

ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ РОЗІМКНЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З ГІДРОПРИВОДОМ

У статті виведена передавальна функція системи автоматичного управління з гідроциліндрами в якості виконавчого пристрою. Необхідність отримання моделі пов'язана з синтезом одного з каналів системи.

Загальна система автоматичного управління містить декілька каналів управління. Систему побудовано для специфічного об'єкта. Це уніфікована стабілізаційна платформа нетипового вогневого засобу на високомобільній транспортній базі. Одним з завдань системи автоматичного управління є компенсація впливу від застосування вогневого засобу. Управління відбувається відповідно до математичної моделі об'єкту вогневий засіб – транспортний засіб. Синтез каналів зі зворотнім зв'язком, які присутні в системі, в роботі не розглядається. Основна увага приділяється моделюванню процесів у канал без зворотного зв'язку. Такий варіант побудови (каналу системи автоматичного управління) та вибір виконавчого пристрою обумовлений типом зовнішнього впливу на об'єкт управління (короткотривалий імпульс високої інтенсивності).

Математичне моделювання основних компонентів розімкненої системи: джерела сигналу управління, електромагнітного клапана та гідроциліндра проведено з урахуванням процесів, які відбуваються в елементах системи.

На основі передавальних функцій окремих компонент визначено загальну передавальну функцію системи (каналу управління). Додатково враховано інерційні характеристики, що виникають через масу рухомих частин (поршня, штока, навантаження), демпфуючі фактори та гідравлічну динаміку. В результаті отримано уточнену математичну модель системи автоматичного управління із гідроприводом, що відображає динамічні властивості системи з урахуванням реальних фізичних процесів.

Запропонований підхід може бути використаний для подальшого аналізу стійкості та якості керування гідроприводами в промислових і транспортних застосуваннях.

Ключові слова: канал управління, система автоматичного управління, передавальна функція, зворотній зв'язок, виконавчий пристрій, гідросистема, вогневий засіб, транспортна база.

Постановка задачі у загальному вигляді. Системи автоматичного управління (САУ) із гідроприводами широко застосовуються в промислових, транспортних і мехатронних комплексах, де необхідне регулювання положення [1], швидкості або зусилля виконавчих механізмів. Високі динамічні характеристики гідравлічних систем роблять їх незамінними у важких умовах експлуатації. Проте такі системи мають низку особливостей, які ускладнюють процес синтезу алгоритмів управління, зокрема: наявність нелінійних та інерційних ефектів у гідравлічному середовищі; залежність динаміки виконавчого механізму від гідродинамічних процесів у приводі; вплив параметрів клапанної апаратури та характеристик робочої рідини на загальну динаміку системи [2].

Ключовим етапом розробки ефективних алгоритмів управління є побудова адекватної математичної моделі, що описує динаміку об'єкта управління. У даній роботі поставлено задачу виведення передавальної функції САУ із гідроприводом, що дозволяє формалізувати залежність між впливом управління і вихідними координатами виконавчого пристрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи автоматичного управління з гідроприводами є об'єктом численних досліджень, спрямованих на підвищення їх ефективності, надійності та адаптивності до сучасних вимог. Останні публікації висвітлюють різні аспекти розвитку та вдосконалення таких систем.

В роботі [3] досліджується впровадження алгоритмів штучного інтелекту для прогнозованого технічного обслуговування гідравлічних систем, що підвищує їх надійність та продовжує термін служби обладнання. У статті [4] отримано математичну модель гідроциліндра та проаналізовано параметри, що суттєво впливають на динаміку роботи гідроциліндра у період його пуску. У роботі [5] було розроблено розрахункову схему автоматичного регулятора насоса змінної продуктивності, який забезпечує стабілізацію витрати та роботу насоса з постійною потужністю. Викладено методику динамічного синтезу електрогідравлічного слідкуючого приводу для забезпечення заданої швидкодії та форми перехідного процесу і точності позиціонування робочого органу [6].

У дослідженнях автоматичної системи регулювання рівня води проаналізовано об'єкт регулювання, умови його роботи та основні збурення. Сформульовано вимоги до системи автоматичного регулювання та вибрано принципи регулювання для покращення її властивостей [7].

