

УДК 629.017

М. А. Подригало¹, О. В. Бажинов², Р. О. Кайдалов¹, В. В. Глущенко¹, С. А. Кудімов¹

СИНТЕЗ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАКОНІВ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ КРУТНИХ МОМЕНТІВ МІЖ ОСЯМИ ПРИ РОЗГОНІ АВТОМОБІЛЯ

¹Національна академія Національної гвардії України²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

В статті запропоновано підхід до забезпечення стійкості при розгоні повнопривідного електромобіля (автомобіля, обладнаного комбінованою енергетичною установкою з електроприводом ведучих коліс) за рахунок перерозподілу величини крутних моментів між колесами передньої і задньої осей автомобіля. Наведені вирази розрахунку крутних моментів на колесах передньої і задньої осей автомобіля, які отримані на основі визначення ідеального коефіцієнта розподілу сумарної дотичної реакції на колесах автомобіля за умовами зчеплення коліс з дорогою, з урахуванням швидкості руху та прискорення.

ВСТУП

Автомобілі з комбінованими енергетичними установками, обладнані електромеханічним приводом коліс та електромобілі набувають все більш широкого поширення в розвинених країнах [1]. Застосування електроприводу ведучих коліс відкриває можливості для поліпшення експлуатаційних властивостей автомобіля [2, 3] за рахунок регулювання крутних моментів на окремих осях та колесах автомобіля.

У цій статті запропоновано раціональний закон роздільного управління крутними моментами на колесах передньої і задньої осей, що забезпечує курсову стійкість автомобіля при розгоні. Запропонована блок-схема роздільного управління крутними моментами на передній і задній осі автомобіля.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Регулювання розподілу тягових сил і, відповідно, крутних моментів між осями дозволяє поліпшити тягові характеристики і курсову стійкість автомобіля [4, 5]. В роботі [6] досліджений ідеальний з точки зору використання зчепної ваги закон розподілу крутних моментів між осями автомобіля. Однак реалізувати такий закон в машинах з механічними трансмісіями складно. Поява електромобілів та автомобілів з комбінованими енергетичними установками, що мають роздільний електричний привід на передню і задню осі [7], дозволяє вирішити це завдання за допомогою регулювання сили струму окремо в електромоторах приводу передніх і задніх коліс.

В роботі [6] також введений коефіцієнт стійкості автомобіля в тяговому режимі руху, що дозволяє оцінити вплив коефіцієнта розподілу сумарних дотичних реакцій дороги на колесах передньої осі на стійкість автомобіля, який з урахуванням впливу динамічного радіуса колеса автомобіля набуває вигляду:

$$K_{cm} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\varphi^2 \left(m_a g \frac{a}{L} + R_{\kappa} \frac{-r_d}{L} \right)^2 - (1 - K_R)^2 R_{\kappa}}{\varphi^2 \left(m_a g \frac{a}{L} - R_{\kappa} \frac{h - r_d}{L} \right)^2 - K_R^2 R_{\kappa}^2}}, \quad (1)$$

де a, b – відстань від передньої і задньої осей автомобіля до проекції центра мас на горизонтальну площину, що проходить через центр цієї осі (горизонтальна координата центра мас автомобіля); φ – коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою; m_a – маса автомобіля; g – прискорення вільного падіння; L – поздовжня колісна база; h – висота центра мас автомобіля (вертикальна координата); r_d – динамічний радіус ведучих коліс; R_{κ} – сумарна дотична реакція дороги на всіх колесах автомобіля визначається за формулою:

$$R_{\kappa} = R_{\kappa_1} + R_{\kappa_2} \quad (2)$$

де $R_{\kappa_1}; R_{\kappa_2}$ – сумарні дотичні реакції дороги на колеса передньої і задньої осей автомобіля, відповідно; K_R – коефіцієнт розподілу сумарної дотичної реакції на колеса передньої осі автомобіля.

$$K_R = \frac{R_{\kappa_1}}{R_{\kappa_1} + R_{\kappa_2}}. \quad (3)$$

Сумарна дотична реакція на ведучих колесах автомобіля може бути визначена як

$$R_{\kappa} = m_a \dot{V}_a + P_w = m_a \dot{V}_a + \frac{C_x}{2} \rho F V_a^2, \quad (4)$$

де $\dot{V}_a; V_a$ – лінійне прискорення і швидкість автомобіля, відповідно; C_x – коефіцієнт лобового аеродинамічного опору; ρ – щільність повітря; F – площа лобового розтину (міделю) автомобіля.

