



ISSN 1993-3495 online

СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

2019, ТОМ 15, НОМЕР 4, 191–196

УДК 621.833+69.002.5

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗУБЧАТЫХ УРАВНИТЕЛЕЙ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. Финиченко, В. М. Даценко

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 286123.

E-mail: dachenko-vital@mail.ru

Получена 08 ноября 2019; принята 22 ноября 2019.

Аннотация. Существует несколько технологических способов проведения пространственной модификации зубьев зубчатых муфт. Эти методы основаны на одном принципе, зубья нарезаются так же, как и будут работать, т.е. уже с некоторым перекосом, образуя бочкообразный профиль. Пространственная модификация боковой поверхности зубьев является методом улучшения эксплуатационных показателей зубчатых муфт. Она предназначена для выравнивания нагрузки в зацеплении и обеспечения линейного касания рабочих поверхностей зубьев. В работе представлено решение задачи определения скорости относительного перемещения зубьев уравнителя планетарной передачи с учетом производственных и сборочных ошибок. В муфте с криволинейной образующей зуба втулки, кроме скольжения, наблюдается и перекачивание контактирующих поверхностей. Поэтому износ зацепления в этих муфтах протекает менее интенсивно. Таким образом, с использованием теории зубчатых зацеплений приведено решение, позволяющее определять геометрические и кинематические параметры зацепления муфт, выполненных с произвольной образующей зуба втулки.

Ключевые слова: зубчатое зацепление, муфта, планетарная передача, пространственная модификация.

КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗУБЧАСТИХ ЗРІВНЮВАЧІВ ПЛАНЕТАРНИХ РЕДУКТОРІВ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН І ОБЛАДНАННЯ

В. О. Фініченко, В. М. Даценко

ДОН ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 286123.

E-mail: dachenko-vital@mail.ru

Отримана 08 листопада 2019; прийнята 22 листопада 2019.

Анотація. Існує кілька технологічних способів проведення просторової модифікації зубів зубчастих муфт. Ці методи засновані на одному принципі, зуби нарізаються так, як і будуть працювати, тобто вже з деяким перекосом, утворюючи бочкоподібний профіль. Просторова модифікація бічної поверхні зубів є методом поліпшення експлуатаційних показників зубчастих муфт. Вона призначена для вирівнювання навантаження в зацепленні і забезпечення лінійного дотику робочих поверхонь зубів. У роботі представлено рішення задачі визначення швидкості відносного переміщення зубів зрівнювача планетарної передачі з урахуванням виробничих і складальних помилок. У муфті з криволінійною твірною зуба втулки, крім ковзання, спостерігається і перекошування контактуючих поверхонь. Тому знос зацеплення в цих муфтах протікає менш інтенсивно. Таким чином, з використанням теорії зубчастих зацеплень

наведено рішення, що дозволяє визначити геометричні і кінематичні параметри зачеплення муфт, виконаних з довільною твірною зуба втулки.

Ключові слова: зубчасте зачеплення, муфта, планетарна передача, просторова модифікація.

KINEMATIC PARAMETERS OF GEAR EQUALIZERS OF PLANETARY GEARBOXES OF CONSTRUCTION MACHINERY AND EQUIPMENT

Vladislav Finichenko, Vitaly Datsenko

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavin Str., Makeevka, DPR, 83123.*

E-mail: dacenko-vital@mail.ru

Received 08 November 2019; accepted 22 November 2019.

Abstract. There are several technological methods for performing spatial modification of the teeth of gear couplings. These methods are based on one principle, the teeth are cut as well as they will work, i.e. already with some skew, forming a barrel-shaped profile. Spatial modification of the side surface of the teeth is a method for improving the performance of gear clutches. It is designed to equalize the load in the engagement and ensure linear contact of the working surfaces of the teeth. The paper presents a solution to the problem of determining the speed of relative movement of the teeth of the planetary gear equalizer, taking into account production and Assembly errors. In a coupling with a curved tooth-forming sleeve, in addition to sliding, there is also rolling of the contacting surfaces. Therefore, the wear of the gear in these boxes is less intense. Thus, using the theory of gearing, a solution is given that allows us to determine the geometric and kinematic parameters of the engagement of clutches made with an arbitrary tooth-forming sleeve.

Keywords: gearing, coupling, planetary gear, spatial modification.

Формулировка проблемы

Для современного машиностроения характерно стремление к уменьшению массово-габаритных характеристик создаваемой продукции. В частности в области строительных машин и оборудования нашли широкое распространение редукторные колеса и барабаны, а также мотор-редукторы, наиболее часто они применяются в грузоподъемной и транспортирующей технике. В качестве редукторной составляющей вышеуказанного оборудования, как правило, применяются планетарные передачи, которые помимо большого количества достоинств, не лишены недостатков.

