УДК 621

В.Г. ЦІРУК
ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»

# МАТЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДЕМПФУВАННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРИ ПОСТРІЛІ

*Приладові комплекси стабілізаторів озброєння використовуються при модернізації дійсних та при розробці нових легких броньованих бойових машин БТР, БМП, БМД та інших модифікацій. Вони призначені для стабілізованого наведення і супроводу у горизонтальній та вертикальній площинах наземних, повітряних і надводних цілей для ефективної стрільби з місця, на ходу і на плаву. Використання сучасної елементної бази дозволило значно покращити характеристики всього комплексу стабілізатора озброєння. По технічним характеристикам стабілізатора озброєння розширює бойові можливості бронетехніки за рахунок більш точного наведення і стабілізації на ціль, полегшує можливості екіпажу по управлінню баштою, а також не вимагає перенаведення на ту ж ціль після пострілу.*

*У статті розглянуто алгоритм, що застосовується при коригуванні положення гармати відносно цілі при швидкому сумісному русі башти та машини. Алгоритм обраховується у математичному блоці системи стабілізації.*

*Виведено формулу в аналітичному вигляді для подальшого її застосування в математичних блоках системи стабілізації.*

*У висновках проаналізовані результати та надані рекомендації щодо застосування алгоритму.*

*Ключові слова: стабілізатор озброєння; положення об'єкту; точність позиціонування.*

В.Г ЦИРУК
ПАО «НПО «Киевский завод автоматики»

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕМПФИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

*Приборные комплексы стабилизаторов вооружения используются при модернизации существующих и при разработке новых легких бронированных боевых машин БТР, БМП, БМД и других модификаций. Они предназначены для стабилизированного наведения и сопровождения в горизонтальной и вертикальной плоскостях наземных, воздушных и надводных целей для эффективной стрельбы с места, на ходу и на плаву. Использование современной элементной базы позволило значительно улучшить характеристики всего комплекса стабилизатора вооружения. По техническим характеристикам стабилизатор вооружения расширяет боевые возможности бронетехники за счет более точного наведения и стабилизации на цель, облегчает возможности экипажа по управлению башней, а также не требует перенаведения на ту же цель после выстрела.*

*В статье рассмотрен алгоритм, применяемый при корректировке положения орудия относительно цели при быстром совместном движении башни и машины. Алгоритм рассчитывается в математическом блоке системы стабилизации.*

*Выведена формула в аналитическом виде для дальнейшего ее применения в математических блоках системы стабилизации.*

*В выводах проанализированы результаты и даны рекомендации по применению алгоритма.*

*Ключевые слова: стабилизатор вооружения; положение объекта; точность позиционирования.*

V.G. TSIRUK
PJSC «NPO «Kiev Automation Plant»

## MATHEMATICAL CALCULATION OF DAMPING OF THE STABILIZATION SYSTEM DURING THE SHOT

*Instrumentation complexes of weapon stabilizers are used for modernization of the existing and light armored combat vehicles BTR, BMP, BMD and other modifications. They are designed for stabilized guidance and escort in horizontal and vertical planes of ground, air and surface targets for effective firing from the place, during the fly and at the sea. The use of a modern element base has made it possible to significantly improve the characteristics of the whole complex of the armament stabilizer. According to the technical characteristics of the weapon stabilizer, the combat capabilities of armored vehicles are expanded by more accurate targeting and*

*stabilization on the target, facilitating the ability of the crew to control the tower, and also does not require a redirection to the same target after the shot.*

*The article deals with the algorithm used in adjusting the position of the gun relative to the target with the rapid joint movement of the tower and the machine. The algorithm is calculated in the mathematical block of the stabilization system.*

*The formula is derived in an analytical form for further application in mathematical blocks of the stabilization system.*

*The conclusions analyzed the results and provided recommendations for the application of the algorithm.*

*Keywords: armament stabilizer; position of the object; positioning accuracy.*

**Постановка проблеми**

Системи стабілізації різних видів застосовуються сьогодні у навігаційних пристроях і системах управління кораблів, літальних апаратів, автомобілів, а також у системах орієнтації антен, телескопів та інших приладів, встановлених на рухомих об'єктах. У зв'язку з тим, що необхідна точність подібних пристроїв безперервно підвищується, ростуть і вимоги по точності, що пред'являються до комплексів стабілізації.