Автоматизацію процесів керування технологічним обладнанням з гідроприводом обертального руху представлено в [8, 9], де розглянуто можливості розширення функціональних можливостей та покращення динамічних характеристик технологічного обладнання з гідроприводом обертального руху шляхом розробки та застосування САУ.

Метою статті є отримання передавальної функції системи автоматичного керування із гідроциліндром в якості виконавчого пристрою, з урахуванням основних динамічних характеристик її елементів. Це дозволить формалізувати математичну модель системи, провести аналіз її стійкості, динамічних властивостей та оцінити ефективності процесу управління.

Виклад основного матеріалу.

Загальна структура системи управління об'єктом вогневий засіб – транспортний засіб (ВЗ-ТЗ) представлена на рис.1. Блок датчиків об'єднує в собі вимірювальні та задаючі датчики всіх контурів керування САУ (інерційні вимірювачі, приймач супутникових сигналів системи GPS, статичні та динамічні датчики, датчики кутів, тощо).

В якості бортового обчислювача використано мікропроцесорну систему, в пам'яті якої закладено математичні моделі різних типів ВЗ та коливальних властивостей підресорної частини ТЗ.

На систему покладається два основних завдання, а саме: приведення об'єкту ТЗ-ВЗ в бойову готовність та компенсація збурювальної дії ВЗ на транспортну базу.

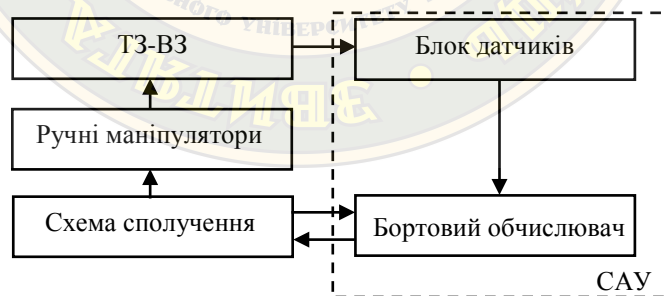


Рисунок 1 – Структура системи управління ТЗ-ВЗ

На систему покладається два основних завдання, а саме: приведення об'єкту ТЗ-ВЗ в бойову готовність та компенсація збурювальної дії ВЗ на транспортну базу.

Для вирішення цих завдань до складу САУ введено декілька контурів управління:

замкненого типу (горизонтування платформи на зупинці ТЗ);

розімкненого типу (відпрацювання сигналу управління вбудованого обчислювача з компенсації впливу ВЗ).

Синтез САУ замкненого типу широко представлено в науковій літературі і в даній роботі не розглядається.

Завдання іншого контуру – сформувати компенсаційний вплив на відкат при веденні вогню з урахуванням типу ВЗ, коливальних властивостей ТЗ, кута місця та кута за азимутом відносно поздовжньої осі ТЗ.

В роботі розглядається питання отримання передавальної функції розімкненого контуру САУ.

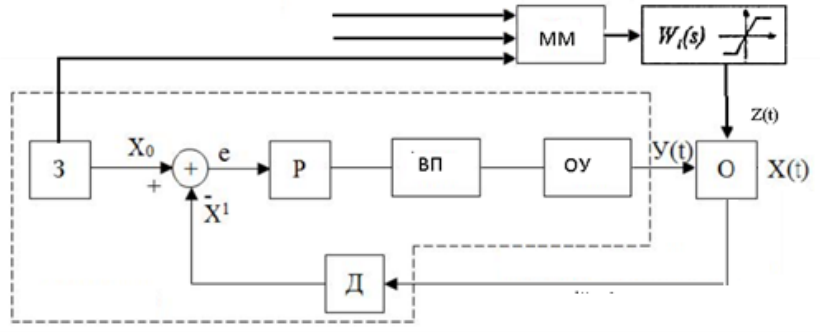


Рисунок 2 – Функціональна схема САУ

На рис.2 позначено: X_0 – сигнал інформації управління (в аналоговому або цифровому вигляді); Д – датчик; Р – регулятор [10]; ВП – виконавчий пристрій в замкненому контурі ОУ – орган управління; О – об’єкт регулювання [11]; $Y(t)$ – вплив управління; $Z(t)$ – сигнал збудження від пострілу; $X(t)$ – параметр регулювання; X_1 – сигнал на виході датчика; e – похибка; ММ – математична модель підресорної частини транспортної бази та ВЗ; $W_1(s)$ – передавальна функція виконавчого пристрою з обмеженням.

