

ПРИНЦИП УЗГОДЖЕНОГО РЕГУЛЮВАННЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В РЕЖИМІ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

В. І. Теряєв¹, С. О. Бур'ян¹, В. П. Стяжкін²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут електродинаміки Національної Академії наук України

Анотація. У дослідженні запропоновано новий узагальнений підхід до вирішення задач оптимізації процесів керування рухом електроприводу, який розширює функціональні можливості електродвигуна в режимі електричного гальмування. Задача вирішується за рахунок узгодженого регулювання координат електричної машини в генераторному режимі, яке полягає у тому, що коли одна або декілька координат двигуна в режимі електричного гальмування задаються примусово зовнішнім джерелом енергії, то завдяки регулюванню інших координат забезпечується заданий закон перетворення механічної енергії в електричну в процесі руху робочої машини.

Ключові слова: електропривод, генераторне, гальмування, зовнішнє, джерело, енергія, узгоджене, керування.

Вступ.

Існує ряд промислових і транспортних установок, рух в яких постійно або періодично здійснюється за рахунок зовнішнього джерела енергії, а електрична машина, не будучи при цьому основним джерелом руху, знаходиться в режимі електричного гальмування для забезпечення потрібних характеристики робочого процесу. Такими джерелами руху можуть бути підйомно-транспортні машини в режимі опускання вантажу, рухомі інерційні маси транспортних систем та засобів, а також інші.

Аналіз сучасного стану проблеми.

Питання оптимізації генераторних та гальмівних режимів електроприводу останнім часом набувають все більшої актуальності у зв'язку з розширенням використання відновлюваних джерел енергії та електричних транспортних засобів. Так, в роботах [1, 2] докладно розглянуті інтегральні характеристики гальмівних систем рекуперації та загальні питання підвищення ефективності відновлення частини енергії руху в процесі гальмування транспортних засобів. В роботах [3, 4] проведені дослідження гальмівних режимів для електроприводів з вентильними електричними машинами. Питанням технічної реалізації електроприводів з режимом повернення енергії зовнішнього джерела присвячені роботи [3-5]. Значна увага приділяється уточненню моделюванню та розробці законів керування регенера-

тивним гальмуванням електроприводу транспортних засобів. Математичні моделі систем електроприводу, закони керування та результати дослідження представлені в роботах [2, 5, 6].

Як показує аналіз сучасних публікацій, існуючі підходи до керування генераторними та гальмівними режимами електричних машин, як правило, мають обмежене використання і вузьке спрямування на конкретні схемотехнічні рішення для окремих видів електричних машин, перетворювальних пристроїв та механізмів. Їх недоліком є також відсутність керованості процесом перетворення електричної енергії в режимах гальмування електричної машини та координації законів керування електричною машиною із зовнішнім первинним джерелом руху в процесі гальмування.

Постановка завдання.

Метою даного дослідження є узагальнення підходів до синтезу законів керування електроприводами промислових і транспортних установок на основі принципу узгодженого регулювання координат [7], який полягає у тому, що коли одна або декілька координат електродвигуна задаються примусово зовнішнім джерелом енергії, то завдяки регулюванню інших координат забезпечується заданий закон перетворення механічної енергії в електричну або навпаки. Запропонований принцип регулювання передбачає зміну параметрів живлення електричної машини за допомогою перетворювального пристрою таким чином, щоб бажані регульовані координати змінювались за потрібним законом з урахуванням наявності примусово заданих координат, які в

процесі синтезу системи керування вважаються незалежними від електроприводу величинами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

В процесі розгону транспортних засобів відбувається накопичення кінетичної енергії. Зворотнє перетворення цієї енергії в електричну можливе при рекуперативному гальмуванні електромобілів, засобів міського електротранспорту, магістральних та кар'єрних електровозів з метою дозарядки акумуляторів або повернення енергії в мережу.

Визначимо особливості керування електроприводом транспортного засобу з регульованим асинхронним електроприводом при використанні принципу узгодженого регулювання координат. Скористаємось даним принципом для синтезу закону керування рухом електричного транспортного засобу в режимі рекуперативного гальмування, при якому забезпечується постійна величина уповільнення в умовах змінного зусилля опору руху та моменту інерції рухомого об'єкту.

Розглянемо типову траєкторію руху транспортного засобу для режимів прискорення та уповільнення при знакозмінному зусиллі опору руху (див. рис. 1).