В умовах проведення антитерористичної операції на сході України надзвичайно актуальними є роботи, присвячені підвищенню обороноздатності держави.

Одним із способів поліпшення точнісних характеристик стабілізатора озброєння легкоброньованої техніки (ЛБТ) під час швидкого руху башти та самого бронетранспортеру є метод математичного коригування положення гармати відносно вказаної цілі.

Стабілізатор озброєння являє собою пристрій, що здійснює стабілізацію прицілювання зброї при переміщенні платформи, на якій цю зброю встановлено. Стабілізатор озброєння призначений для спрощення прицілювання при русі ЛБТ і підвищення точності в бою, є частиною системи керування вогнем. Технічно стабілізатор являє собою набір датчиків і обчислювальний комплекс, з'єднаний з приводом гармати.

Існуючі системи стабілізації не можуть сьогодні достатньо ефективно виконувати поставлені перед ними завдання. За досвідом воєнних конфліктів, найбільша частина втрат парку броньованих машин є наслідком використання малоефективних систем стабілізації озброєння. Тому забезпечення покращення експлуатаційних характеристик комплексу стабілізації озброєння ЛБТ є найважливішою проблемою сучасності, вирішення якої забезпечує навігаційну безпеку України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Завдання керування вирішуються шляхом створення теорії систем наведення та стабілізації. Теорія проектування програмних систем наведення та стабілізації розроблена видатними вченими Бабаевим А.А., Бесекерским В.А., Булгаковим Б.А.; теорія лінійних і нелінійних систем наведення розроблена Костюком В.І., Вороновим А.А., Солодовниковим В.В., Чемодановим Б.К., Лакотой Н.А.

Досягнення високої точності комплексів стабілізації (КС) стало можливим сьогодні завдяки високій якості сучасних елементів гіроскопічної техніки і значного розвитку теорії гіроскопічних пристроїв працями найвизначніших вчених-математиків і механіків: А.Н. Крипова, Б.В. Булгакова, О.Ю. Ішлінського, Я.М. Ройтенберга, С.С. Рівкіна, В. А. Павлова, Е. Г. Попова, А. І. Лур'є, В.В. Солодовнікова та інших. Провідну роль мають і досягнення у галузі інерціальних систем навігації (ІНС) та чутливих елементів ІНС,висвітлених у наукових працях школи видатних вчених НТУУ «КПІ» Юдинцова А.А., Павловського М.А., Збруцького О.В., Самотокіна Б.Б., Карачуна В.В., Рижкова Л.М. та інших. Питання метрології, корисні при дослідженнях похибок чутливих елементів комплексів стабілізації, широко висвітлені у роботах Короткова В.П., Новицького П.В.,Бичківського Р.В. та інших.

**Формулювання мети дослідження**

Будь-який розрахунок фізичних процесів у конструкціях (механічних, електричних, теплових) або процесів іншої фізичної природи завжди супроводжується рядом спрощень. При розрахунках процесів у складних конструкціях системи ударо- і віброзахисту (СУВ) ці спрощення насамперед стосуються форми конструкцій.