В роботі [6] з умови $K_{cm} \geq 1$ з урахуванням виразу (4) визначено зони допустимих прискорень автомобіля

$$(\dot{V}_{ycm})_{\max} \leq \frac{\varphi^2 g \frac{b}{a} \frac{h-r_d}{L}}{0,5 \left(\frac{b^2}{a^2} - 1 \right) \left[K_R^2 - \left(\varphi \frac{h-r_d}{L} \right)^2 \right] - \frac{b^2}{a^2} (K_R - 0,5)} - \frac{C_x}{2m_a} \rho F. \quad (5)$$

Однак в роботі [6] не визначений закон роздільного управління крутними моментами на колесах передньої і задньої осей автомобіля в залежності від прискорення і швидкості.

МЕТА І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення стійкості повнопривідного електромобіля (автомобіля, обладнаного комбінованою енергетичною установкою з електроприводом ведучих коліс) при розгоні шляхом регулювання розподілу крутних моментів між осями за рахунок роздільного управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити взаємозв'язок між лінійними прискоренням і швидкістю та розподілом крутних моментів між осями автомобіля.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

З рівняння (1), за умови забезпечення $K_{cm} = 1$, визначимо коефіцієнт розподілу сумарної дотичної реакції [8] на передню вісь, ідеальний за умовою стійкості

$$K_R^{id} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \left(1 - \varphi^2 \frac{h-r_d}{a} \left[\frac{2m_a g}{R_{\kappa}} \frac{b}{L} - \frac{h-r_d}{L} \left(1 - \frac{a}{b}\right)\right]\right)}}{1 - \frac{a^2}{b^2}}. \quad (6)$$

Дотичні реакції на провідних колесах автомобіля можуть бути визначені як

$$R_{\kappa_1} = \frac{M_{\kappa_1} - M_{f_1} - J_{\kappa_1} \dot{\omega}_{\kappa_1}}{r_d}, \quad (7)$$

$$R_{\kappa_2} = \frac{M_{\kappa_2} - M_{f_2} - J_{\kappa_2} \dot{\omega}_{\kappa_2}}{r_d}, \quad (8)$$

де $M_{\kappa_1}; M_{\kappa_2}$ – сумарний крутний момент на колесах передньої і задньої осей; $M_{f_1}; M_{f_2}$ – сумарні моменти опору коченню коліс передньої і задньої осей

$$M_{f_1} = f \cdot r_d R_{z_1}, \quad (9)$$

$$M_{f_2} = f \cdot r_d R_{z_2}, \quad (10)$$

де f – коефіцієнт опору коченню коліс автомобіля; $R_{z_1}; R_{z_2}$ – сумарні нормальні реакції дороги на колесах передньої і задньої осей автомобіля; $J_{\kappa_1}; J_{\kappa_2}$ – моменти інерції обертових частин наведені до передніх і задніх коліс; $\dot{\omega}_{\kappa_1}; \dot{\omega}_{\kappa_2}$ – кутові прискорення передніх і задніх коліс автомобіля

$$\dot{\omega}_{\kappa_1} = \dot{V}_a / r_{\kappa_1}, \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_{\kappa_2} = \dot{V}_a / r_{\kappa_2}, \quad (12)$$

де $r_{\kappa_1}; r_{\kappa_2}$ – кінематичні радіуси передніх і задніх коліс.

Приймаємо припущення того, що $r_{\kappa_1} = r_{\kappa_2} = r_d$.