У розімкненій САУ вихід (положення поршня $x(t)$) не впливає на вхід (сигнал управління $u(t)$), тобто тривалість сигналу управління напряму визначає рух поршня.

Вважаємо, що час дії сигналу t лінійно пов’язаний з довжиною ходу $x(t)$, ($x(t)=K \cdot t$, де K – коефіцієнт пропорційності). Це вказує на інтегральний характер системи, яку плануємо створити.

Типова гідросистема включає:

джерело сигналу управління (спеціалізований обчислювач, контролер);

електромагнітний клапан управління дроселем;

гідроциліндр (виконавчий механізм).

Для синтезу САУ потрібно представити кожен елемент системи у вигляді передавальної функції $W(s)$. У системі автоматичного управління, загальна передавальна функція $W(s)$ є добутком передавальних функцій усіх її елементів (електромагнітний клапан, дросель (золотник), гідроциліндр) [12].

Джерело керуючого сигналу може бути представлено лінійною ланкою з певним коефіцієнтом підсилення.

Сигнал управління від спеціального обчислювача $u(t)$ подається без затримок та фільтрації. Отже, передавальна функція цієї ланки $W_1(s)$ має вид:

$$W_1(s) = K_u,$$

де K_u – коефіцієнт пропорційності.

Електромагнітний клапан забезпечує перетворення електричного сигналу певної тривалості t ($u(t)$) у витрату робочої рідини гідравлічної системи $Q(t)$. Зазвичай, через інерційність, електромагнітний клапан описується як система першого порядку:

$$Q(t) + \tau \dot{Q}(t) = K_v u(t),$$

де: K_v – коефіцієнт пропорційності електромагнітного клапана ($\text{м}^3/\text{сВ}$);

τ – стала часу клапана.

У S області передавальна функція електромагнітного клапана $W_2(s)$ має вид:

$$W_2(s) = \frac{Q(s)}{U(s)} = \frac{K_v}{1+\tau s}. \quad (1)$$

Гідроциліндр перетворює витрату рідини гідравлічної системи $Q(s)$ у положення поршня $x(t)$.

Для спрощеної моделі:

$$x(t) = \frac{Q(t)}{A},$$

У S області:

$$sX(s) = \frac{Q(s)}{A},$$

$$W_3(s) = \frac{X(s)}{Q(s)} = \frac{1}{As}.$$

Це інтегруюча ланка, що узгоджується з лінійною залежністю ходу поршня виконавчого пристрою від тривалості сигналу управління, адже інтеграл від постійного сигналу пропорційний часу.

Загальна передавальна функція $W(s)$ (добуток передавальних функцій елементів системи):

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s)$$

$$W(s) = K_u \cdot \frac{K_v}{1 + \tau s} \cdot \frac{1}{As}.$$

Після перетворення:

$$W(s) = \frac{K}{s(1+\tau s)}. \quad (2)$$

де: $K = \frac{K_u K_v}{A}$ – загальний коефіцієнт підсилення, s (у знаменнику) – інтегральна складова, $1 + \tau s$ – характеризує аперіодичну затримку електромагнітного клапана управління дроселем.

Вираз (2) передавальної функції характеризує ідеалі, які обумовлені масою рухомих частин (поршень, шток, навантаження), а також гідравлічною динамікою.

Якщо враховувати інерційні властивості системи, то рівняння руху поршня гідроциліндра має вид:

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) = F(t),$$

де m – маса рухомих частин, b – коефіцієнт в'язкого демпфування, x'' , x' – прискорення та швидкість зміщення поршня.

