних обчислювальних блоків. Блок А1 є генератором НМД-поля $H(x, y)$. До входу блока А1 поступає інформація про тип ґрунту, а також реалізація одиничного дво-мірного «білого шуму» $u^j(x, t)$, $j = \overline{1, N}$.

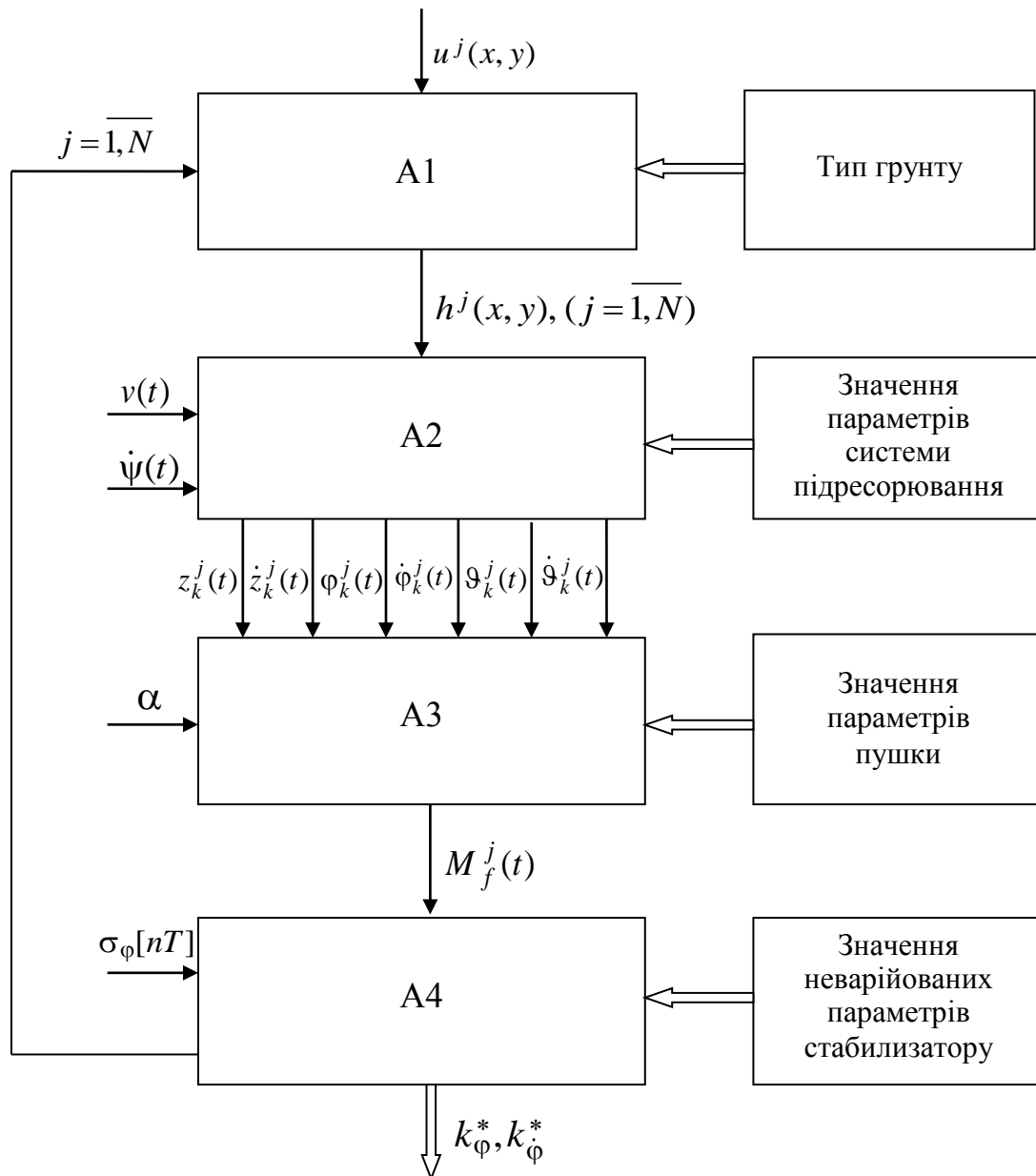


Рисунок 3. – Структурно-логічна схема алгоритму параметричного синтезу

На виході блоку A1 мають місце реалізації $h^j(x, y)$, $j = \overline{1, N}$ НМД-поля $H(x, y)$. За необхідністю на двомірне поле $H(x, y)$ накладається двомірне дискретне поле $S(x, y)$ для отримання поля пересіченої місцевості $R(x, y)$. Блок A2 реалізує математичну модель вимушених коливань підресореної частини корпусу танка при його русі по випадковій поверхні $H(x, y)$. До входу блоку A2 подається реалізація функції $h^j(x, y)$, $j = \overline{1, N}$, а також інформація про поточні параметри руху танка, а саме, швидкості руху $v(t)$ та кутової швидкості повороту корпусу $\dot{\psi}(t)$. На виході блоку A2 мають місце конкретні реалізації випадкових функцій $z_k^j(t)$, $\phi_k^j(t)$, $\vartheta_k^j(t)$ та їх похідних, які є розв'язками системи диференціальних рівнянь вимушених коливань пі-

дресореної частини корпусу танка. Ці реалізації подаються до входу блоку А3, що реалізує алгоритм обчислення збурюючого моменту $M_f^j(t)$, $j = \overline{1, N}$ у відповідності з формулами (9) і (17). З виходу блоку А3 реалізації $M_f^j(t)$, $j = \overline{1, N}$ подаються до входу блоку А4, що реалізує математичну модель збуреного руху замкненої системи (14), (15), а також процедуру Minimize програмного пакету MathCAD, або процедуру Optimization Toolbox програмного пакету MATLAB по відношенню до часткових функціоналів:

$$I_1(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T [\varphi^j(t)]^2 dt \right\}, \quad I_2(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T [\dot{\varphi}^j(t)]^2 dt \right\},$$

а потім, після обчислювання вагових коефіцієнтів:

$$\beta_1 = \frac{\Phi_{\max}}{I_1^* \left(\frac{\Phi_{\max}^2}{I_1^*} + \frac{\dot{\Phi}_{\max}^2}{I_2^*} \right)}, \quad \beta_2 = \frac{\dot{\Phi}_{\max}}{I_1^* \left(\frac{\Phi_{\max}^2}{I_1^*} + \frac{\dot{\Phi}_{\max}^2}{I_2^*} \right)}$$

і до адитивного функціоналу

$$I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T \left(\beta_1^2 [\varphi^j(t)]^2 + \beta_2^2 [\dot{\varphi}^j(t)]^2 \right) dt \right\}. \quad (25)$$

Значення параметрів математичної моделі (14), (15) дорівнюють: $I_{II} = 736,9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $k_M = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1}$, $k_\delta = 1,238 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $I_K = 0,98 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $f = 0,55 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$, $c = 3,21 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$, $k_e = 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$, $r_y = 30 \text{ Ом}$, $U^* = 0,01 \text{ В}$, $U^{**} = 10 \text{ В}$, $k_{BT} = 1$, $k_c = 0,2 \text{ с}$, $a_1 = 0,05445$, $d_1 = -1,24011$, $d_2 = 0,45792$. Застосування наведеного алгоритму до замкненої системи (14), (15) приводить до висновку про те, що оптимальні значення варійованих параметрів k_φ^* і $k_{\dot{\varphi}}^*$ лінійного алгоритму керування (15) практично не змінюються при русі танка по різним ґрунтам і з різними швидкостями та складають $k_\varphi^* = 249 \text{ В}$ і $k_{\dot{\varphi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Процеси наведення і стабілізації в замкненій системі (14), (15) приведені на рис. 4. Час наведення при $\varphi(0) = 0,5 \text{ рад}$ не перевищує 1с, максимальне значення кутової швидкості в процесі наведення досягає $\dot{\varphi}_{\max} = 2,3 \text{ с}^{-1}$, а значення адитивного функціоналу (29) при $\beta_1 = 0,33$ і $\beta_2 = 0,83533$ становить $I^* = 0,6475 \text{ с}$ при русі танка по асфальтобетону. Порівняння процесів, що приведені на рис. 4, приводить до висновку, що при значеннях періоду квантування $T \leq 0,01 \text{ с}$ процеси майже не відрізняються один від одного, а при $T > 0,01 \text{ с}$ якість процесів суттєво знижується.