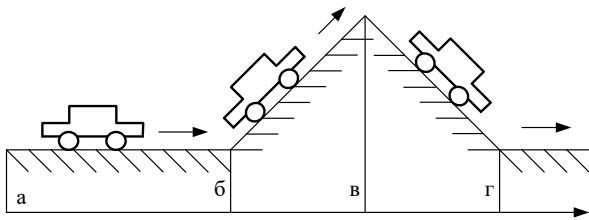


Рис. 1. Приклад траєкторії руху транспортного засобу

Для синтезу закону керування скористаємось рівняннями лінеаризованої механічної характеристики асинхронної машини та динаміки електроприводу:

$$(\omega_0 - \omega) \cdot \beta = M_D \quad (1)$$

$$M_D - M_C = J \frac{d\omega}{dt} = J\varepsilon \quad (2)$$

де ω - швидкість ротору асинхронної машини; ω_0 - розрахункова швидкість холостого ходу; β - коефіцієнт жорсткості механічної характеристики; M_D - момент двигуна в генераторному режимі; M_C - статичний момент від приведенного до валу двигуна зусилля опору руху; J - еквівалентний момент інерції, який враховує момент інерції двигуна, механічної передачі та масу транспортного засобу; ε - прискорення, або уповільнення руху. В гальмівному режимі момент двигуна має від'ємний знак.

Вирішуємо рівняння (1) і (2) відносно ω_0 і отримуємо:

$$\omega_0 = \omega + \frac{1}{\beta} (J\varepsilon + M_C) \quad (3)$$

де, згідно (2), враховано, що $M_D = J\varepsilon + M_C$.

Виходячи з умови, що завданням руху транспортного засобу є постійне уповільнення $\varepsilon = \text{const}$, будемо структурну схему (див. рис. 2), яка реалізує закон керування (3). В основу структурної схеми рис. 2 покладена спрощена модель асинхронного частотно-регульованого електроприводу [8]. На структурній схемі позначені: K - масштабуючий коефіцієнт; $K_{пч}$ - коефіцієнт передачі перетворювача частоти; K_d , T_E - коефіцієнт передачі та електромагнітна стала часу асинхронного електродвигуна; $KП$ - керуючий пристрій електроприводу.

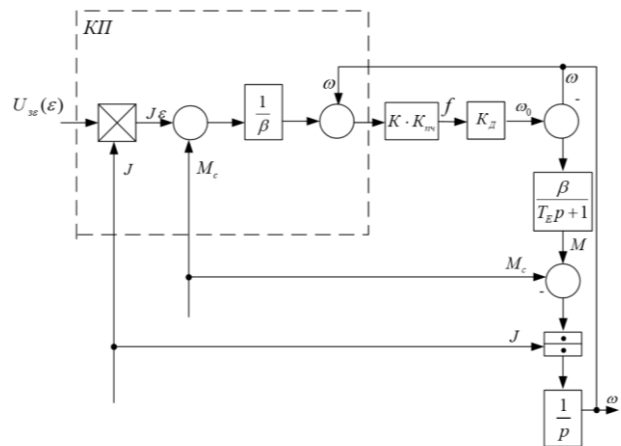


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування рухом транспортного засобу в режимі уповільнення

Результати моделювання перехідних процесів в електроприводі при частотному регулюванні швидкості холостого ходу асинхронного двигуна за залежністю (3) представлені на рис. 3.

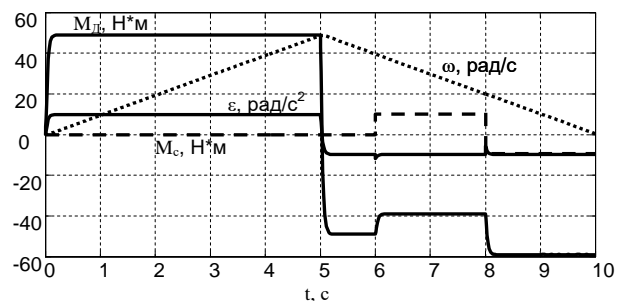


Рис. 3. Перехідний процес руху з постійною величиною прискорення та уповільнення

На рис. 3 наведені графіки зміни швидкості ω , прискорення та уповільнення ε , моменту елек-

тродвигуна M_d та моменту опору руху M_c для режимів розгону і гальмування електроприводу на холостому ході (ділянка а-б на рис. 1) з наступним накиданням (ділянка б-в) та скиданням моменту навантаження (ділянка в-г) під час гальмування. Відповідно, процес уповільнення включав три ділянки з різними значеннями моменту опору руху, згідно рис. 1: частина ділянки а-б ($M_c=0$ з моменту часу 5 с до моменту часу 6 с); ділянка б-в ($M_c=+10$ Нм з моменту часу 6 с до 8 с); ділянка в-г ($M_c=-10$ Нм з моменту часу 8 с до 10 с).