У розрахунку, як правило, не враховуються дрібні деталі конструкції. Окремі масивні деталі або вузли розглядаються як недеформовані елементи конструкцій, тобто сконцентровані маси, а деталі типу пружин вважаються пружними безінерційними елементами. У кінцевому результаті маємо спрощену розрахункову модель конструкції. Спрощення завжди вносять у розрахунок неконтрольовані похибки, які можна оцінити лише приблизно. З іншого боку, чим простіша розрахункова модель, тим простіше сам розрахунок . Для простих розрахункових моделей можна отримати аналітичне вирішення задачі.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Гасіння коливань за допомогою в'язкого тертя називають демпфуванням, а пристрої для гасіння вібрації - демпферами. Добре відомі демпфери з в'язкою рідиною - зазвичай маслом. Такі демпфери часто

застосовуються у транспортних засобах (в т.ч. ЛБТ). При русі поршня у них в'язка рідина перетікає з однієї частини циліндра в іншу через отвір у поршні і гальмує рух поршня. Дію таких демпферів доводиться враховувати при розрахунках вібрацій КС, який встановлюється на СУВ ЛБТ.

Безпосередньо в СУВ часто застосовуються повітряні демпфери, в яких використовується гальмівна дія повітря. Роль демпфера виконує гумова порожнина, наповнена повітрям. При коливаннях обсяг порожнини змінюється. Повітря частково стискається і розширюється, а частково перетікає у верхню частину порожнини і назад. У результаті виникає опір руху, пропорційний швидкості руху.

При графічному зображенні розрахункових моделей з в'язким тертям демпфер зображується у вигляді циліндра з поршнем *μ*. Сила опору пропорційна швидкості:

$$F_\beta = -\mu \frac{du}{dt} \ , \tag{1}$$

де μ – коефіцієнт в'язкості демпфера.

В окремому випадку пружинного маятника при використанні моделі Фохта μ – коефіцієнт в'язкості матеріалу пружини.

Розглянемо задачу про власні коливання пружинного маятника з втратами енергії у пружині у вигляді в'язкості. Рівняння коливання набуде вигляду:

$$-cu - \mu \frac{du}{dt} = m \frac{d^2u}{dt^2} \tag{2}$$

Знайдемо розв'язок рівняння у вигляді синусоїди, амплітуда якої експоненціально спадає у часі:

$$u = \exp(-\eta t)(A\sin\omega t + B\cos\omega t) \tag{3}$$

Підставимо розв'язок (2) у рівняння (3). Після скорочення на *exp(-ηt)* отримаємо:

$$\begin{aligned} &c(A\sin\omega t + B\cos\omega t) - \mu\eta(A\sin\omega t + B\cos\omega t) + \\ &+ \mu\omega(A\cos\omega t - B\sin\omega t) + m\eta^2(A\sin\omega t + B\cos\omega t) - \\ &- 2m\eta\omega(A\cos\omega t - B\sin\omega t) - m\omega^2(A\sin\omega t + B\cos\omega t) = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

Щоб виконувалась рівність (4), необхідно виконати дві умови:

$$\begin{aligned} c - \mu\eta + m\eta^2 - m\omega^2 &= 0 \\ \mu - 2m\eta &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

З другого рівняння отримаємо:

$$\eta = \mu / 2m \tag{6}$$

Підставивши (6) у (5), отримаємо:

$$c - \frac{\mu^2}{2m} + \frac{\mu^2}{4m} - m\omega^2 = 0 \tag{7}$$

Звідси $\omega^2 = \frac{c}{m} - \frac{\mu^2}{4m^2}$, $\omega = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{\mu^2}{4m}}$, або $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \eta^2}$ (8), де $\omega_0$ – частота власних коливань при $\eta=0$.

Таким чином при наявності в'язкості частота власних коливань дещо зменшується. Загальний розв'язок (2) матиме вигляд:

$$u = \exp\left(-\frac{\mu t}{2m}\right)\left(A\sin t\sqrt{\omega_0 - \eta^2} + B\cos t\sqrt{\omega_0^2 - \eta^2}\right) \tag{9}$$

Постійні *A* і *B* визначаються з початкових умов.