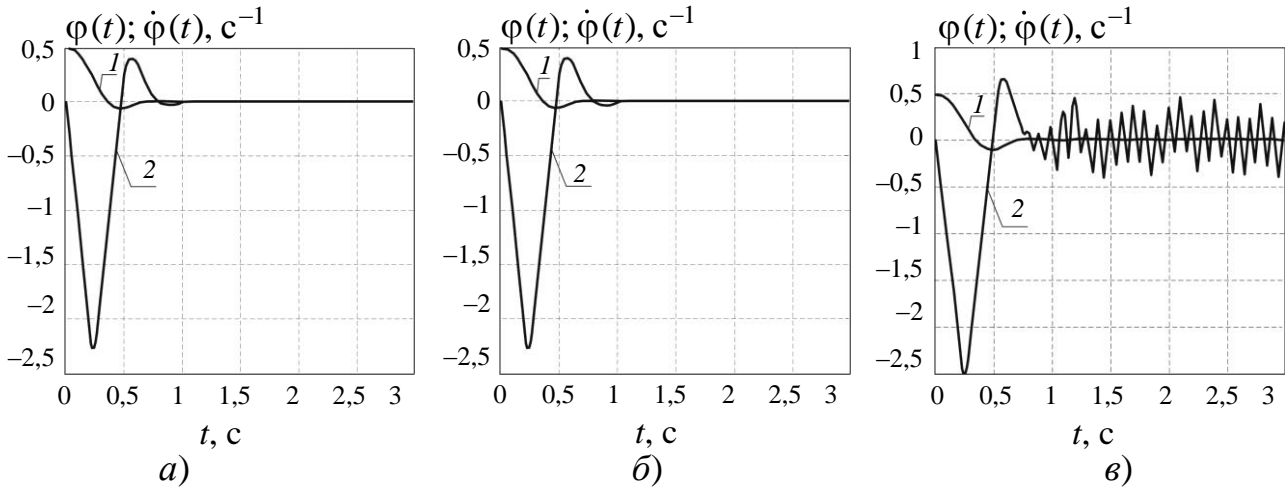


Рисунок 4. – Графіки наведення і стабілізації у замкнутій системі:
 а) $T = 0,005 \text{ c}$, б) $T = 0,01 \text{ c}$, в) $T = 0,05 \text{ c}$, 1 – $\varphi(t)$, 2 – $\dot{\varphi}(t)$.

У шостому розділі розглядається можливість застосування інваріантної системи наведення і стабілізації танкової гармати. Запропонована конструкція інваріантної системи, яка захищена патентом на винахід і містить датчики тиску робочої рідини у порожнинах виконавчого гідроциліндру, вихідні сигнали яких подані до входів цифрового електронного блоку. При цьому алгоритм наведення і стабілізації формується електронним блоком у вигляді:

$$\sigma[nT] = k_{\varphi} \tilde{u}_{\varphi}[nT] + k_{\dot{\varphi}} \tilde{u}_{\dot{\varphi}}[nT] + k_p \{ \tilde{p}_1[nT] - \tilde{p}_2[nT] \}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_1[nT] = a_1 \{ p_1[nT] + 2p_1[(n-1)T] + p_1[(n-2)T] \} - \\ - d_1 \tilde{p}_1[(n-1)T] - d_2 \tilde{p}_1[(n-2)T], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_2[nT] = a_1 \{ p_2[nT] + 2p_2[(n-1)T] + p_2[(n-2)T] \} - \\ - d_1 \tilde{p}_2[(n-1)T] - d_2 \tilde{p}_2[(n-2)T], \end{aligned} \quad (28)$$

де k_p – варійований параметр алгоритму; $p_1[nT]$ і $p_2[nT]$ – решітчасті функції, які відповідають вихідним сигналам датчиків тиску; $\tilde{p}_1[nT]$ і $\tilde{p}_2[nT]$ – вихідні сигнали фільтрів Баттерворта.

Доведено, що внаслідок високочастотних коливань запобіжного клапану гідросистеми каналу вертикального наведення виникають високочастотні коливання тиску робочої рідини в порожнинах виконавчого гідроциліндру, тому в системі доцільно застосувати низькочастотні фільтри Баттерворта, що реалізуються в цифровому електронному блоці за допомогою алгоритмів (27), (28).

Математична модель збуреного руху безперервної частини стабілізованого об'єкта має вигляд:

$$\begin{cases} I_{II} \ddot{\phi}(t) = k_M \Delta p(t) + M_f(t), \\ I_K \Delta \ddot{p}(t) + f \Delta \dot{p}(t) + c \Delta p(t) = -\frac{k_D k_e}{r_y} u(t). \end{cases} \quad (29)$$

Максимальні значення змінних $\phi(t)$ і $\dot{\phi}(t)$ становлять $\phi_{\max} = 1$ рад, $\dot{\phi}_{\max} = 2,5 \text{ с}^{-1}$. В той же час максимальне значення змінної $\Delta p(t)$, яка є різницею тисків робочої рідини в порожнинах виконавчого гідроциліндру, становить $\Delta p_{\max} = 9 \cdot 10^6$ Па. Велика різниця між максимальними значеннями змінних динамічної системи (29) приводить до ускладнень у використанні алгоритму параметричного синтезу системи наведення і стабілізації внаслідок поганої обумовленості матриць, що використовуються алгоритмом параметричного синтезу. Тому пропонується підхід, заснований на окремому визначенні варійованого параметру k_p і варійованих параметрів k_ϕ і $k_{\dot{\phi}}$, який полягає в наступному. Нехай безперервний закон стабілізації об'єкта (29) має вигляд

$$u(t) = k_\phi \phi(t) + k_{\dot{\phi}} \dot{\phi}(t) + k_p \Delta p(t). \quad (30)$$

Тоді передавальна функція розімкненої системи (29), (30) за зовнішнім збуренням $M_f(t)$ дорівнює

$$W_p(s) = \frac{k_y k_\Pi (k_\phi + k_{\dot{\phi}} s)}{s^2 (T_1^2 s^2 + T_2 s + 1 + k_p k_y)}, \quad (31)$$

де $k_\Pi = k_M / I_\Pi$, $k_y = -k_D k_C / c r_0$, $T_1^2 = I_k / c$, $T_2 = f / c$.

Аналіз функції (31) свідчить, що розімкнена система є системою з астатизмом другого порядку, отже замкнена система має властивість інваріантності другого порядку. Порядок інваріантності системи може бути підвищений, якщо покласти

$$1 + k_p k_y = 0. \quad (32)$$

У цьому випадку передавальна функція (31) прийме вигляд

$$W_p(s) = \frac{k_y k_\Pi (k_\phi + k_{\dot{\phi}} s)}{s^3 (T_1^2 s + T_2)},$$

тобто при виконанні умови (32) система набуває властивість інваріантності третього порядку. При цьому значення варійованого параметру k_p складає

$$k_p = -\frac{1}{k_y}. \quad (33)$$

Для значення параметру k_p , обчисленому за формулою (33), знаходяться такі значення параметрів k_ϕ і $k_{\dot{\phi}}$, які додають мінімум функціоналу (25) на рішеннях замкненої системи (14), (26), (27), (28).

На рис. 5 приведені процеси наведення і стабілізації в замкненій системі при відпрацюванні зовнішнього збурення

$$M_\Pi(t) = \begin{cases} 200t, & 0 \leq t < 1; \\ 200, & 1 \leq t < 3; \\ 200(4-t), & 3 \leq t < 4; \\ 0, & t \geq 4. \end{cases}$$

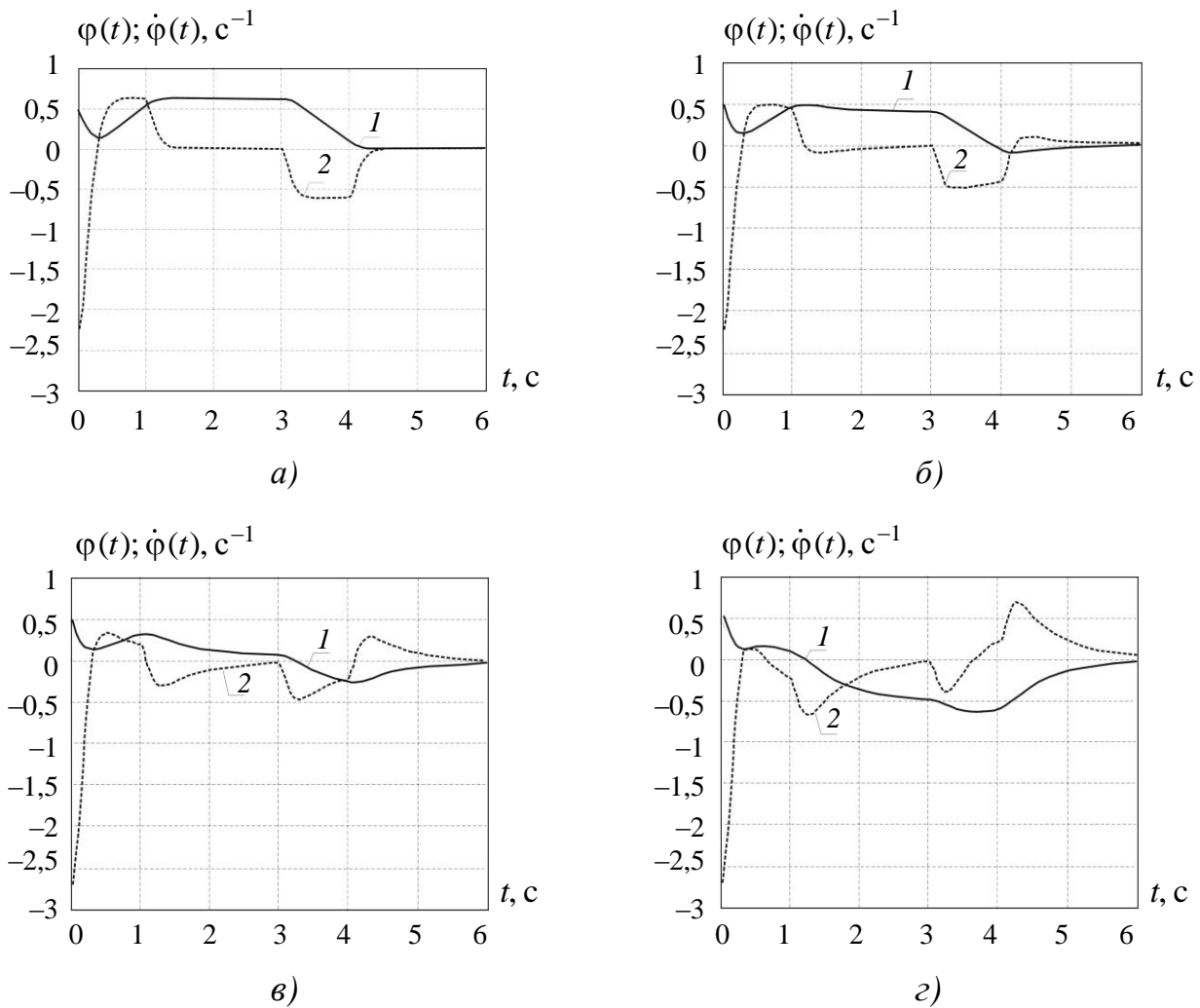


Рисунок 5. – Процеси відпрацювання зовнішнього збурення:

1 – $\varphi(t)$, 2 – $\dot{\varphi}(t)$, а) $k_p = 0$, б) $k_p = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$,

в) $k_p = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$, г) $k_p = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$

Аналіз цих процесів приводить до висновків, що оптимальне значення варійованого параметру k_p становить $k_p^* = 0,736 \cdot 10^{-6} \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1}$. При цьому оптимальні значення параметрів k_ϕ і $k_{\dot{\phi}}$ становлять $k_\phi^* = 249 \text{ В}$, $k_{\dot{\phi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Доведено, що між властивістю інваріантності замкненої системи стабілізації до дії зовнішніх збурень і стійкістю замкненої системи існує протиріччя, а саме: при підвищенні ступеня інваріантності системи зменшується ступінь її стійкості. Це протиріччя вирішується на основі компромісу між вказаними властивостями.

Сьомий розділ присвячений розробці робастної системи наведення і стабілізації танкової гармати, зміна параметрів якої в процесі експлуатації не приводить до суттєвої зміни її динамічних характеристик. З поняттям робастності тісно пов'язане поняття чутливості системи до зміни її параметрів. Система є робастною, якщо вона малочутлива до зміни своїх конструктивних параметрів.

Найбільш нестабільним параметром систем наведення і стабілізації танкової гармати в каналі вертикального наведення є коефіцієнт в'язкості робочої рідини гідросистеми стабілізатора, який пропорційний параметру f математичної моделі (14). Розглядаються два підходи до рішення задачі синтезу робастного стабілізатору. Перший підхід заснований на розгляді функцій чутливості:

$$s_1(t) = \frac{\partial \varphi(t)}{\partial f}, \quad s_2(t) = \frac{\partial \dot{\varphi}(t)}{\partial f}$$

і формуванні алгоритму стабілізації у вигляді

$$\sigma[nT] = k_\varphi \tilde{u}_\varphi[nT] + k_{\dot{\varphi}} \tilde{u}_\omega[nT] + r_1 s_1[nT] + r_2 s_2[nT], \quad (34)$$

причому вибір варійованих параметрів k_φ , $k_{\dot{\varphi}}$, r_1 і r_2 здійснюється за умови мінімуму функціонала

$$I = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T \left(\beta_1^2 [\varphi^j(t)]^2 + \beta_2^2 [\dot{\varphi}^j(t)]^2 + \beta_3^2 [s_1^j(t)]^2 + \beta_4^2 [s_2^j(t)]^2 \right) dt \right\}. \quad (35)$$

Застосування алгоритму параметричного синтезу приводить до наступних значень вагових коефіцієнтів функціоналу (35) і варійованих параметрів алгоритму стабілізації (34): $\beta_1 = 0,416$, $\beta_2 = 0,062$, $\beta_3 = 5,19$, $\beta_4 = 0,01$, $k_\varphi^* = 161,11 \text{ В}$, $k_{\dot{\varphi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$, $r_1^* = -59,69 \text{ В} \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$, $r_2^* = -1,12 \text{ В} \cdot \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

Аналіз процесів наведення і стабілізації в замкненій системі при реалізації алгоритму (34) приводить до висновку, що надмірне підвищення ступеня робастності системи приводить до зниження її точності, тобто між вимогами робастності і точності є протиріччя, яке розв'язується шляхом компромісу, а саме, шляхом цілеспрямованого вибору вагових коефіцієнтів адитивного функціоналу (35).

Практична реалізація алгоритму (34) пов'язана з значними труднощами, які виникають у зв'язку з необхідністю інтегрування в цифровому електронному блоці в системі реального часу розширеної системи диференціальних рівнянь безперервної частини математичної моделі (14) і диференціальних рівнянь моделі чутливості для отримання функцій чутливості $s_1[nT]$ і $s_2[nT]$, які входять до алгоритму (34). Таким чином, робастний стабілізатор (34) відноситься до класу систем із вбудованими моделями, реалізація яких в системі реального часу для швидкісних процесів є проблематичною. У зв'язку з цим розглядається і другий підхід до параметричного синтезу робастної системи, який полягає у відшуванні таких значень варійованих параметрів k_φ і $k_{\dot{\varphi}}$ алгоритму стабілізації (15), які на рішеннях замкненої системи (14), (15) додають мінімум адитивному функціоналу

$$J(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) = \gamma_1^2 I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}}) + \gamma_2^2 \left[\frac{\partial I(k_\varphi, k_{\dot{\varphi}})}{\partial f} \right]_{f=f_0}, \quad (36)$$

де f_0 – номінальне значення нестабільного параметру f ; γ_1, γ_2 – вагові коефіцієнти, що підлягають вибору; $I(k_\phi, k_{\dot{\phi}})$ – функціонал, що визначається формулою (25). Застосування алгоритму параметричного синтезу замкненої системи наведення і стабілізації приводить до значень варійованих параметрів $k_\phi^* = 157,42 \text{ В}$ і $k_{\dot{\phi}}^* = 125 \text{ В} \cdot \text{с}$.

У **восьмому розділі** розглядається можливість застосування в системі наведення і стабілізації танкової гармати принципів побудови систем зі змінною структурою (СЗС). В класі СЗС підвищується швидкодія замкненої системи, а при роботі СЗС в ковзному режимі система набуває властивість інваріантності до дії зовнішніх збурень і властивість робастності до зміни значень нестабільних параметрів системи.

Запропонована конструкція стабілізатора танкової гармати, яка реалізує алгоритм наведення і стабілізації (15), в якому значення варійованих коефіцієнтів обираються у відповідності з алгоритмом

$$\begin{cases} k_\phi = \bar{k}_\phi \operatorname{sign}\{\tilde{u}_\phi[nT]s[nT]\}, \\ k_{\dot{\phi}} = \bar{k}_{\dot{\phi}} \operatorname{sign}\{\tilde{u}_\omega[nT]s[nT]\}, \\ s[nT] = \tilde{u}_\omega[nT] + \lambda \tilde{u}_\phi[nT], \end{cases} \quad (37)$$

де $s[nT]$ – поверхня перемикування.

Варійованими параметрами замкненої системи (16), (17), (42) є \bar{k}_ϕ , $\bar{k}_{\dot{\phi}}$ і λ .

Використання алгоритму параметричного синтезу приводить до оптимальних значень цих параметрів: $\bar{k}_\phi^* = 150 \text{ В}$, $\bar{k}_{\dot{\phi}}^* = -36 \text{ В} \cdot \text{с}$, $\lambda^* = 5,54 \text{ с}^{-1}$.

Процеси наведення і стабілізації в замкненій системі (14), (15), (37) приведені на рис. 6.

Відзначимо, що стабілізатор зі змінною структурою забезпечує аперіодичний характер процесів наведення. Швидкодія стабілізатора зі змінною структурою практично не відрізняється від лінійного ПД-стабілізатора при оптимальних значеннях його варійованих параметрів і складає близько 1с при $\phi(0) = 0,5 \text{ рад}$. Поруч з тим, максимальне значення кутової швидкості повороту гармати не перевищує величини $\dot{\phi}_{\max} = 1,8 \text{ с}^{-1}$, а значення функціоналу (25) при русі танка по асфальтобетону становить $I = 0,3845 \text{ с}$.

Після приведення вісі каналу стволу танкової гармати до лінії прицілювання закінчується режим наведення і починається режим стабілізації вісі каналу стволу в умовах дії зовнішніх збурень. Аналіз гістограм випадкової функції $\phi(t)$ приводить до висновку, що точність стабілізації, яка забезпечується стабілізатором зі змінною структурою (15), (37), нижче, ніж точність, що забезпечується лінійними стабілізаторами (15), або (26)–(28). Тому в системі наведення і стабілізації стабілізатор зі змінною структурою доцільно використовувати тільки в режимі наведення, де цей стабілізатор забезпечує

ковзний режим роботи замкненої системи і необхідну якість процесу наведення. В режимі стабілізації більш доцільно використання лінійних стабілізаторів (15), або (26)–(28), які забезпечують більш високу точність стабілізації. Доведено, що жодний з представлених стабілізаторів не в змозі забезпечити високу точність стрільби з танкової гармати без застосування пристрою дозволу пострілу, який дозволяє здійснення пострілу при певних умовах: при мінімальних деформаціях вісі каналу стволу внаслідок пружних коливань та при мінімальних відхиленнях недеформованої вісі каналу стволу від лінії прицілювання. В роботі розроблені алгоритми роботи цифрового пристрою дозволу пострілу.