Для соединения плавающих звеньев планетарных редукторов наибольшее распространение

получили зубчатые уравниватели (зубчатые муфты) [2, 6]. Взаимная несоосность плавающих элементов приводит к относительному перемещению контактирующих зубьев уравнивателя, появлению сил трения, снижению коэффициента полезного действия, износу рабочих поверхностей зубьев. Как следствие, ухудшаются эксплуатационные характеристики машин и механизмов. Особенно часто данные явления встречаются в строительных машинах и оборудовании вследствие тяжелых условий работы.

Цель

Обосновать целесообразность применения муфт с криволинейной образующей зуба втулки путем использования теории зубчатых зацеплений.

Основной материал

При определении скоростей относительного перемещения рабочих поверхностей зубьев использовалось положение, согласно которому любое относительное изменение элементов зубчатого зацепления моделируется соответствующим изменением взаимного положения систем координат рассматриваемых элементов.

Для определения скорости относительного перемещения элементов уравнивателя принята система координат (рис. 1) правого направления:

- система $S_0(x, y, z)$ – неподвижная;
- система $S_1(x_1, y_1, z_1)$ – связана с плавающим элементом уравнивателя и выбрана так, что ось z_1 совпадает с осью делительной окружности зубьев, а ось x_1 проходит через точку начала эвольвенты на основном цилиндре в среднем сечении зуба;
- система $S_2(x_2, y_2, z_2)$ – связана с неподвижным зубчатым элементом таким образом, что ось z_2 совпадает с осью основного цилиндра, а ось x_2 проходит через точку начала эвольвенты на основном цилиндре в среднем сечении зуба.

Смещение Δa_1 учитывает погрешности обработки зубчатого венца плавающего элемента. Смещение Δa_2 учитывает погрешности обработки зубьев неподвижного элемента.

Углы φ_1 и φ_2 координируют относительное положение рабочих поверхностей зубьев рассматриваемых элементов уравнивателя.

Углы β_1 и β_2 координируют положение рабочих поверхностей зубьев относительно направления смещения Δa_1 и Δa_2 . Ω – угол взаимного положения осей основных цилиндров плавающего и неподвижного элементов уравнивателя.

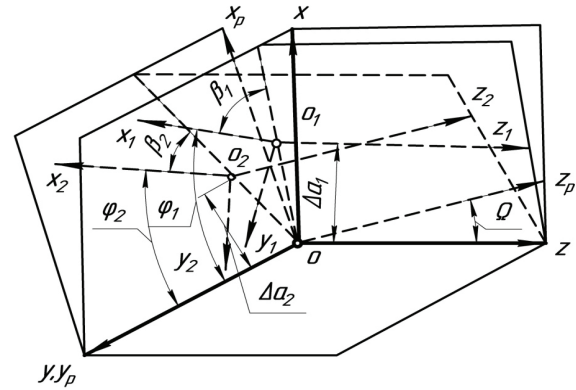


Рисунок 1. Системы координат, принятые при исследовании зацепления.

Считаем, что система S_1 определена в неподвижном пространстве, а система S_2 движется относительно S_1 .

Скорости относительного движения элементов уравнивателя определим, используя матричный способ [3, 10].

Столбцевая матрица скорости имеет вид:

$$V = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Скорости движения системы S_2 относительно S_1 определяются зависимостью [4, 6]:

$$V_2^{(21)} = M_{21} \cdot M_{21}^{-1} \cdot \bar{r}_2, \tag{2}$$

где M_{21} – матрица перехода от системы S_1 к S_2 ; M_{21}^{-1} – производная от матрицы обратной M_{21} ; \bar{r}_2 – радиус-вектор текущей точки поверхности зуба неподвижного элемента уравнивателя.

$$M_{21} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Omega \sin \varphi_i & \Delta a_1 \cos \beta_1 - \Delta a_2 \cos \beta_2 \\ 0 & 1 & \Omega \cos \varphi_i & -\Delta a_1 \sin \beta_1 + \Delta a_2 \sin \beta_2 \\ \Omega \sin \varphi_i & -\Omega \cos \varphi_i & 1 & \Delta a_1 \sin(\varphi_i + \beta_1) \cdot \omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{3}$$

$$M_{21}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \Omega \cos \varphi_i & \Delta a_1 \sin \beta_1 - \Delta a_2 \sin \beta_2 \\ 0 & 0 & \Omega \sin \varphi_i & \Delta a_1 \cos \beta_1 + \Delta a_2 \cos \beta_2 \\ -\Omega \cos \varphi_i & -\Omega \sin \varphi_i & 0 & 2\Delta a_1 \cos(\varphi_i + \beta_2) \cdot \Omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \tag{4}$$

$$\bar{r} = x_2(u_2 v_2) \bar{i}_1 + y_2(u_2 v_2) \bar{j} + z_2(u_2 v_2) \bar{k}. \tag{5}$$