Важливим є те, що амплітуда коливань експоненціальна і спадає. Через період коливань *T* амплітуда зменшується у exp*(μπ/mω)* разів. Ця величина не залежить від часу, тобто у всьому процесі коливань відношення двох сусідніх амплітуд є величиною постійною. Натуральний логарифм цієї величини називається логарифмічним декрементом затухання коливань:

$$\delta = \frac{\mu\pi}{m\omega} = \frac{\mu\pi}{\sqrt{c - \frac{\mu^2}{2m}}} \approx \frac{\mu\pi}{\sqrt{c}} \tag{10}$$

Зазвичай $\eta^2 << \omega_0$. Однак, якщо коефіцієнт в'язкості настільки великий, що під коренем у виразі (8) виходить уявна величина, тобто $\frac{\mu^2}{4m^2} > \frac{c}{m}$, то коливання «зриваються» і блок із початкового положення по експоненті наближається до стану рівноваги з однієї сторони, не проходячи через нього.

Втрати енергії на внутрішнє тертя призводять до того, що при резонансі амплітуда коливань не зростає до нескінченності, а стабілізується на якомусь рівні. У загальному вигляді рівняння, що описує коливання системи з одним ступенем свободи з урахуванням в'язкого тертя при заданому збуренні $u_к$ вібростенда, записується наступним чином:

$$c(u_к - u) - \mu\frac{du}{dt} = m\frac{d^2u}{dt^2} \tag{11}$$

Розглянемо розв'язок рівняння (11) для випадку, коли збурення задано синусоїдальним законом. У цьому випадку рівняння має вигляд:

$$m\frac{d^2u}{dt^2} + \mu\frac{du}{dt} + cu = cU_к \sin\omega t \tag{12}$$

Загальний розв'язок неоднорідного рівняння (12), як згадувалось вище, складається із загального розв'язку однорідного рівняння і часткового розв'язку неоднорідного рівняння. Загальний розв'язок будемо шукати у вигляді:

$$u_{об} = C_1 \exp\alpha_1 t + C_2 \exp\alpha_2 t \tag{13}$$

де $\alpha_1, \alpha_2$ - корінні характеристичного рівняння

$$m\alpha^2 + \mu\alpha + c = 0 \tag{14}$$

$C_1$, $C_2$ - постійні інтегрування, які визначаються з початкових умов.

З (14) отримуємо $\alpha_1 = -\beta + i\omega$, $\alpha_2 = -\beta - j\omega$, де $\beta = \mu/2m$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ - частота власних коливань з врахуванням в'язкості. Тоді

$$u_{об} = \exp(-\beta t)(C_1 \exp(j\omega t)) + C_2 \exp(-j\omega t)) \tag{15}$$

Частковий розв'язок неординарного рівняння шукаємо у вигляді

$$u_ч = A\sin\omega_к t + B\cos\omega_к t \tag{16}$$

Постійні $A$ та $B$ визначаємо, підставляючи (16) у (12), після чого отримуємо два рівняння:

$$\begin{aligned} &-mA\omega_к^2 - uB\omega_к + cA = cU_к \\ &-m\omega_к^2 B + \mu A\omega_к + cB = 0, \end{aligned} \tag{17}$$

розв'язуючи які, знаходимо:

$$\begin{aligned} A &= \frac{cU_к(c - m\omega_к^2)}{(c - m\omega_к^2)^2 + \mu^2\omega_к^2}, \\ B &= -\frac{\mu\omega_к cU_к}{(c - m\omega_к^2)^2 + \mu^2\omega_к^2}. \end{aligned} \tag{18}$$

У кінцевому результаті отримуємо загальний розв'язок у вигляді

$$u = \exp(-\beta t)(C_1 \exp(j\omega t) + C_2 \exp(-j\omega t)) + A\sin\omega_к t + B\cos\omega_к t$$

або після перетворення

$$u = \exp(-\beta t)(C_1 \exp(j\omega t) + C_2 \exp(-j\omega t)) + U_к \sin(\omega_к t + \phi), \tag{19}$$

де $\phi = arctg\dfrac{B}{A} = arctg\left(-\mu\omega_к / m\left(\omega_0^2 - \omega_к^2\right)\right)$ - кут зсуву фази (20)

$$U = \sqrt{A^2 + B^2} = U_к / \sqrt{1/\left(1 - \omega_к^2/\omega_0^2\right)^2 + 4\beta\omega_к^2/\omega_0^4} \tag{21}$$

$\omega_0^2 = c/m$ - власна частота коливань без врахування в'язкості.