Сумарні нормальні реакції на колесах передньої і задньої осей

$$R_{z_1} = m_a g \left(\frac{b}{L} - \frac{\dot{V}_a}{g} \frac{h - r_d}{L} \right); \quad (13)$$

$$R_{z_2} = m_a g \left(\frac{b}{L} - \frac{\dot{V}_a}{g} \frac{h - r_d}{L} \right). \quad (14)$$

Коефіцієнт K_R^{i0} виразимо через сумарні крутний момент M_{κ_1} і M_{κ_2} з використанням співвідношень (7)–(12)

$$K_R^{i0} = \frac{R_{K_1}}{R_{K_1} + R_{K_2}} = \frac{M_{\kappa_1} - f r_d R_{z_1} - \frac{J_{\kappa_1}}{r_{\kappa_1}} \dot{V}_a}{M_{\kappa_1} + M_{\kappa_2} - m_a g f r_d - (J_{\kappa_1} + J_{\kappa_2}) \frac{\dot{V}_a}{r_{\kappa_1}}}. \quad (15)$$

Після підстановки (13) в (15) отримуємо

$$K_R^{i0} = \frac{M_{\kappa_1} - f r_d m_a g \left(\frac{b}{L} - \frac{R_K}{m_a} \frac{h - r_d}{L} \right) - \frac{J_{\kappa_1}}{r_{\kappa_1}} \dot{V}_a}{M_{\kappa_1} + M_{\kappa_2} - m_a g f r_d - (J_{\kappa_1} + J_{\kappa_2}) \frac{\dot{V}_a}{r_{\kappa_1}}}. \quad (16)$$

В рівнянні (16), оскільки справедливе співвідношення (4),

$$M_{\kappa_1} + M_{\kappa_2} - m_a g f r_d - (J_{\kappa_1} + J_{\kappa_2}) \frac{\dot{V}_a}{r_{\kappa_1}} = \left(m_a \dot{V}_a + \frac{C_x}{2} \rho F V_a^2 \right) r_d. \quad (17)$$

Вирішуючи разом рівняння (16) та (17), отримуємо

$$M_{\kappa_1} = m_a r_d \left[\left(\dot{V}_a + \frac{C_x \rho F}{2m_a} V_a^2 \right) K_R^{u0} + fg \left(\frac{b}{L} - \frac{R_K}{m_a g} \frac{h-r_d}{L} \right) + \frac{J_{\kappa_1}}{m_a r_{\kappa_d}} \dot{V}_a \right]; \quad (18)$$

$$M_{\kappa_2} = m_a r_d \left[fg \left(\frac{a}{L} - \frac{R_K}{g} \frac{h-r_d}{L} \right) + J_{\kappa_2} \frac{\dot{V}_a}{m_a r_{\kappa_d}} + \left(\dot{V}_a + \frac{C_x \rho F}{2m_a} V_a^2 \right) (1 - K_R^{u0}) \right]. \quad (19)$$

Після підстановки рівняння (4) в рівняння (6), отримаємо

$$K_R^{i0} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \left[1 - \phi^2 \frac{h-r_d}{a} \left[\frac{2g \frac{a}{L}}{\dot{V}_a + \frac{C_x \rho F}{2m_a} V_a^2} - \frac{h-r_d}{L} \left(1 - \frac{a}{b}\right) \right] \right]}}{1 - \frac{a^2}{b^2}}. \quad (20)$$

Крутний момент електродвигунів пропорційний силі струму в ланцюзі їх управління

$$M_{\kappa_1} = K_1 J_1; \quad (21)$$

$$M_{\kappa_2} = K_2 J_2, \quad (22)$$

де $J_1; J_2$ – сила струму в ланцюзі управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс; $K_1; K_2$ – коефіцієнти пропорційності між крутними моментами і силою струму в ланцюгах управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс відповідно.

На рисунку 1 наведена блок-схема роздільного управління крутними моментами на колесах передньої і задньої осей.