У дев'ятому розділі досліджується можливість застосування безплатформених інерціальних систем наведення і стабілізації танкової гармати, в яких кут розходження між віссю каналу стволу танкової гармати і лінією прицілювання не вимірюється за допомогою гіростабілізованої платформи, а обчислюється в бортовій ЕОМ за допомогою спеціальних алгоритмів. Ці алгоритми використовують інформацію про кутові швидкості обертання гармати відносно вісі цапф, башти відносно вісі обертання і підресореної частини корпусу відносно власної подовжньої вісі інерції, а також інформацію про поточний кут повороту башти і поточний кут підвищення танкової гармати.

Запропонована структурна схема безплатформеного стабілізатора танкової гармати і лазерного променя танкового прицілу-далекоміру, а також розроблено алгоритмічне забезпечення бортової ЕОМ, що реалізує цифрові алгоритми стабілізації. Аналіз процесів стабілізації приводить до висновку,

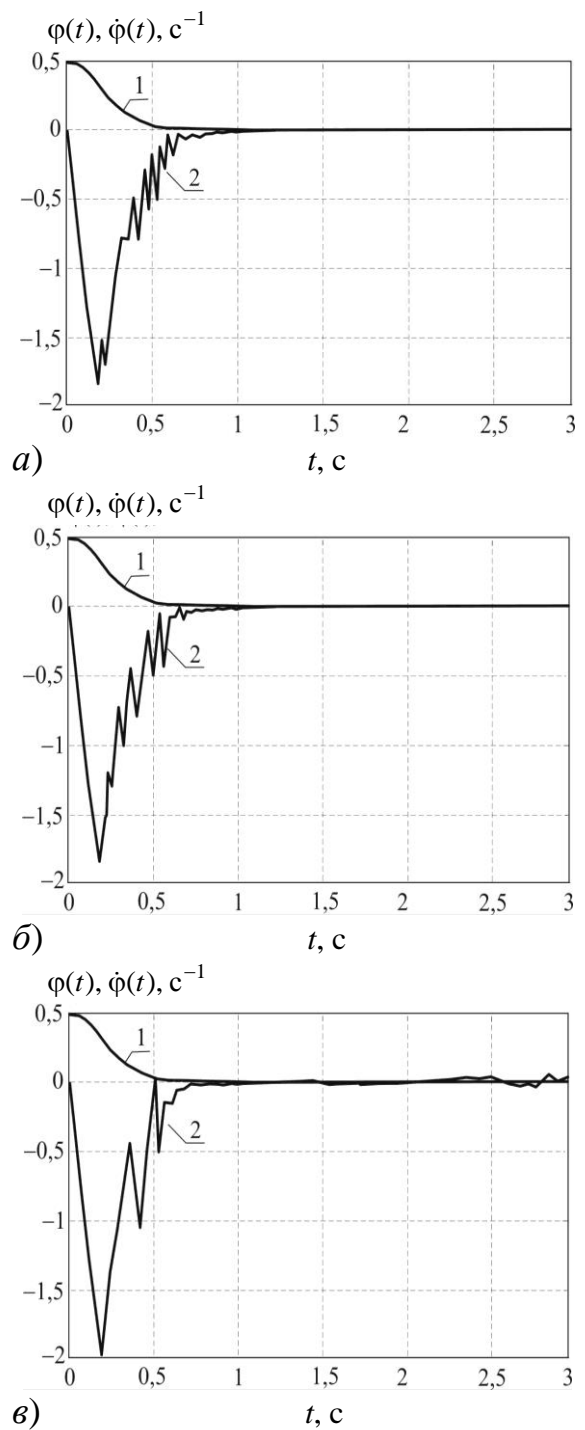


Рисунок 6. – Процеси наведення і стабілізації в замкненій системі зі змінною структурою:

- а) асфальтобетон, б) мостова,
в) ґрунтова дорога

що при значенні періоду квантування ЕОМ в інтервалі $(0,005 \div 0,01)$ с точність стабілізації вісі каналу стволу танкової гармати є цілком прийнятною. Максимальне значення амплітуди вимушених коливань каналу стволу не перевищує $6 \cdot 10^{-4}$ рад. Підвищення періоду квантування до $T = 0,02$ с приводить до значного зниження точності стабілізації до величини $8 \cdot 10^{-3}$ рад.

Пропонується використання в алгоритмах, що реалізують безплатформений стабілізатор танкової гармати, цифрових низькочастотних фільтрів Баттерворта, що не приводить до суттєвого ускладнення алгоритмів стабілізації.

В **десятому розділі** вирішується задача параметричного синтезу системи наведення танкової зенітної установки (ТЗУ), яка є допоміжним озброєнням і призначена для боротьби з повітряними і наземними цілями.

Схема системи наведення ТЗУ приведена на рис. 7, де прийняті позначення: КБ – командирська башточка, Р – редуктор, ВЕД – виконавчий електродвигун, ТГ – тахогенератор зворотнього зв'язку; ПН – пульт наведення, РН – реостат наведення, ЦЕБН – цифровий електронний блок наведення.

Цифровий електронний блок наведення ТЗУ представляє собою широтно-імпульсний модулятор і формує послідовність керуючих імпульсів постійної амплітуди U_0 , передні фронти яких відстоять один від одного на величину T_0 :

$$U_y(t) = \begin{cases} U_0 \text{sign} [U_3(t) - U_T(t)], & kT_0 \leq t < (k + \gamma)T_0; \\ 0, & (k + \gamma)T_0 \leq t < (k + 1)T_0, \end{cases} \quad (38)$$

де $U_3(t)$ – сигнал на виході РН, $U_T(t)$ – сигнал на виході ТГ, k – номер кроку формування імпульсу, γ – скважність імпульсу.

Скважність кожного керуючого імпульсу визначається співвідношенням:

$$\gamma[kT_0] = \begin{cases} 1, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} \geq 1; \\ \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|}, & \frac{|\sigma[kT_0]|}{\theta|U_3[kT_0]|} < 1, \end{cases} \quad (39)$$

де θ – варійований параметр, що підлягає вибору; $U_3[kT_0]$ – сигнал на виході РН в момент $t = kT_0$; $\sigma[kT_0]$ – сигнал помилки системи наведення ТЗУ в момент часу $t = kT_0$

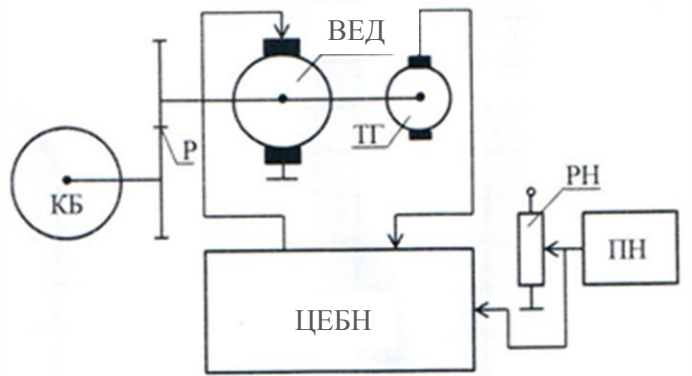


Рисунок 7. – Система наведення ТЗУ

$$\sigma[kT_0] = U_3[kT_0] - U_\Gamma[kT_0], \quad (40)$$

де $U_\Gamma[kT_0]$ – вихідний сигнал ТГ в момент $t = kT_0$.

Задача параметричного синтезу системи наведення ТЗУ полягає у визначенні періоду повторення керуючих імпульсів T_0 , а також величини θ , що визначає скважність керуючого імпульсу.

Розроблена математична модель збуреного руху замкненої системи наведення ТЗУ, яка має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_D(t)}{dt} = \left[\frac{C_M k_M}{I_\Sigma i_p^2} i_\alpha^2(t) - \frac{M_f(t)}{I_\Sigma i_p^2} \right] \text{sign} [U_3(t) - U_\Gamma(t)], \\ \frac{di_\alpha(t)}{dt} = \frac{r_\alpha}{L_\alpha} i_\alpha(t) - \frac{C_E k_M}{L_\alpha} i_\alpha(t) \omega_D(t) \text{sign} [U_3(t) - U_\Gamma(t)] + \frac{1}{L_\alpha} U_y(t), \\ \frac{dU_\Gamma(t)}{dt} = -\frac{1}{T_\Gamma} U_\Gamma(t) + \frac{k_\Gamma}{T_\Gamma} \omega_D(t), \end{cases} \quad (41)$$

де $\omega_D(t)$ – кутова швидкість обертання якоря ВЕД; $i_\alpha(t)$ – струм в ланцюзі якоря ВЕД; $M_f(t)$ – момент зовнішніх збурень; I_Σ – момент інерції КБ з ТЗУ, боєкомплект і сидінням командира танка з урахуванням маси командира; C_M, k_M, C_E – конструктивні параметри ВЕД; r_α, L_α – електричний опір і індуктивність ланцюгу якоря ВЕД; k_Γ, T_Γ – коефіцієнт підсилення і постійна часу тахогенератора зворотного зв'язку.