Величина $x = \dfrac{U}{U_к} = \sqrt{1/\left[\left(1 - \dfrac{\omega_к^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \dfrac{4\beta\omega_к^2}{\omega_0^4}\right]}$ (22)

характеризує залежність амплітуди вимушених коливань маси від співвідношення частот.

**Висновки**

1. Проаналізовано існуючі види систем стабілізації та фактори, що впливають на їх точність, а саме – збурення, пов'язані із зовнішнім моментом тертя і з обкаткою двигунів.

2. Визначено вимоги до частотних характеристик приладового комплексу стабілізатора озброєння ЛБТ. Встановлено, що кутові швидкості і прискорення, які повинна відпрацьовувати система стабілізації, значною мірою визначають досяжну точність стабілізації. Розроблено метод формування частотних характеристик системи стабілізації відповідно до необхідного запасу стійкості.

3. Розглянуто та обрано основні складові конструкційні елементи системи ударо- і віброзахисту (СУВ) КС. Проведено моделювання роботи нової СУВ та встановлено, що використання методу каскадного синтезу нелінійних законів управління дозволяє звести до мінімуму вплив зовнішніх збурень на КС. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень СУВ. Розроблено новий вимірювач кута для виставлення осі чутливості датчиків для вимірювання основних параметрів КС.

4. Розглянуто основні похибки КС ЛБТ (похибки при качанні за відсутності тертя на осі стабілізації; похибки стабілізації, зумовлені моментом сухого тертя; похибки від впливу люфту редуктора та інші). Запропоновано методи структурної та параметричної оптимізації для забезпечення заданої максимально можливої точності КС ЛБТ.

**Список використаної літератури**


1. Bezvesilna O. Introducing the principle of constructing an aviation gravimetric system with any type of gravimeter / O. Bezvesilna, A.Tkachuk, T. Khylchenko, S. Nechai // EastemEuropean Journal of Enterprise Technologies. - 2017. - №1/7 (85). - P.45-56.
2. Bezvesilna O. Two-channel MEMS gravimeter of the automated aircraft gravimetric system / O. Bezvesilna, A.Tkachuk, T. Khylchenko, M. Kachniarz, I. Korobiichuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2017. - №543. - P.481-487.
3. Bezvesilna O. Artificial neural network as a basic element of the automated goniometric system / O. Bezvesilna, I. Cherepanska, A. Sazonov // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2017. - №543. - P. 43-51.
4. Koval A. Mobile wireless system for outdoor air quality monitoring / A. Koval, E. Irigoyen // Advances in Intelligent Systems and Computing. - 2017. I - №527. - P.345-354.
5. Безвесільна О.М. Розрахунок пружного модуля системи ударо- і віброзахисту стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Ю.В. Киричук // Вісник інженерної академії наук України. - 2016. - №2. - С. 51-57.
6. Безвесільна О.М. Алгоритмічний метод підвищення точності вимірювачів лінійних прискорень стабілізатора / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, О.В. Кравцов, М.П. Туленко // Вісник інженерної академії наук України. - 2016. - №2. - С. 58-63
7. Безвесільна О.М. Розробка нового методу визначення параметрів налаштування регулятора для керування об'єктами високих порядків / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, С.С. Свістельник, М.В. Богдановський // Вісник інженерної академії наук України. - 2016. - №3. - С. 41-47.