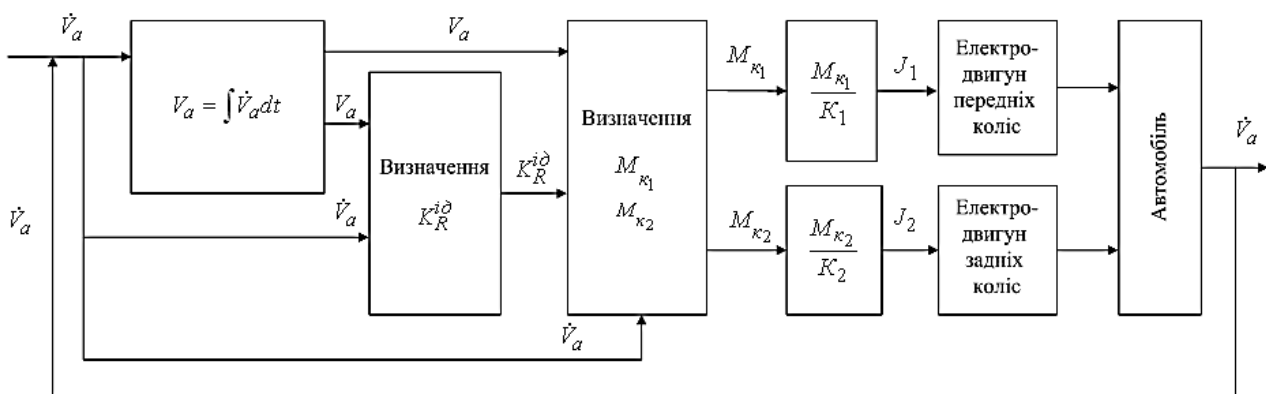


Рисунок 1 – Блок-схема роздільного управління крутними моментами електродвигунів передніх та задніх коліс, що забезпечує стійкість автомобіля при розгоні

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведеного дослідження визначено раціональний закон роздільного управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс, що забезпечує курсову стійкість електромобіля при розгоні.

2. Запропонована блок-схема роздільного управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс дозволяє в подальшому інтегрувати її в систему управління розгоном електромобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бажинов О. В. Конверсія легкового автомобіля в гібридний / О. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, М. Хакім. – Х. : ХНАДУ, 2014. – 160 с.
2. Чудаков Е. А. Теория автомобиля / Е. А. Чудаков. – М. : Машгиз, 1950. – 343 с.
3. Иларионов В. А. Эксплуатационные свойства автомобиля / В. А. Иларионов. – М. : Машиностроение, 1966. – 280 с.
4. Подригало М. А. Устойчивость автомобиля против заноса в тяговом режиме движения / М. А. Подригало, Д. М. Клец // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 12. – С. 23–26
5. Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів : в 3 ч. Ч 3. навчальний посібник / В. П. Сахно, В. М. Поляков, А. В. Костенко [та ін.]. – Д. : ЛАНДОН-XXI, 2015. – 400 с.
6. Клец Д. М. Вплив експлуатаційних факторів та технічного стану автомобіля на його стійкість проти заносу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук / Клец Дмитро Михайлович ХНАДУ. – Х., 2009. – 20 с.
7. Гібридні автомобілі / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков [та ін.]. – Х. : ХНАДУ, 2014. – 160 с.
8. Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів / Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало [та ін.]. – Х. : ХНАДУ, 2014. – 204 с.