Подставив (3), (4) и (5) в (1) и сделав соответствующие преобразования, получим выражения для определения составляющих скорости относительного движения профилей зубьев:

$$\left. \begin{aligned} V_{x_2}^{(21)} &= \left[\begin{array}{l} y_2(i_{21} - 1) + Z_2\Omega \cos \varphi_i + \\ + \Delta a_1 i_{21} \sin \beta_1 - \Delta a_2 i_{21} \sin \beta_2 \end{array} \right] \dot{\varphi} \\ V_{y_2}^{(21)} &= \left[\begin{array}{l} -x_2(i_{21} - 1) + Z_2\Omega \sin \varphi_i + \\ + \Delta a_1 i_{21} \cos \beta_1 - \Delta a_2 i_{21} \cos \beta_2 \end{array} \right] \dot{\varphi}, \\ V_{z_2}^{(21)} &= -\Omega \left[\begin{array}{l} x_2 \cos \varphi_i + y_2 \sin \varphi_i + \\ + \Delta a_1 \cos(\varphi_i + \beta_1) + \\ + \Delta a_2 \cos(\varphi_i + \beta_2) \end{array} \right] \dot{\varphi} \end{aligned} \right\} (6)$$

где $\dot{\varphi}$ – угловая скорость.
Эвольвентную поверхность зубьев, с прямолинейной образующей вдоль зуба, в системе координат S_1 представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_B (\cos \theta_1 + \theta_1 \sin \theta_1) \\ y_1 &= r_B (\sin \theta_1 - \theta_1 \cos \theta_1) \\ z_1 &= u_1 \end{aligned} \right\} (7)$$

где θ_1, u_1 – независимые параметры рабочих поверхностей зуба; r_B – радиус основной окружности.

Эвольвентная поверхность зубьев, с произвольной образующей вдоль ширины зуба, в системе координат S_2 представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= r_B (\cos \theta_2 + \theta_2 \sin \theta_2) - \Delta \sin \theta_2 \\ y_2 &= r_B (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2) + \Delta \cos \theta_2 \\ z_2 &= u_2 \end{aligned} \right\} (8)$$

где $\Delta = f(u_2)$ – величина смещения исходного контура инструмента по нормали к профилю зуба.

Учитывая, что $i_{21}=1$ (передаточное отношение зацепления зубчатого уравнивателя), получим составляющие скорости относительного движения поверхностей зубьев с криволинейной образующей зуба (9).

Подставив (8) в (6), получим составляющие скорости относительного движения поверхностей зубьев в уравнителе с прямолинейной образующей зуба (10).

Модуль скорости относительного движения профилей зубьев определится по зависимости (рис. 2):

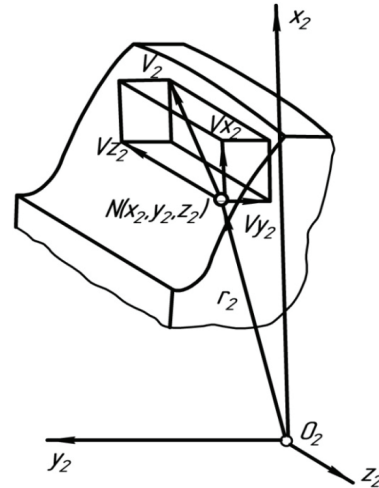


Рисунок 2. Составляющие скорости относительного движения поверхностей зубьев.