Як видно з синтезованого закону керування та результатів моделювання частотне регулювання швидкості асинхронного електродвигуна в режимі рекуперативного гальмування забезпечує постійну величину уповільнення на всіх ділянках руху транспортного засобу, яке змінюється короткочасно лише в моменти ступінчатого накидання та скидання моменту опору руху M_c . Це підтверджує можливість здійснення узгодженого регулювання координат електродвигуна в режимі електричного гальмування за потрібним законом.

Зі структурної схеми рис. 2 випливає, що для керування процесом гальмування транспортного засобу з постійним уповільненням достатньо двох вимірюваних координат – швидкості електродвигуна та моменту опору руху, за умови незмінності моменту інерції. Вимірювання швидкості двигуна не викликає технічних складнощів. В той же час пряме вимірювання моменту опору в процесі руху є достатньо складним для технічної реалізації.

Проаналізуємо можливість побічного вимірювання моменту опору шляхом його заміни моментом на валу електродвигуна. З метою оцінки такої можливості перетворимо структурну схему електродвигуна, представлену на рис. 4 таким чином, щоб вхідною величиною був момент опору M_c , а вихідною величиною – момент двигуна M_d .

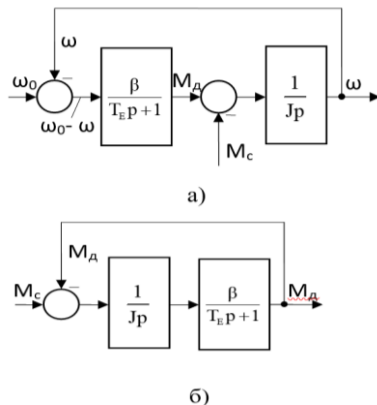


Рис. 4. Структурна схема електродвигуна: а) до перетворення; б) після перетворення

Передаточна функція електродвигуна, складена згідно до рис. 4,б, має наступний вигляд

$$\frac{M_d}{M_c} = \frac{1}{\frac{J}{\beta} T_E p^2 + \frac{J}{\beta} p + 1} \quad (4)$$

З отриманої передаточної функції (4) видно, що при $\beta \rightarrow \infty$, тобто при абсолютно жорсткій механічній характеристиці двигуна, величини моментів в статиці і динаміці співпадають повністю.

В іншому випадку має місце інерційне запізнення, яке, при нехтуванні електромагнітною сталою часу двигуна T_E , зворотно пропорційно залежить від коефіцієнту жорсткості β і прямо пропорційно від моменту інерції J . Дане запізнення у відпрацьованні задаючої дії призводить до виникнення похибки за прискоренням, величина якої залежить як від параметрів електроприводу так і від самої величини прискорення або уповільнення. Якщо цей результат не є прийнятним для транспортного засобу, можливо здійснити повноцінну заміну зворотного зв'язку за моментом опору руху на зворотний зв'язок за моментом електродвигуна, додавши сигнал, пропорційний прискоренню, згідно рівняння (3).

Розроблений закон керування передбачає також можливість врахування зміни моменту інерції привода, якщо це має місце в процесі руху. Для такого випадку в структурній схемі передбачений додатковий вхід для змінного моменту інерції, який може бути заданий як програмно, так вимірюваний побічними методами.

Висновки.

1. Обґрунтовано новий принцип узгодженого регулювання координат електродвигуна в режимі електричного гальмування для промислових і транспортних установок, де одна або декілька координат задаються зовнішнім джерелом енергії, а регулюванням інших координат забезпечується заданий закон перетворення механічної енергії в електричну в процесі руху робочої машини.

2. Використання принципу узгодженого регулювання координат забезпечує керований процес перетворення механічної енергії в електричну від зовнішніх джерел енергії різноманітної фізичної природи.

3. Наведено приклад синтезу закону керування транспортним засобом в режимі електричного гальмування, який підтверджує доцільність використання запропонованого підходу.

4. Показана можливість здійснення режиму генерації енергії та рекуперативного гальмуван-

ня електричними транспортними засобами за умов виконання заданих законів керування рухом.

5. Поєднання функцій генератора і електродвигуна в єдиному функціональному комплексі допомагає вирішувати проблеми енергозбереження і покращення техніко-економічних характеристик процесів і установок з регульованими електромеханічними системами.