REFERENCES

1. Bazhynov O.V. Konversiiia lehkovoho avtomobilia v hibrydnyi / O. V. Bazhynov, V. Ia. Dvadnenko, M. Khakim. – Kh. : KhNADU, 2014. – 160 s.
2. Chudakov E. A. Teoryia avtomobyliia / E. A. Chudakov. – M.: Mashhyz, 1950. – 343 s.
3. Ylaryonov V. A. Ekspluatatsyonnye svoistva avtomobyliia / V. A. Ylaryonov. – M. : Mashynostroenye, 1966. – 280 s.
4. Podryhalo M. A. Ustoichyvost avtomobyliia protyv zanosa v tiahovom rezhyme dvyzheniya / M. A. Podryhalo, D. M. Klets // Avtomobylnaia promyshlennost, 2009 - №12. – s. 23-26
5. Ekspluatatsiini vlastyvosti avtotransportnykh zasobiv. V 3 ch. Ch 3. navchalnyi posibnyk / V. P. Sakhno, V. M. Poliakov, A. V. Kostenko ta in.; – D. : LANDON-XXI, 2015. – 400 s.
6. Klets D. M.. Vplyv ekspluatatsiinykh faktoriv ta tekhnichnoho stanu avtomobilia na yoho stiikist proty zanosu : avtoref. dys. kand tekhn. nauk / Klets Dmytro Mykhailovych KhNADU. – Kh., 2009. – 20s.
7. Hibrydnyi avtomobili / O. V. Bazhynov, O. P. Smyrnov, S. A. Serikov y dr.; – Kh. : KhNADU, 2014. – 160 s.
8. Dynamichni vlastyvosti i stabilnist funktsionuvannia avtotransportnykh zasobiv / D. V. Abramov, N. M. Podryhalo, M. A. Podryhalo ta in. – Kh. : KhNADU, 2014. – 204 s.

М. А. Подригало¹, О. В. Бажинов², Р. О. Кайдалов¹, В. В. Глущенко¹, С. А. Кудімов¹

СИНТЕЗ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАКОНІВ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ КРУТНИХ МОМЕНТІВ МІЖ ОСЯМИ ПРИ РОЗГОНІ АВТОМОБІЛЯ

¹Національна академія Національної гвардії України

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

В статті запропоновано підхід до забезпечення стійкості при розгоні повнопривідного електромобіля (автомобіля обладнаного комбінованою енергетичною установкою з електроприводом ведучих коліс) за рахунок перерозподілу величини крутних моментів між колесами передньої і задньої осей автомобіля. Визначено раціональний закон роздільного управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс, що забезпечує курсову стійкість електромобіля при розгоні. Для цього було визначено коефіцієнт розподілу сумарної дотичної реакції на колеса передньої осі, ідеальний за умовою збереження стійкості. На основі ідеального коефіцієнта розподілу сумарної дотичної реакції на колеса передньої осі визначено крутні моменти для електродвигунів коліс передньої і задньої осей автомобіля.

Запропонована блок-схема роздільного управління електродвигунами приводу передніх і задніх коліс, при інтегруванні її в систему управління розгоном електромобіля (автомобіля обладнаного комбінованою енергетичною установкою з електроприводом ведучих коліс), дозволяє забезпечити стійкість автомобіля при розгоні.

Ключові слова: електроавтомобіль, автомобіль з комбінованою енергетичною установкою, стійкість руху, прискорення, швидкість, крутний момент.

Подригало Михайло Абович, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності Національної гвардії України, e-mail: pmikhab@gmail.com

Бажинов Олексій Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільної електроніки, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет

Кайдалов Руслан Олегович, кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри бойового та логістичного забезпечення оперативно-тактичного факультету, Національна академія Національної гвардії України, полковник, e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Глуценко Віталій Володимирович, кандидат технічних наук, заступник начальника Національної академії Національної гвардії України з тилу, начальник відділу тилового забезпечення, полковник

Кудімов Сергій Анатолійович, ад'юнкт докторантури та ад'юнктури, Національна академія Національної гвардії України, підполковник, e-mail: kudimov81@ukr.net

M. Podrigalo¹, O. Bazhynov², R. Kaydalov¹, V. Gluschenko¹, S. Kudimov¹

SYNTHESIS OF RATIONAL LEGISLATION OF THE MANAGEMENT BY ROLLING THE BRAKE MOMENTS BETWEEN THE WHEELS IN THE CARS OF THE AUTOMOBILE