Сила F , що діє на поршень з площею перетину A , пропорційна тиску P та спричиняє рух:

$$F(t) = P(t)A,$$

Рівняння руху в частотній області матиме вид:

$$ms^2X(s) + bsX(s) = P(s)A. \quad (3)$$

а сила:

$$F(s) = P(s)A.$$

Витрата рідини $Q(t)$ пов'язана зі швидкістю руху поршня $\dot{x}(t)$:

$$Q(t) = A\dot{x}(t) + \frac{V}{B}P(t),$$

де B – модуль пружності рідини (Па). Якщо вважати що рідина не стискається ($B \rightarrow \infty$), то:

$$Q(t) = A\dot{x}(t).$$

Зважаючи на (1), витрата рідини $Q(s)$ та сигнал управління $U(s)$ для клапана пов'язані виразом:

$$Q_k(s) = \frac{K_v}{1 + \tau s} U(s);$$

Для гідроциліндра:

$$Q_{ц}(s) = AsX(s), \quad (4)$$

Тиск $P(s)$ пов'язаний з витратами рідини $Q_{ц}(s)$ через гідравлічний опір R :

$$P(s) = Q_{ц}(s)R.$$

Тоді (3):

$$ms^2X(s) + bsX(s) = Q_{ц}(s)RA.$$

Підставимо значення витрат рідини в гідроциліндрі $Q_{ц}(s)$ (4):

$$ms^2X(s) + bsX(s) = RA(AsX(s)),$$

або:

$$ms^2X(s) + bsX(s) = RA^2sX(s). \quad (5)$$

Отримане рівняння (5) є рівнянням вільного руху.

Електромагнітний клапан управління дроселем та гідроциліндр є складовими однієї системи, а отже :

$$Q_k(s) = Q_{ц}(s)$$

$$AsX(s) = \frac{K_v}{1 + \tau s} U(s), \quad (6)$$

Припустимо $P(s)A = K_f Q_{ц}(s)$, де K_f – коефіцієнт перетворення витрат в силу. Тоді (3) матиме вид:

$$ms^2X(s) + bsX(s) = K_f Q_{ц}(s),$$

З врахуванням $Q_{ц}(s)$ (4):

$$ms^2X(s) + bsX(s) = K_f AsX(s).$$

Підставимо вираз $Q_k(s)$ з (6):

$$ms^2X(s) + bsX(s) = K_f \frac{K_v}{1 + \tau s} U(s).$$

Передавальна функція має вигляд:

$$X(s)(ms^2 + bs) = \frac{K_f K_v}{1 + \tau s} U(s),$$

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_f K_v}{(ms^2 + bs)(1 + \tau s)}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$W(s) = \frac{K_f K_v}{m\tau s^3 + (m + b\tau)s^2 + bs}.$$

Таким чином, отримано передавальну функцію розімкненого каналу САУ з врахуванням інерційності елементів. Це система третього порядку, де $m\tau s^3$ – інерція з врахуванням затримки клапана, $(m + b\tau)s^2$ – комбінація інерції та демпфування, bs – демпфування, τ – затримка клапана.

Висновки. У статті, на основі аналізу фізичних процесів і математичного моделювання основних компонент розімкненої системи автоматичного управління (джерела сигналу управління, електромагнітного клапана та гідроциліндра) отримано загальну передавальну функцію, яка враховує не лише динамічні характеристики кожного елемента, але й інерційні властивості цих елементів.

Особливу увагу приділено врахуванню реальних фізичних факторів, таких як: інерційність рухомих частин (поршня, штока, навантаження), демпфуючі ефекти та гідравлічна динаміка, що забезпечило уточнення моделі та підвищення її відповідності реальним умовам експлуатації. Отримана передавальна функція системи є важливим інструментом для подальшого аналізу стійкості, перехідних процесів та якості управління гідроприводами.