Список використаної літератури

1. Clegg, S. J. A Review of Regenerative Braking Systems. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK. Monograph: 24 p. URL: http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105_WP471_uploadable.pdf

2. Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor Xiaohong Nian, Fei Peng, Hang Zhang. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume: 61, Issue: 10, Oct. 2014. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712129/author#authors>

3. Regenerative Braking in an Electric Vehicle. Jarrad Cody, Özdemir Göl, Zorica Nedic, Andrew Nafalski, Aaron Mohtar. University of South Australia. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, P. 113–118. URL:

<https://pdfs.semanticscholar.org/e3bc/86855c1d9ccc15daab8349386f538a692e5b.pdf>

4. Regenerative Braking System in Electric Vehicles. Soniya.K.Malode, R.H.Adware. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 03, Issue: 03. Mar-2016. P. 394–400. URL: <https://www.irjet.net/archives/V3/i3/IRJET-V3I381.pdf>

5. On the potential of regenerative braking of electric buses as a function of their itinerary. Deborah Perrottaa, Bernardo Ribeiro, Rosaldo J. F. Rossettic, Joao L. Afonsod. 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation. EWGT 2012. Portugal, URL: https://paginas.fe.up.pt/~niadr/PUBLICATIONS/2012/EWGT2012_OnPotentialRegenerativeBraking.pdf

6. Analysis of the Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Vehicle using Electro-Mechanical Brakes. Ki Hwa Jung, Donghyun Kim, Hyunsoo Kim and Sung-Ho Hwang Sungkyunkwan University Republic of Korea. P. 151–162. URL: http://cdn.intechopen.com/pdfs/12060/InTech-Analysis_of_a_regenerative_braking_system_for_a_hybrid_electric_vehicle_using_electro_mechanical_brakes.pdf

7. Спосіб регулювання координат генератора та двигуна в режимі електричного гальмування / В. І. Теряєв, В. П. Стяжкін, С. О. Бур'ян, пат. 126104 Україна, № u201712078; заявл. 08.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

8. Особливості синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами / М. Г. Попович, В. І. Теряєв, О. І. Киселичник, С. О. Бур'ян. - Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44) частина 2. – с. 12–16.

References

1. Clegg, S. J. A Review of Regenerative Braking Systems. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK. Monograph: 24 p. URL: http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105_WP471_uploadable.pdf

2. Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor Xiaohong Nian, Fei Peng, Hang Zhang. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Volume: 61, Issue: 10, Oct. 2014. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6712129/author#authors>

3. Regenerative Braking in an Electric Vehicle. Jarrad Cody, Özdemir Göl, Zorica Nedic, Andrew Nafalski, Aaron Mohtar. University of South Australia. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, P. 113–118. URL:

<https://pdfs.semanticscholar.org/e3bc/86855c1d9ccc15daab8349386f538a692e5b.pdf>

4. Regenerative Braking System in Electric Vehicles. Soniya.K.Malode, R.H.Adware. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 03, Issue: 03. Mar-2016. P. 394–400. URL: <https://www.irjet.net/archives/V3/i3/IRJET-V3I381.pdf>

5. On the potential of regenerative braking of electric buses as a function of their itinerary. Deborah Perrottaa, Bernardo Ribeiro, Rosaldo J. F. Rossettic, Joao L. Afonsod. 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation. EWGT 2012. Portugal, URL: https://paginas.fe.up.pt/~niadr/PUBLICATIONS/2012/EWGT2012_OnPotentialRegenerativeBraking.pdf

6. Analysis of the Regenerative Braking System for a Hybrid Electric Vehicle using Electro-Mechanical Brakes. Ki Hwa Jung, Donghyun Kim, Hyunsoo Kim and Sung-Ho Hwang Sungkyunkwan University Republic of Korea. P. 151–162. URL:

http://cdn.intechopen.com/pdfs/12060/InTech-Analysis_of_a_regenerative_braking_system_for_a_hybrid_electric_vehicle_using_electro_mechanical_brakes.pdf

7. Method of adjusting the coordinates of the generator and the engine in the mode of electric galvanizing [Sposib rehulyuvannya koordynat heneratora ta dvyhuna v rezhymy elektrichnoho hal'muvannya] dec. 126104 Ukraine, № u201712078; stated. 12/08/2017; published Jun 11, 2017, Byul. No. 11

8. М. Н. Попович, В. І. Теряєв, О. І. Кисельчнюк, С. О. Бур'ян. (2007) Features of synthesis and research of electromechanical systems with successive correction and frequency regulated asynchronous motors [Osoblyvosti syntezy ta doslidzhennya elektromekhanichnykh system z poslidovnoyu korektsiyeyu ta chastot-norehul'ovanymy asynkronnymy dvyhunamy] - Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu. – Kremenchuk: KDPU №. 3/2007 (44) Pt. 2. pp. 12–16.