$$\left. \begin{aligned} V_x^k &= \left(\frac{2R_0\Omega^2 \sin \alpha \cos^2 \varphi_i}{2\sin^2 \alpha + \Omega^2 \cos^2 \varphi_i} + \Delta a_1 \sin \beta_1 - \Delta a_2 \sin \beta_2 \right) \dot{\varphi} \\ V_y^k &= \left(\frac{2R_0\omega^2 \sin \alpha \sin^2 \varphi_i}{2\sin^2 \alpha + \Omega^2 \cos^2 \varphi_i} + \Delta a_1 \cos \beta_1 - \Delta a_2 \sin \beta_2 \right) \dot{\varphi} \\ V_z^k &= -\Omega \left[r_x \cos \varphi_i + \frac{R_0\Omega^2 \cos \varphi_i \sin \alpha \sin \varphi_i}{2\sin^2 \alpha + \Omega^2 \cos^2 \varphi_i} + \Delta a_1 \cos(\varphi_i + \beta_1) + \Delta a_2 \cos(\varphi_i + \beta_2) \right] \dot{\varphi} \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\left. \begin{aligned} V_x^n &= \left(\frac{B}{2} \cdot \Omega \cdot \cos \varphi_i + \Delta a_1 \sin \beta_1 - \Delta a_2 \sin \beta_2 \right) \dot{\varphi} \\ V_y^n &= \left(\frac{B}{2} \cdot \Omega \cdot \sin \varphi_i + \Delta a_1 \cos \beta_1 - \Delta a_2 \cos \beta_2 \right) \dot{\varphi} \\ V_z^n &= -\Omega \cdot \left[r_x \cdot \cos \varphi_i + \Delta a_1 \cos(\varphi_i + \beta_1) + \Delta a_2 \cos(\varphi_i + \beta_2) \right] \dot{\varphi} \end{aligned} \right\} (10)$$

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (11)$$

Анализ зависимостей (9) и (10) показывает, что скорость относительного движения поверхностей зубьев зависит от угла взаимного перекоса элементов зубчатого уравнивателя, погрешностей изготовления зацепления и формы образующей внешних зубьев.

Вывод

В муфте с криволинейной образующей зуба втулки, кроме скольжения, наблюдается и

перекачивание контактирующих поверхностей. Поэтому износ зацепления в этих муфтах протекает менее интенсивно. Таким образом, с использованием теории зубчатых зацеплений приведено решение, позволяющее определять геометрические и кинематические параметры зацепления муфт, выполненных с произвольной образующей зуба втулки. Применение зубчатых муфт с криволинейной образующей зуба втулки в редукторных колесах и барабанах, а также мотор-редукторах строительной техники позволит снизить силы трения, увеличить коэффициент полезного действия и надежность вышеуказанных узлов строительных машин.

Литература

1. Айрапетов, Э. Л. Зубчатые соединительные муфты [Текст] / Э. Л. Айрапетов, Д. Б. Мирзаджанов. – М. : Наука, 1991. – 250 с.
2. Артоболевский, И. И. Механизмы в современной технике [Текст] : справочное пособие. В 7 томах. Т. III: Рычажно-кулачковые, рычажно-зубчатые, рычажно-храповые, рычажно-клиновые и винторычажные механизмы. Механизмы с гибкими и упругими звеньями / И. И. Артоболевский. – 2-е изд., переработанное. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 416 с.
3. Литвин, А. Ф. Теория зубчатых зацеплений [Текст] / А. Ф. Литвин. – М. : Изд-во «Наука», 1968. – 584 с.
4. Михайлов, А. Н. К вопросу чистовой обработки зубьев втулок зубчатых муфт с пространственной модификацией [Текст] / А. Н. Михайлов, Р. М. Грубка // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XII международной научно-технической конференции (12–17 сентября 2005 г., г. Севастополь). – В 5-ти томах. – Т. 2. – Донецк : ДонНТУ, 2005. – С. 275–277.
5. Михайлов, А. Н. Разработка методов повышения несущей и компенсирующей способности зубчатых муфт [Текст] : дис. канд. техн. наук / Михайлов Александр Николаевич. – Донецк : ДПИ, 1985. – 259 с.
6. Планетарные передачи [Текст] : справочник / Под ред. В. Н. Кудрявцева, Ю. Н. Кудрявцева. – Л.-М. : «Машиностроение», 1997. – 536 с.
7. Поляков, В. С. К расчету зубчатых муфт с бочкообразными зубьями [Текст] / В. С. Поляков, В. Н. Коськин // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1967. – № 6. – С. 52–53.
8. Финиченко, В. А. Пространственная модификация зубьев цилиндрических зубчатых колес