Запропонований підхід до моделювання має практичну цінність, оскільки може бути адаптований для проектування та оптимізації систем автоматичного управління в промислових і транспортних застосуваннях. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на експериментальну верифікацію моделі та розробку алгоритмів адаптивного керування для підвищення ефективності роботи гідроприводів у змінних умовах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wrat, G., Ranjan, P., Bholra, M., Mishra, S. K. and Das, J. (2019), "Position control and performance analysis of hydraulic system using two pumpcontrolling strategies". [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers], Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 233(9), 1093-1105.
2. Minav, T., Laurila, L., and Pyrhönen, J. (2013), "Relative position control in an electro-hydraulic forklift". International Review of Automatic Control, 6(1), 54-61.
3. Буренніков Ю. А., Козлов Л. Г., Репінський С. В. Вибір параметрів системи керування гідроприводомз насосом змінної продуктивності на основі дослідження його стійкості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВПІ, 2006. № 6. С. 211-217.
4. Міщук Д. О. Дослідження динамічної моделі гідравлічного циліндра об'ємного гідроприводу. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: всеукр. зб. наук. праць*. Київ: КНУБА, 2016. Вип. 87. С. 74-81.
5. Буренніков Ю. А., Козлов Л. Г., Репінський С. В. Вибір параметрів системи керування гідроприводомз насосом змінної продуктивності на основі дослідження його стійкості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВПІ, 2006. № 6. С. 211-217.
6. Крутіков Г. А., Стрижак М. Г. Синтез параметрів електрогідравлічного слідкуючого привода виходячи з заданої точності позиціонування робочого органа, швидкодії і характеру перехідного

процесу. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Харків: ХПІ, 2022. №2. С. 35-40. DOI 10.20998/2079-0775.2022.2.04

7. Маловичко В. К., Брунеткін О. І. Дослідження автоматичної системи регулювання рівня води в групі підігрівачів високого тиску. *Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*. К.: ТНУ імені В.І. Вернадського, 2021. №3 Том 32(71) С. 117-122.

DOI 10.32838/2663-5941/2021.3/19

8. Голубенко О. Л., Романченко О. В., Соколов В. І., Степанова О. Г. Методика проектного розрахунку автоматичного електрогідравлічного приводу обертального руху та об'ємного регулювання. *Вісник східноукраїнського національного університету*. К.: ВСУ імені Володимира Даля, 2022. №2(272) С. 15-22. DOI 10.33216/1998-7927-2022-272-2-15-22

9. Bezuhlyi, V., Oliynyk, V., Romanenko I., Zhuk, O., Kuzavkov, V., Borysov, O., Korobchenko, S., Ostapchuk, E., Davydenko, T., and Shyshatskyi, A. (2021). "Development of object state estimation method in intelligent decision support systems". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (113), 54-64. DOI 10.15587/1729-4061.2021.239854

10. Гостев В.І., Кузавков В.В. Параметричний синтез цифрових псевдолінійних коригувальних пристроїв Том 29, Випуски 2-3, 1997, С. 133-136 DOI 10.1615/JAutomatInfScien.v29.i2-3.170

11. Кузавков, В., Поляк, І. Аналіз транспортної бази для встановлення стабілізованої платформи нетипової артилерійської системи. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 2023, (50), С. 15-20. DOI 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-02

12. Qiu, Hanyu, and Qi, Su. (2021), "Simulation Research of Hydraulic Stepper Drive Technology Based on High Speed On/Off Valves and Miniature Plunger Cylinders". *Micromachines* 12.4, 438. DOI 10.3390/mi12040438.

REFERENCES:

1. Wrata, G., Ranjan, P., Bhola, M., Mishra, S. K. and Das, J. (2019), "Position control and performance analysis of hydraulic system using two pumpcontrolling strategies". [Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers], Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 233(9), 1093-1105.

2. Minav, T., Laurila, L., and Pyrhönen, J. (2013), "Relative position control in an electro-hydraulic forklift". *International Review of Automatic Control*, 6(1), 54-61.

3. Buriennikov Yu. A., Kozlov L. H., Repinskyi S. V. Vybir parametriv systemy keruvannya hidropryvodomz nasosom zminnoi produktyvnosti na osnovi doslidzhennia yoho stiikosti. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. Vinnytsia: VPI, 2006. № 6. S. 211-217.

4. Mishchuk D. O. Doslidzhennia dynamichnoi modeli hidravlichnoho tsylindra obiemnoho hidropryvodu. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny: vseukr. zb. nauk. prats.* Kyiv: KNUBA, 2016. Vyp. 87. S. 74-81.

5. Buriennikov Yu. A., Kozlov L. H., Repinskyi S. V. Vybir parametriv systemy keruvannya hidropryvodomz nasosom zminnoi produktyvnosti na osnovi doslidzhennia yoho stiikosti. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. Vinnytsia: VPI, 2006. № 6. S. 211-217.