PRINCIPLE OF COORDINATED CONTROL OF ELECTRIC MOTOR VARIABLES IN ELECTRIC BRAKING MODE

V. Teriaiev¹, S. Burian¹, V. Stiazhkin²

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

²Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Abstract. *There are a number of installations and technological processes, the movement of which is carried out by an external source of energy, and the electric machine, not being the main source of movement, constantly or periodically is in the mode of electric generating braking to provide the desired characteristics of the workflow.*

The problem solved in this research is to expand the functionality of the generator and the motor in the electric braking mode. The problem is solved by an automatic control of the coordinates of the electric machine in the generator mode. A feature of the proposed control method is that one or more coordinates of a generator or motor in electric braking mode are forcibly set by an external energy source, and the goal of coordinated regulation of other coordinates of an electric machine is to provide a given law for converting mechanical energy into electrical or an algorithm for the movement of an executive object of a working machine.

The article presents example of the synthesis of regulated electric drive control algorithms based on the principle of coordinated control of coordinates. The example concerns the synthesis of the law of motion control of an electric vehicle in the regenerative braking mode, in which a constant value of deceleration is ensured under conditions of an alternating force of resistance to movement and the moment of inertia of a moving object.

The proposed approach to the synthesis of generator mode control laws of electric machines, through the use of the principle of coordinated control of coordinates, acquires qualitatively new properties, as compared with traditional methods of electric braking, increases the technical and economic indicators of the electromechanical system as a whole.

Keywords: *generator, electric motor, electric braking, external, source, energy, coordinated, generation, control*

ПРИНЦИП СОГЛАСОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В. И. Теряев¹, С. А. Бурьян¹, В. П. Стяжкин²

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

²Институт электродинамики Национальной Академии наук Украины

Аннотация. *Существует ряд установок и технологических процессов, движение в которых осуществляется за счет внешнего источника энергии, а электрическая машина, не будучи основным источником движения, постоянно или периодически находится в режиме генераторного электрического торможения для обеспечения требуемых характеристик рабочего процесса.*

Задача, решаемая в данном исследовании, заключается в расширении функциональных возможностей двигателя в режиме электрического торможения за счет согласованного регулирования

ния его координат в генераторном режиме. Особенностью предлагаемого способа управления является то, что одна или несколько координат двигателя в режиме электрического торможения принудительно задаются внешним источником энергии, а целью согласованного регулирования других координат является обеспечение заданного закона преобразования механической энергии в электрическую в процессе движения исполнительного органа рабочей машины.

В статье приведен пример синтеза закона управления электроприводом транспортного средства в режиме рекуперативного торможения, при котором обеспечивается постоянная величина замедления в условиях переменного усилия сопротивления движению и момента инерции движущегося объекта.

Сочетание функций генератора и электродвигателя в едином функциональном комплексе обеспечивает энергосбережение и улучшение качественных характеристик регулирования в электромеханических системах.

Ключевые слова: электропривод, генераторное, торможение, внешний, источник, энергия, согласованное, управление.

Получено 19.02.2019



Теряєв Віталій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: kpivit@gmail.com, тел. +38 (044) 204-83-56

Vitaliy Teriaiev, PHD of Tech. Science, Associate Professor of the Department of automation of electromechanical systems and the electrical drives, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine. E-mail: kpivit@gmail.com, тел. +38 (044) 204-83-56

ORCID ID: 0000-0002-8634-0895



Бур'ян Сергій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, E-mail: sburyan18@gmail.com, тел. +38-050-840-31-55

Serhii Burian, PHD of Tech. Science, Associate Professor of the Department of Automation of electromechanical systems and the electrical drives, National technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine. , E-mail: sburyan18@gmail.com, тел. +38-050-840-31-55

ORCID ID: 0000-0002-4947-0201



Стяжкін Віталій Павлович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Інституту електродинаміки НАН України. Просп. Перемоги, 56, Київ, Україна, E-mail: tems@ukr.net, тел. +38 (044) 456-42-48

Vitaliy Stiazhkin, PHD of Tech. Science, Senior Researcher, Department of Transformation and Stabilization of Electromagnetic Processes of Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy ave., 56, Kiev, Ukraine. E-mail: tems@ukr.net, тел. +38 (044) 456-42-48

ORCID ID: 0000-0003-0602-1112