Значення параметрів ТЗУ дорівнюють $I_\Sigma = 0,51 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $C_M k_M = 0,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-2}$, $r_\alpha = 0,42 \text{ Ом}$, $L_\alpha = 0,001 \text{ Гн}$, $C_E k_M = 0,0096 \text{ В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{-1}$, $U_0 = 1 \text{ В}$, $T_\Gamma = 0,05 \text{ с}$, $k_\Gamma = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Вибір варійованих параметрів системи наведення ТЗУ здійснюється згідно з вимогою досягнення мінімуму на рішеннях замкненої системи (38)–(41) інтегрального адитивного функціоналу:

$$I = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T \left(\beta_1^2 [\sigma^j(t)]^2 + \beta_2^2 [i_\alpha^j(t)]^2 \right) dt \right\},$$

який відтворює вимоги до точності наведення та енергетичних витрат на наведення ТЗУ, причому

$$\sigma(t) = U_3(t) - U_\Gamma(t).$$

Застосування алгоритму параметричного синтезу приводить до наступних значень параметрів системи наведення ТЗУ: $0,01 \leq \theta \leq 0,07$, $0,01 \text{ с} \leq T_0 \leq 0,02 \text{ с}$.

Отримані дані перевірені на дослідницькому стенді, створеному в Харківському бронетанковому ремонтному заводі і призначеному для настройки параметрів системи наведення ТЗУ. На рис. 8 приведені процеси наведення ТЗУ при $\theta = 0,03$; $T_0 = 0,01 \text{ с}$.

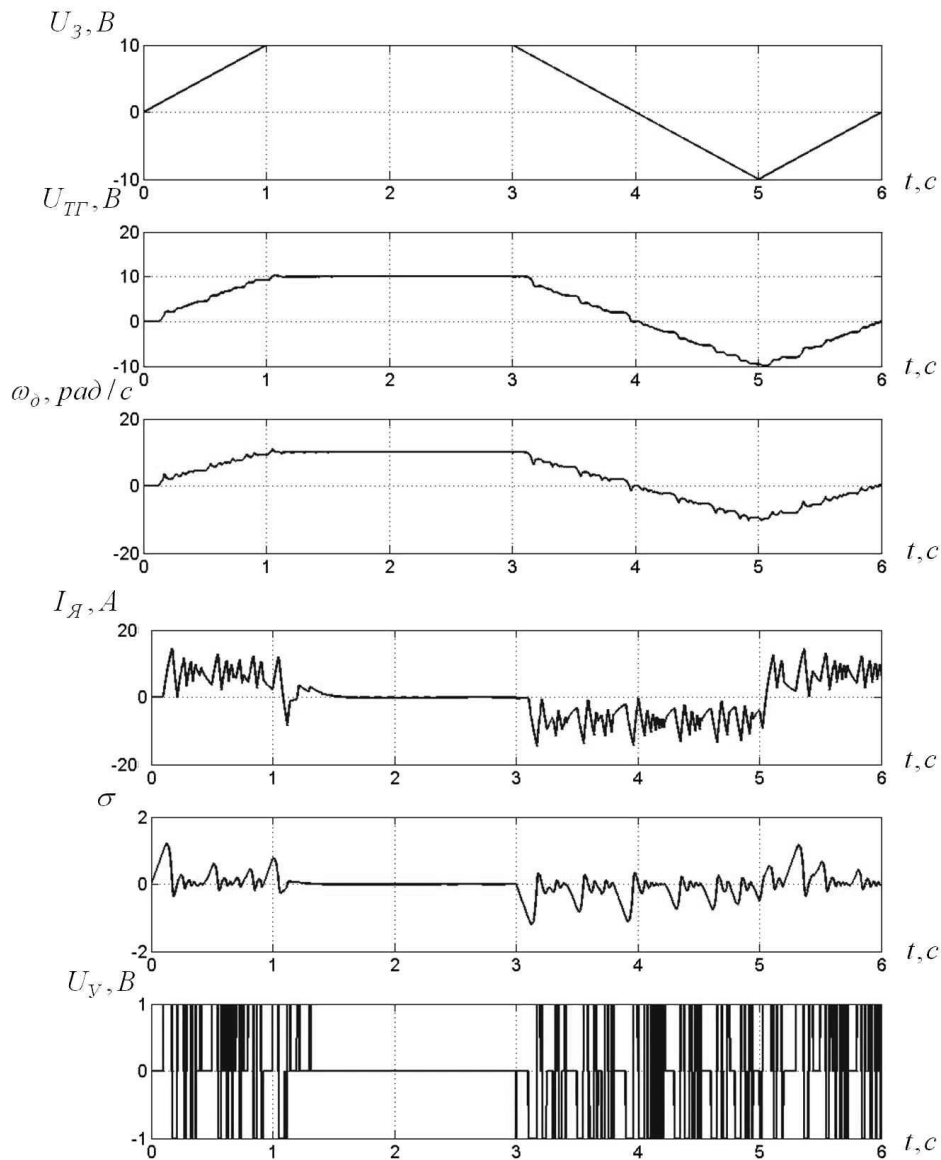


Рисунок 8. – Процеси наведення ТЗУ

З аналізу рисунку 8 можна зробити висновок, що при достатньо інтенсивній зміні керуючого впливу $U_3(t)$ кутова швидкість повороту $\omega_\delta(t)$ командирської башточки з закріпленим на ній танковим зенітним кулеметом відслідковується з прийнятною точністю. Струм якоря виконавчого двигуна не перевищує $I_\text{Я} \leq 15$ А. Амплітуда керуючих імпульсів $U_0 = 1$ В забезпечує необхідну точність наведення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі поставлено і розв'язано науково-практичну проблему розробки високоточних автоматизованих цифрових систем керування процесом наведення і стабілізації танкового озброєння на основі вдосконалених математичних та імітаційних моделей систем, обґрунтованих методів і алгоритмів обчислення варійованих параметрів.

Результати досліджень, що представлені в роботі, дозволяють зробити такі загальні висновки.

1. Огляд технічної, патентної та наукової літератури доводить, що синтез високоточного стабілізатора танкового озброєння можливий лише при умові створення адекватної математичної моделі об'єкта стабілізації, яка найбільш повно враховує його динамічні властивості і, перш за все, пружні властивості стволу танкової гармати, а також адекватної імітаційної моделі зовнішніх збурень, що діють на танкове озброєння при русі танка в різних дорожніх умовах.

2. Для підвищення точності стабілізації лазерного променя танкового прицілу-далекоміру запропоновано перехід від силової стабілізації лазерного променя до індикаторної стабілізації. Доведено, що цифрові індикаторні системи стабілізації лазерного променя в змозі забезпечити необхідну точність стабілізації тільки при використанні цифрових низькочастотних фільтрів Баттерворта і Ланцоша.

3. Створена математична модель збуреного руху танкової гармати з урахуванням пружних коливань стволу. Здійснена ідентифікація створеної моделі шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних, отриманих за допомогою дослідницького стенду, створеного на базі танка Т-64 БМ «Булат», а також стенду для випробування гідроприводу вертикального наведення. В результаті визначено значення коефіцієнта внутрішнього тертя матеріалу стволу, а також параметрів ЕГП. Здійснена декомпозиція математичної моделі замкненої системи наведення і стабілізації танкової гармати шляхом розділу «швидких» і «повільних» рухів в замкненій системі з подальшим нехтуванням «швидкими» рухами при вивченні «повільних» рухів, зокрема високочастотними коливаннями рамок гіроскопічних чутливих елементів стабілізатора.

4. Вирішена задача просторового моделювання випадкової поверхні руху танка нормальним марківським двовимірним полем із заданими стохастичними характеристиками, що відповідають асфальтобетону, мостовій і ґрунтовій дорогам. Пересічену місцевість, що має властивості ґрунтової дороги з випадково розміщеними на ній дискретними перепонами, доцільно моделювати накладенням двох полів – нормального марківського поля і двовимірного дискретного поля. Розроблено алгоритмічно-програмний комплекс, за допомогою якого будуються конкретні реалізації випадкової функції зовнішніх збурень, що діють на танкову гармату при русі танка по різним випадковим поверхням із різними швидкостями. Стохастичний аналіз випадкової функції зовнішніх збурень довів, що найбільш інтенсивні збурення виникають при русі танка по пересіченій місцевості з швидкостями (4 ÷ 6) м/с, які відповідають резонансним коливанням підресорної частини корпусу, а також, що збурення від пружних коливань стволу визначаються першими двома тонами пружних коливань, які необхідно враховувати при імітаційному моделюванні зовнішніх збурень.

5. Точність системи наведення і стабілізації танкової гармати кількісно пропонується оцінювати за допомогою адитивного інтегрального квадратичного функціоналу, що обчислюється на рішеннях математичної моделі збуреного

руху замкненої системи. Доведено, що задача параметричного синтезу на множині допустимих значень варійованих параметрів має єдине рішення, тобто інтегральний квадратичний функціонал, що обчислений на рішеннях математичної моделі збуреного руху замкненої системи, має єдиний мінімум.

6. Розроблено алгоритмічно-програмний комплекс для вирішення задачі параметричного синтезу цифрового стабілізатора танкової гармати, що містить вибір вагових коефіцієнтів аддитивного інтегрального квадратичного функціоналу, за допомогою якого отримані значення варійованих коефіцієнтів підсилення штатного ПД-стабілізатора. Період квантування цифрового ПД-стабілізатора не повинен перевищувати величини 0,01 с.