¹National Academy of National Guard of Ukraine

²Kharkiv National Automobile and Highway University

In this article an approach is proposed to ensure stability in the dispersal of a four-wheel drive electric vehicle (a car equipped with a combined power unit with an electric drive of the driving wheels) due to the redistribution of the torque values between the wheels of the front and rear axles of the car. The rational law of separate control of electric motors of the drive of the front and rear wheels is determined, which provides the course stability of the electric vehicle during acceleration. For this purpose, the coefficient of distribution of the total tangential response to the front axle wheels was determined, which is ideal for the preservation of stability. On the basis of the ideal coefficient of distribution of the total tangential response to the wheels of the front defined torque for the electric motors of the wheels of the front and rear axles of the car.

The proposed block diagram of the separate control of electric motors of the drive of the front and rear wheels allows it to be further integrated into the control system for dispersal of an electric vehicle (a car equipped with a combined power unit with an electric drive of driving wheels).

Keywords: electric car, car with combined power plant, stability of movement, acceleration, speed, torque.

Podrigalo Mikhail, Dr. Sc. (Egn.), Professor, chief scientist at the research center of service and military activities of the National guard of Ukraine, e-mail: pmikhab@gmail.com

Bazhynov Oleksii, Dr. Sc. (Egn.), Professor, Head of the Department of Automotive Electronics, Kharkiv National Automobile and Highway University

Kaidalov Ruslan, PhD, associate professor, head of the department of combat and logistic support of the operational tactical faculty, National Academy of National Guard of Ukraine, colonel e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Hlushchenko Vitalii, PhD, deputy head of the National academy of the National guard of Ukraine from the rear, the head of the logistics department, colonel

Kudimov Serhii, associate doctor and adjunct of the National Academy of National Guard of Ukraine, lieutenant colonel, e-mail: kudimov81@ukr.net

М. А. Подригало¹, А. В. Бажинов², Р. О. Кайдалов¹, В. В. Глущенко¹, С. А. Кудимов¹

СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ МЕЖДУ ОСЯМИ ПРИ РАЗГОНЕ АВТОМОБИЛЯ

¹Национальная академия Национальной гвардии Украины

² Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

В данной статье предложен подход к обеспечению устойчивости при разгоне полноприводного электромобиля (автомобиля оборудованного комбинированной энергетической установкой с электроприводом ведущих колес) за счет перераспределения величины крутящих моментов между колесами передней и задней осей автомобиля. Определен рациональный закон раздельного управления электродвигателями привода передних и задних колес, что обеспечивает курсовую устойчивость электромобиля при разгоне. Для этого были определены коэффициент распределения суммарной касательной реакции на колеса передней оси, идеальный по условию сохранения устойчивости. На основе идеального коэффициента распределения суммарной касательной реакции на колеса передней оси определены крутящие моменты для электродвигателей колес передней и задней осей автомобиля.

Предложенная блок-схема раздельного управления электродвигателями привода передних и задних колес, при интегрировании ее в систему управления разгоном автомобиля (автомобиля оборудованного комбинированной энергетической установкой с электроприводом ведущих колес), позволяет обеспечить устойчивость автомобиля при разгоне.

Ключевые слова: *электроавтомобиль, автомобиль с комбинированной энергетической установкой, устойчивость движения, ускорение, скорость, крутящий момент.*

Подригало Михаил Абович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра служебно-боевой деятельности Национальной гвардии Украины, e-mail: pmikhab@gmail.com

Бажинов Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильной электроники, Харьковский Национальный автомобильно-дорожный университет

Кайдалов Руслан Олегович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры боевого та логического обеспечения оперативно-тактического факультета, Национальная академия Национальной гвардии Украины, полковник, e-mail: kaidalov.76@ukr.net

Глущенко Виталий Владимирович, кандидат технических наук, заместитель начальника Национальной академии Национальной гвардии Украины с тыла, начальник отдела тылового обеспечения, полковник

Кудимов Сергей Анатольевич, адъюнкт докторантуры та адъюнктуры, Национальная академия Национальной гвардии Украины, подполковник, e-mail: kudimov81@ukr.net