6. Krutikov H. A., Stryzhak M. H. Syntez parametriv elektrohivavlichnoho slidkuiuchoho pryvoda vykhodiachy z zadanoi tochnosti pozytsiuvannya robochoho orhana, shvydkodii i kharakteru perekhidnoho protsesu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*. Kharkiv: KhPI, 2022. №2. S. 35-40. DOI 10.20998/2079-0775.2022.2.04

7. Malovychko V. K., Brunetkin O. I. Doslidzhennia avtomatychnoi systemy rehuliuвання rivnia vody v hrupi pidihrivachiv vysokoho tysku. *Informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia*. К.: ТНУ імені В.І. Вернадського, 2021. №3 Том 32(71) С. 117-122. DOI 10.32838/2663-5941/2021.3/19

8. Holubenko O. L., Romanchenko O. V., Sokolov V. I., Stepanova O. H. Metodyka proektnoho rozrakhunku avtomatychnoho elektrohivavlichnoho pryvodu obertalnoho rukhu ta obiemnoho rehuliuвання. *Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu*. К.: VSNU імені Volodymyra Dalia, 2022. №2(272) С. 15-22. DOI 10.33216/1998-7927-2022-272-2-15-22

9. Bezuhlyi, V., Oliynyk, V., Romanenko I., Zhuk, O., Kuzavkov, V., Borysov, O., Korobchenko, S., Ostapchuk, E., Davydenko, T., and Shyshatskyi, A. (2021). "Development of object state estimation method in intelligent decision support systems". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (113), 54-64. DOI 10.15587/1729-4061.2021.239854

10. Hostiev V.I., Kuzavkov V.V. Parametrychnyi syntez tsyfrovyykh psevdoliniinykh koryhuvalnykh prystroiv Tom 29, Vypusky 2-3, 1997, C. 133-136. DOI 10.1615/JAutomatInfScien.v29.i2-3.170
11. Kuzavkov, V., Poliak, I. Analiz transportnoi bazy dlia vstanovlennia stabilizovanoi platformy netypovoi artyleriiskoi systemy. Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo, 2023, (50), C. 15-20. DOI 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-02
12. Qiu, Hanyu, and Qi, Su. (2021), "Simulation Research of Hydraulic Stepper Drive Technology Based on High Speed On/Off Valves and Miniature Plunger Cylinders". Micromachines 12.4, 438. DOI 10.3390/mi12040438.

**Dr. Tech. Sci., prof. Minochkin A.I., Dr. Tech. Sci., prof. Kuzavkov V.V.,
Ph.d.. Romanenko M.M.**

TRANSFER FUNCTION OF AN OPEN-CIRCUIT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH HYDRAULIC DRIVE

The article derives the transfer function of the automatic control system with hydraulic cylinders as an actuator. The need to obtain a model is associated with the synthesis of one of the system channels.

The general automatic control system contains several control channels. The system is built for a specific object. This is a unified stabilization platform for an atypical firearm on a highly mobile transport base. One of the tasks of the automatic control system is to compensate for the impact of the use of a firearm. Control occurs according to the mathematical model of the firearm - vehicle object. The synthesis of feedback channels present in the system is not considered in the work. The main attention is paid to modeling processes in a channel without feedback. This option for constructing (the automatic control system channel) and choosing an actuator is due to the type of external influence on the control object (a short-term high-intensity pulse).

Mathematical modeling of the main components of an open system: a control signal source, a solenoid valve and a hydraulic cylinder was carried out taking into account the processes occurring in the elements of the system.

Based on the transfer functions of individual components, the general transfer function of the system (control channel) was determined. In addition, inertial characteristics arising from the mass of moving parts (piston, rod, load), damping factors and hydraulic dynamics were taken into account. As a result, a refined mathematical model of an automatic control system with a hydraulic drive was obtained, which reflects the dynamic properties of the system taking into account real physical processes.

The proposed approach can be used for further analysis of the stability and quality of control of hydraulic drives in industrial and transport applications.

Keywords: control channel, automatic control system, transfer function, feedback, actuator, hydraulic system, fire vehicle, transport base.