7. Для надання стабілізатору танкової гармати властивості інваріантності до дії зовнішніх збурень в каналі вертикального наведення запропонована схема, що містить датчики тиску робочої рідини в порожнинах виконавчого гідроциліндру, електричні виходи яких з'єднані зі входами цифрового електронного блоку. Доведено, що між властивістю інваріантності системи до дії зовнішніх збурень і стійкістю системи існує протиріччя, яке розв'язується за допомогою компромісу між порядком інваріантності системи і запасом стійкості. Обчислені оптимальні значення варійованих параметрів інваріантної системи.

8. Для вирішення задачі параметричного синтезу робастної системи наведення і стабілізації танкової гармати в роботі застосований апарат функцій чутливості, а також запропонована структурна схема робастної системи стабілізації, яка відноситься до класу систем із вбудованими моделями. Доведено, що між властивістю робастності системи та її точністю існує протиріччя, надлишкова робастність системи призводить до протилежного ефекту – зниженню точності системи. В цьому зв'язку рекомендовано обирати значення варійованих констант алгоритму стабілізації на основі компромісу між вимогами робастності і точності замкненої системи стабілізації. Доведено доцільність вибору варійованих констант алгоритму стабілізації з умови мінімуму адитивного функціоналу якості, який враховує чутливість цього функціоналу до зміни значення нестабільного параметру.

9. Доведено, що в режимі наведення доцільно використовувати алгоритм наведення зі змінною структурою, а в режимі стабілізації – лінійний алгоритм. Ковзний режим роботи, що використовується при наведенні танкової гармати, забезпечує властивості інваріантності і робастності системи наведення. Обчислені оптимальні значення варійованих параметрів системи наведення зі змінною структурою.

10. Висока точність стрільби з танкової гармати може бути досягнена лише з використанням цифрового пристрою дозволу пострілу, яке дозволяє постріл при малих деформаціях пружного стволу танкової гармати і при вирішенні системи нерівностей відносно поточних значень кутів розходження і кутових швидкостей танкової гармати. Для підвищення точності стабілізатора танкової гармати пропонується використання безплатформеної інерціальної системи (БІС) стабілізації, яка містить датчики кутових швидкостей

гармати відносно вісі цапф, башти відносно вісі її повороту і підресореної частини корпусу танка відносно власної подовженої вісі, а також бортову ЕОМ, що реалізує алгоритм БІС. Доведено, що величина періоду квантування бортової ЕОМ, яка реалізує алгоритми БІС, знаходиться в межах $(0,005 \div 0,01)$ с, що забезпечує достатню точність стабілізації.

11. Отримано рішення задачі параметричного синтезу цифрової системи наведення танкового зенітного кулемету і здійснено експериментальне дослідження системи наведення за допомогою спеціального дослідницького стенду.

12. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ХКБМ ім. О.О. Морозова, ДП «Завод імені Малишева», Львівському науково-дослідному радіотехнічному інституті, НВП «Хартрон-Аркос» і Харківському бронетанковому заводу при створенні цифрових танкових інформаційно-керуючих систем, а також у навчальному процесі факультету транспортного машинобудування та факультету військової підготовки НТУ «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Александрова Т. Е. Параметрический синтез системы наведения и стабилизации танкового вооружения / Т. Е. Александрова, И. В. Костяник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Вип. 27. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2003. – С. 54-61.

Здобувач розробив математичну модель збуреного руху об'єкта стабілізації.

2. Александрова Т. Е. Построение областей устойчивости сложных систем в плоскости варьируемых параметров / Т. Е. Александрова, И. В. Костяник // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Вип. 28. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2003. – С. 23-28.

Здобувачем запропонований алгоритм побудови області технічної стійкості динамічної системи.

3. Александрова Т. Е. Математическое моделирование динамических процессов в электроприводе импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Вип. 43. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – С. 61-63.

Здобувач розробив математичну модель процесу наведення танкової зенітної установки.

4. Александрова Т. Е. Сравнительный анализ электронных систем импульсного регулирования танковой зенитной установки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, С. А. Сладких // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 215-219.

Здобувачем введені кількісні критерії порівняння різних схем танкової зенітної установки.

5. Александрова Т. Е. Имитационная модель криволинейного движения гусеничной машины со ступенчатой трансмиссией / Е. Е. Александров,

Т. Е. Александрова, Ю. В. Галушко, И. В. Костяник // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 52-59.

Здобувач запропонував методика моделювання зовнішніх збурень, що діють на гусеничну машину в процесі її криволінійного руху.

6. Александрова Т. Е. Выбор параметров алгоритма управления движением гусеничной машины со ступенчатой трансмиссией / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, Ю. В. Галушко, И. В. Костяник // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – № 2. – С. 147-153.

Здобувачем запропонована методика обчислення параметрів алгоритму керування.

7. Александрова Т. Е. Выбор оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза систем стабилизации / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2004. – № 2 (1). – С. 23-26.

Здобувачем обґрунтована методика вибору вагових коефіцієнтів інтегрального квадратичного функціоналу якості.

8. Александрова Т. Е. Параметрический синтез системы с переменной структурой для наведения и стабилизации танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, О. Я. Никонов, В. В. Пидашов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2008. – № 1. – С. 49-53.

Здобувачу належить ідея застосування принципу СЗС в системах наведення і стабілізації танкової гармати.

9. Александрова Т. Е. Синтез робастного стабилизатора для позиционного электропривода / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник // Технічна електродинаміка. – К. : Інститут електродинаміки НАНУ. – 2010. – Тем. вип. Ч. I. – С. 178-181.

Здобувачу належить ідея застосування математичної теорії чутливості для синтезу робастних систем стабілізації.

10. Александрова Т. Е. Синтез цифровых нерекурсивных фильтров для информационно-управляющих систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко // Технічна електродинаміка. – К. : Інститут електродинаміки НАНУ. – 2011. – Спец. вип. Т. I. – С. 163-168.

Здобувач запропонував методика синтезу оптимальних нерекурсивних цифрових фільтрів.

11. Александрова Т. Е. Оценка точности электромеханического индикаторного стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка. – 2011. – № 3 (79). – С. 339-341.

Здобувачеві належить розробка математичної моделі збуреного руху електромеханічного індикаторного стабілізатора.

12. Александрова Т. Е. Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, А. А. Лаза-

ренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2011. – № 3. – С. 40-44.

Здобувачеві належить створення математичної моделі збуреного руху гіроплатформи з урахуванням сил «сухого» тертя у вісях.

13. Александрова Т. Е. Расчет параметров автоколебаний давления рабочей жидкости в гидросистеме стабилизатора канала вертикального наведения танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Интегрировані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 3. – С. 24-30.

Здобувач запропонував метод гармонічної лінеаризації для розрахунку автоколивань запобіжного клапану гідросистеми стабілізатора.

14. Александрова Т. Е. Имитационное моделирование внешних возмущений действующих на танковую пушку / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, С. Н. Беляев // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 1. – С. 43-50.

Здобувачеві належить ідея урахування поперечно-кутових коливань підресореної частини корпусу танка при обчисленні зовнішніх збурень, що діють на танкову гармату у вертикальній площині.

15. Александрова Т. Е. Индикаторный стабилизатор поля зрения прицела танковой пушки // Т. Е. Александрова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2012. – №1. – С. 51-53.

16. Александрова Т. Е. Стохастическое моделирование случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Системи обробки інформації. – Харків : Харківський університет Повітряних Сил. – 2012. – Вип. 2 (100). – С. 63-66.

Здобувачеві належить ідея застосування рівняння Ланжевена для опису нормального марківського двовимірного поля.

17. Александрова Т. Е. Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Системи озброєння і військова техніка. – Харків : Харківський університет Повітряних Сил. – 2012. – № 1 (29). – С. 68-71.

Здобувачем запропонована методика розрахунку параметрів рівняння Ланжевена для різних типів ґрунтів.

18. Александрова Т. Е. Математическое моделирование колебаний ствола упругой танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. Е. Истомин // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 2. – С. 173-178.

Здобувачем розроблена математична модель коливань танкової гармати з урахуванням пружних коливань стволу.

19. Александрова Т. Е. Упругая танковая пушка как стабилизируемый объект / Т. Е. Александрова, А. Е. Истомин // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 2. – С. 178-183.

Здобувачем здійснений перехід від дискретно-континуальної моделі пружної танкової гармати до дискретної моделі.

20. Александрова Т. Е. Сравнительный анализ цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и

Ланцоша / Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. – Запоріжжя : ЗНТУ. – 2011. – № 2. – С. 148-152.

Здобувач запропонував послідовно-паралельне з'єднання фільтрів Баттеруорта і Ланцоша при побудові ПД-стабілізатора.

21. Александрова Т. Е. Параметрический синтез оптимальных робастных стабилизаторов подвижных объектов / Т. Е. Александрова // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. – Запоріжжя : ЗНТУ. – 2012. – № 1. – С. 141-143.

22. Александрова Т. Е. Инвариантный стабилизатор танковой пушки / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2012. – № 2. – С. 18-20.

Здобувач запропонував схему інваріантного стабілізатора танкової гармати, що містить датчики тиску робочої рідини у порожнинах виконавчого гідроциліндру.

23. Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез цифрового электромеханического стабилизатора поля зрения прибора наблюдения / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. – Кременчук : Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського. – 2012. – № 3 (19). – С. 375-377.

Здобувачеві належить вибір оптимальних значень параметрів цифрового електромеханічного стабілізатора поля зору приладу спостереження.

24. Александрова Т. Е. Рекурсивные цифровые фильтры Баттеруорта для стабилизаторов подвижных объектов / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // *Технічна електродинаміка*. – К. : Інститут електродинаміки НАНУ. – 2012. – Спец. вип. Ч. І. – С. 86-89.

Здобувачем здійснений порівняльний аналіз цифрових низькочастотних фільтрів Баттерворта різного порядку.

25. Александрова Т. Е. Стохастическое моделирование дискретных возмущений, действующих на танковую пушку при стрельбе с ходу / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – К. : КБ «Артиллерийское вооружение». – 2012. – № 2. – С. 15-18.

Здобувачеві належить ідея побудови двомірного поля пересіченої місцевості як суми нормального марківського двомірного поля і поля дискретних переешкод.

26. Александрова Т. Е. Стохастическая оценка плавности хода многоопорного транспортного средства / Т. Е. Александрова, М. Д. Борисюк, А. С. Мазманишвили // *Доповіді НАН України*. – К. : Видавничий дім «Академперіодика». – 2013. – № 6. – С. 52-59.

Здобувачу належить кількісна оцінка вимушених коливань підресореної частини багатоопорного транспортного засобу при русі по випадковим нерівностям.

27. Александрова Т. Е. Параметрический синтез стабилизатора переменной структуры / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 18 (991). – С. 93-98.

Здобувачеві належить ідея застосування ковзних режимів в системах наведення танкової гармати.

28. Александрова Т. Е. Параметрический синтез инвариантного стабилизатора танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Интегрированные технологии та енергозбереження. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 2. – С. 44-46.

Здобувач запропонував методика розрахунку констант інваріантного алгоритму стабілізації танкової гармати.

29. Александрова Т. Е. Параметрический синтез оптимального стабилизатора танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. Е. Истомин, И. В. Костяник // Механіка та машинобудування. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 2. – С. 203-210.

Здобувачем обґрунтований вибір адитивного інтегрального квадратичного критерія оптимальності стабілізатора танкової гармати.

30. Александрова Т. Е. К вопросу синтеза робастного стабилизатора танковой пушки с использованием аппарата функций чувствительности / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова // Механіка та машинобудування. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 1. – С. 71-80.

Здобувач запропонував використання функції чутливості критерія оптимальності для синтезу стабілізатора танкової гармати.

31. Александрова Т. Е. Моделирование внешних возмущений, действующих на танковую пушку при движении танка по случайной поверхности / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон : ХНТУ. – 2013. – Вып. 2 (47). – С. 24-28.

Здобувач запропонував використання гістограм для оцінки випадкових збурень, що діють на танкову гармату.

32. Александрова Т. Е. Цифровой стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера / Т. Е. Александрова, Е. Е. Александров, М. Д. Борисяк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харьков : «СВЭКО». – 2013. – № 8 (114). – С. 177-179.

Здобувачем запропонована схема цифрового стабілізатора лазерного променя танкового прицілу-далекоміру.

33. Александрова Т. Е. О единственности решения задачи параметрического синтеза линейной динамической системы с интегральным квадратичным критерием оптимальности / Т. Е. Александрова // Системи обробки інформації. – Харьков : Харківський університет Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 7 (114). – С. 116-120.

34. Александрова Т. Е. К вопросу синтеза линейных инвариантных систем стабилизации / Т. Е. Александрова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 62 (1035). – С. 152-158.

35. Александрова Т. Е. Цифровой стабилизатор лазерного луча танкового прицела-дальномера / Т. Е. Александрова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 62 (1035). – С. 143-151.

36. Александрова Т. Е. Параметрический синтез грубых информационно-управляющих систем / Т. Е. Александрова // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 1. – С. 125-132.

37. Александрова Т. Е. Стохастическая оценка плавности хода автомобиля / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – М. : МАДИ. – 2013. – № 4 (35). – С. 21-25.

Здобувачем запропонована методика кількісної оцінки плавності ходу автотранспортного засобу.

38. Александрова Т. Е. Идентификация математической модели электрогидравлического усилителя канала вертикального наведения танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон : ХНТУ. – 2014. – Вып. 3(50). – С. 203-207.

Здобувачем запропоновано використання теоретичної та експериментальної АЧХ електрогидравлічного підсилювача для ідентифікації його математичної моделі.

39. Александрова Т. Е. Об особенностях построения инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Системи озброєння і військова техніка. – Харків : Харківський університет Повітряних Сил. – 2014. – № 4 (40). – С. 3-6.

Здобувачу належить ідея побудови інваріантного стабілізатора танкової гармати в каналі вертикального наведення шляхом вимірювання тисків робочої рідини в порожнинах виконавчого гідроциліндру.

40. Александрова Т. Е. К задаче построения инвариантного стабилизатора канала вертикального наведения основного вооружения танка / Т. Е. Александрова, Е. Е. Александров, М. Д. Борисюк // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – №4. – С. 67-73.

Здобувачем запропонував застосовувати вихідні сигнали датчиків тиску робочої рідини в порожнинах виконавчого гідроциліндру в алгоритмі стабілізації.

41. Александрова Т. Е. Оптимизация параметров нерекурсивных низкочастотных фильтров цифровых систем управления и диагностики / Т. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 1. – С. 169-178.

Здобувачем запропонована методика оптимального синтезу нерекурсивного низькочастотного фільтру з заданою смугою пропускання виходячи з вимоги мінімуму площі під кривою АЧХ.

42. Александрова Т. Е. Цифровые фильтры в системах автомобильной автоматики / Т. Е. Александрова, И. Е. Александрова, А. А. Лазаренко, А. В. Зейн // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – М. : МАДИ, 2014. – № 1(37). – С. 25-28.

Здобувачем запропоновані алгоритми, що реалізуються цифровими низькочастотними фільтрами різного порядку.

43. Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез стабилизатора упругой танковой пушки. Часть I. Математические и имитационные модели. / М. Д. Борисюк, А. С. Куценко, Т. Е. Александрова и др. // Озброєння та військова техніка. – К. : ЦНДІ ОВТ. – 2014. – № 4. – С. 20-26.

Здобувачем запропонована математична модель збуреного руху пружної танкової гармати; доведено, що достатньо враховувати два перші тони пружних коливань ствола.

44. Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез стабилизатора упругой танковой пушки. Часть II. Параметрический синтез и сравнительный анализ стабилизаторов различной структуры. / М. Д. Борисюк, А. С. Куценко, Т. Е. Александрова и др. // Озброєння та військова техніка. – К. : ЦНДІ ОВТ. – 2014. – № 4. – С. 27-34.

Здобувач запропонував алгоритми параметричного синтезу замкнених систем стабілізації, робастних систем та систем зі змінною структурою, а також алгоритм вибору вагових коефіцієнтів адитивних функціоналів.

45. Пат. № 83903, Україна, МПК F41G 5/00. Стабілізатор танкової гармати / Т. Є. Александрова, А. О. Лазаренко; Заявник і патентоволодар Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет». – № U201300690; заявл. 21.01.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. – 4 с.

Здобувачу належить схема інваріантного стабілізатора гармати.

46. Пат. № 83904, Україна, МПК F41G 3/02. Стабілізатор лінії прицілювання танкової гармати / Т. Є. Александрова, А. О. Лазаренко, А. В. Зейн; Заявник і патентоволодар Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет». – № U201300691; заявл. 21.01.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. – 4 с.

Здобувачем запропонована структурна схема ПД-стабілізатора лінії прицілювання, а також запропоновані алгоритми стабілізації.

47. Пат. № 81491, Україна, МПК F41G 5/00. Стабілізатор основного озброєння танка / Т. Є. Александрова; Заявник і патентоволодар Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет». – № U201302760; заявл. 05.03.2013; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12. – 4 с.

48. Александрова Т. Є. Автоматизоване проектування танкових автоматичних систем / Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, В. М. Гриценко, М. О. Кечев, О. Я. Ніконов. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2003. – 137 с.

Здобувачем написані підрозділи: математичне моделювання збуреного руху системи паливоподавання танкового двигуна; вибір вагових коефіцієнтів критерію оптимальності; параметричний синтез аналогового регулятора паливоподавання двигуна; параметричний синтез автоматичних систем з урахуванням зовнішніх збурень; параметричний синтез систем автоматики.

49. Александрова Т. Е. Выбор весовых коэффициентов оптимизируемого функционала в задачах параметрического синтеза динамических систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // АВИА-2004. Аерокосмічні системи моніторингу та керування: VI Міжнар. наук.-техн. конф. – К. : Національний авіаційний університет. – 2004. – Т. 2. – С. 25.1-25.4.

Здобувачем запропонований алгоритм обчислення вагових коефіцієнтів функціоналу якості динамічних систем.

50. Александрова Т. Є. Параметричний синтез інваріантного стабілізатора танкової гармати / Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, І. В. Костяник // Автоматика-2010: XVII Міжнар. конф. з автоматичн. управл. – Харків : Харківський національний університет радіоелектроніки. – 2010. – Т. I. – С. 178-181.

Здобувачу належить ідея застосування принципу інваріантності в системі наведення і стабілізації танкової гармати.

51. Александрова Т. Є. Проблеми створення високоточного стабілізатора танкової гармати / Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова // Перспективи розвитку озброєння і військової техніки сухопутних військ: IV Всеукр. наук.-техн. конф. – Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного. – 2011. – С. 21-22.

Здобувач пропонує застосування останніх досягнень сучасної теорії керування для синтезу систем наведення і стабілізації танкової гармати.

52. Александрова Т. Е. Сравнительный анализ цифровых дифференцирующих фильтров / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, В. А. Кононенко // Автоматика-2011: XVIII Міжн. конф. з автоматичн. управл. – Львів : Вид-во Львівської політехніки. – 2011. – С. 303-304.

Здобувач здійснив порівняльний аналіз рекурсивних і нерекурсивних цифрових низькочастотних фільтрів.

53. Александрова Т. Є. До питання про моделювання коливань підресованої частини об'єктів бронетанкової техніки / Т. Є. Александрова // Перспективи розвитку озброєння і військової техніки сухопутних військ: V Всеукраїнська наук.-техн. конф. – Львів : Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – С. 71-72.

54. Александрова Т. Є. Структурно-параметричний синтез цифрового ПД-стабілізатора поля зору приладу спостереження рухомого об'єкту / Т. Є. Александрова, А. О. Лазаренко, А. В. Зейн // Автоматика-2012: XIX Міжнар. конф. з автоматичн. управл. – К. : Національний університет харчових технологій. – 2012. – С. 326-327.

Здобувачем запропонована структурна схема стабілізатора лазерного променя танкового прицілу-далекоміру.

55. Александрова Т. Е. До розрахунку зовнішніх збурень, що діють на пружну танкову гармату / Т. Є. Александрова, Є. Є. Александров, О. С. Мазманішвілі // Одинадцятий міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків Львові: Тези доповідей. — Львів : КІНПАТРІ ЛТД. – 2013. –С. 3-4.

Здобувач запропонував оцінювати зовнішнє збурення на танкову гармату як суму моменту тертя в осі цапф та інерційного моменту від пружних коливань ствола.

56. Александрова Т. Е. Параметрический синтез системы наведения и стабилизации упругой танковой пушки / Т. Е. Александрова, А. С. Куценко // Автоматика-2013: XX Міжн. конф. з автоматичн. управл. – Миколаїв : Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2013. – С. 189-190.

Здобувачем запропонована методика синтезу стабілізаторів дискретно-континуальних динамічних систем на прикладі пружної танкової гармати.

57. Александрова Т. Е. О единственности решения задачи параметрического синтеза линейной динамической системы с интегральным квадратичным критерием оптимальности / Т. Е. Александрова // Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем IPST-2013: II Міжн. наук.-техн. конф. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – С. 45-46.

58. Александрова Т.Е. Параметрический синтез грубых информационно-управляющих систем / Т. Е. Александрова // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології в науці та освіті: Міжн. наук.-метод. конф. – Харків : ХНАДУ. – 2013. – С. 10-11.

59. Александрова Т. Е. К вопросу о моделировании колебаний подресоренной части объектов бронетанковой техники при криволинейном движении по случайной поверхности / Т. Е. Александрова, А. С. Мазманишвили // Військово-технічний збірник. – Львів : Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – № 2 (7). – С. 48-51.

Здобувачем вдосконалена математична модель вимушених коливань підресореної частини транспортного засобу для випадку криволінійного руху.

60. Александрова Т. Е. Математическое моделирование, системный анализ и синтез динамических систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – 200 с.

Здобувачеві належить авторство наступних підрозділів: математичне моделювання динамічних систем; параметричний синтез дискретної системи наведення і стабілізації танкової гармати; синтез цифрових фільтрів; синтез диференціюючих фільтрів; синтез цифрових ПД-стабілізаторів.

61. Александрова Т. Е. Математическое моделирование возмущенного движения дискретно-континуальных динамических систем / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова // До 100-річчя з дня народження академіка В. Г. Сергієва та 50-річчя створення в ХПІ спеціальності «Динаміка польоту та управління»: матеріали доповідей наук.-техн. конф. «Сергієвські читання». – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – С. 5-7.

Здобувачем доведено, що в математичній моделі збуреного руху танкової гармати достатньо врахування двох перших тонів пружних коливань стволу.

АНОТАЦІЇ

Александрова Т. Є. Структурно-параметричний синтез високоточних цифрових систем наведення і стабілізації танкового озброєння. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2015.

Дисертація присвячена розробці високоточних цифрових систем наведення і стабілізації основного і допоміжного озброєння танків на основі створених математичних моделей збуреного руху об'єктів наведення і ста-

білізації, імітаційних моделей випадкових зовнішніх збурень, що діють на об'єкти стабілізації, а також методики та програмного забезпечення параметричного синтезу складних стохастичних систем. Зроблено висновок про необхідність використання цифрового стабілізатора лазерного променя індикаторного типу з цифровими низькочастотними фільтрами Баттерворта і Ланцоша, з'єднаних за послідовно-паралельною схемою. Розроблено математичну модель збуреного руху танкової гармати як об'єкта стабілізації з урахуванням пружних властивостей створу. Створена імітаційна модель випадкових зовнішніх збурень, що діють на танкову гармату в процесі руху танка по різних ґрунтах. Розроблено методику параметричного синтезу стохастичних систем та створено програмне забезпечення рішення задачі параметричного синтезу. За допомогою розробленого програмного продукту вирішені задачі параметричного синтезу цифрового ПД-стабілізатора, інваріантного стабілізатора, робастного стабілізатора, стабілізатора зі змінною структурою і безплатформенного стабілізатора танкової гармати, а також цифрової широтно-імпульсної системи наведення танкової зенітної установки.

Ключові слова: система наведення і стабілізації, структурно-параметричний синтез, закон керування, математичне моделювання, імітаційне моделювання, ідентифікація математичних моделей, функціонал якості, стохастична оптимізація.

Александрова Т. Е. Структурно-параметрический синтез высокоточных цифровых систем наведения и стабилизации танкового вооружения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015.

Диссертация посвящена разработке высокоточных цифровых систем наведения и стабилизации основного и вспомогательного вооружения танков на основе созданных математических моделей возмущенного движения объектов наведения и стабилизации, имитационных моделей случайных внешних возмущений, действующих на объекты стабилизации, а также методики и программного обеспечения параметрического синтеза сложных стохастических систем. Сделан вывод о необходимости использования цифрового стабилизатора лазерного луча индикаторного типа с цифровыми низькочастотными фильтрами Баттерворта и Ланцоша, соединенных по последовательно-паралельной схеме. Разработана математическая модель возмущенного движения танковой пушки как объекта стабилизации с учетом упругих свойств ствола, решена задача идентификации разработанной математической модели методом сравнения расчетных и экспериментальных данных. Создана имитационная модель случайных внешних возмущений, действующих на танковую пушку в процессе движения танка по различным ґрунтам. В отличие от существующих моделей, полученная модель учитывает криволинейное движение танка

и дискретные препятствия. Разработана методика параметрического синтеза стохастических систем и создано программное обеспечение для решения задачи параметрического синтеза. Решены задачи параметрического синтеза цифрового ПД-стабилизатора, инвариантного стабилизатора, робастного стабилизатора, стабилизатора с переменной структурой и бесплатформенного стабилизатора танковой пушки, а также цифровой широтно-импульсной системы наведения танковой зенитной установки. Доказана работоспособность бесплатформенного стабилизатора танковой пушки, в котором отсутствует гиросtabilizированная платформа, измеряющая угловые отклонения линии прицеливания относительно направления на цель и оси канала ствола танковой пушки относительно линии прицеливания, а вместо измерения указанных величин происходит их вычисление бортовой цифровой вычислительной машиной.

Ключевые слова: система наведения и стабилизации, структурно-параметрический синтез, закон управления, математическое моделирование, имитационное моделирование, идентификация математических моделей, функционал качества, стохастическая оптимизация.

Alexandrova T. Ye. Structural-parametric synthesis of precision digital targeting systems and the stabilize the tank armament. – As manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.13.07 – automation of management processes. – The National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, 2015.

Dissertation is devoted the development of high-precision digital targeting systems and stabilization of the main and auxiliary tank armament based on of created mathematical models of the perturbed motion of objects guidance and stabilization, of simulation models of random external disturbances acting on objects and stabilize, and also the methods and software of parametric synthesis of complex stochastic systems. Conclusion about the necessity of using a digital stabilizer laser beam indicator type digital Butterworth and Lanczos low-pass filters connected in series-parallel circuit. Developed a mathematical model of the perturbed motion object as tank gun of stabilization subject to other properties of the barrel. A simulation model of random external disturbances acting on the tank gun during the movement of the tank on various grounds is created. The technique of parametric synthesis of stochastic systems and software was created for solving the problem of parametric synthesis. With the help of the developed software product solved the problem of parametric synthesis of digital PD-stabilizer invariant stabilizer robust stabilizers, variable structure and strapdown stabilizer tank gun and a digital pulse width guidance system anti-aircraft tank.

Keywords: guidance system and stabilization, structural and parametric synthesis, control law, mathematical modeling, simulation modeling, identification of mathematical models, functional quality, stochastic optimization.