References

1. Ayrapetov, E. L. Toothed connecting couplings [Text] / E. L. Ayrapetov, D. B. Mirzadzhannov. M. : Science, 1991. 250 p. (in Russian)
2. Artobolevsky, I. I. Mechanisms in modern technology [Text] : a reference guide. In 7 volumes. V. III: Lever-cam, lever-gear, lever-ratchet, lever-wedge and screw-lever mechanisms. Mechanisms with flexible and elastic links. – 2nd ed., revised. – M. : Science. The main edition of the physical and mathematical literature, 1979. 416 p. (in Russian)
3. Linvin, A. F. Theory of gears [Text] / A. F. Linvin. M. : Publishing House «Science», 1968. 584 p. (in Russian)
4. Mikhaylov, A. N.; Grubka R. M. On the issue of finishing machining of teeth of bushings of gear couplings with spatial modification [Text]. In: *Mechanical Engineering and the Technosphere of the 21st Century* : proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference (12–17 September 2005, Sevastopol). – In 5 volumes. V. 2. Donetsk : DonNTU, 2005. P. 275–277. (in Russian)
5. Mikhaylov, A. N. Development of methods to increase the bearing and compensating ability of gear couplings [Text] : the dissertation of the candidate of technical sciences / Mikhaylov Aleksandr. Donetsk : DPI, 1985. 259 p. (in Russian)
6. Kudryavtseva V. N.; Kudryavtseva Yu. N. Planetary gears [Text] : reference book. L.-M. : «Mashinostroyeniye», 1997. 536 p. (in Russian)
7. Polyakov V. C.; Koskin V. N. To the calculation of gear couplings with barrel-shaped teeth [Text]. In: *News of universities. Engineering*. 1967. № 6. P. 52–53. (in Russian)
8. Finichenko, V. A. Spatial modification of the teeth of spur gears [Text]. In: *Proceedings of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2004. Issue 5(47). P. 97–100. (in Russian)

- [Текст] / В. А. Финиченко // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – 2004. – Вып. 5(47). – С. 97–100.
9. А. с. 1346360 СССР, ДПИ В 23F 9/00. Устройство для обработки зубчатых изделий с пространственно модифицированными зубьями [Текст] / В. А. Финиченко, Н. А. Чернышев, Е. Н. Колесник, А. В. Лукичев, А. Н. Михайлов ; патентообладатель Донецкий политехнический институт. – № 3913779/31-08; заявл. 1985-06-19; опубл. 1987-10-23. – Бюл. № 39. – 3 с.
 10. Фрезер, Р. Теория матриц и ее приложения [Текст] / Р. Фрезер, В. Дункан, А. Коллар. – М. : Издательство иностр. лит., 1950. – 448 с.
 11. ISO 6336-1:2019 Calculation of load capacity of spur and helical gears [Текст]. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors. – Enter 2019-11-01 ; edition 3. – [S. l. : s. n.], 2019. – 134 p.
 12. Decker, K. H. Maschinenelemente [Текст] : Gestaltung und Berechnung / K. H. Decker. – Munchen; Wien : Hanser, 1992. – 631 p.
 13. Patent of Germany №1.163.181, F16 H1/00 Improvements in or relating to epicyclic gearings [Текст] / W. G. Stoekicht. – № 1.163.181 ; declaration 1966-04-27 ; published 1969-09-04. – № GB1163181A. – 4 p.
 14. Tonn, W. Beitrag zur Kenntnis des Verschleissvorganges beim Kurzversuch [Текст] / W. Tonn // Metallkunde. – 1937. – Bd. 29. – № 6. – P. 196–198.
 9. Certificate of authorship 1346360 SSSR, DPI В 23F 9/00. Device for processing gears with spatially modified teeth [Text] / Finichenko V. A.; Chernyshev N. A.; Kolesnik Ye. N.; Lukichev A. V.; Mikhaylov A. N.; patent holder Donetsk Polytechnic Institute. № 3913779/31-08 ; declaration 1985-06-19; published 1987-10-23. Bul. № 39. 3p. (in Russian)
 10. Frezer R.; Dunkan V.; Kollar A. Matrix theory and its applications [Text]. M. : Publishing house of foreign, 1950. 448 p. (in Russian)
 11. ISO 6336-1:2019 Calculation of load capacity of spur and helical gears [Text]. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors. – Enter 2019-11-01 ; edition 3. – [S. l. : s. n.], 2019. 134 p.
 12. Decker, K. H. Maschinenelemente [Text] : Gestaltung und Berechnung / K. H. Decker. – Munchen; Wien : Hanser, 1992. 631 p.
 13. Patent of Germany №1.163.181, F16 H1/00 Improvements in or relating to epicyclic gearings [Text] / W. G. Stoekicht. № 1.163.181 ; declaration 1966-04-27 ; published 1969-09-04. – № GB1163181A. – 4 p.
 14. Tonn, W. Beitrag zur Kenntnis des Verschleissvorganges beim Kurzversuch [Text]. In: *Metallkunde*. 1937. Bd. 29. № 6. P. 196–198.

Финиченко Владислав Александрович – кандидат технических наук, доцент. Научные интересы: современные проблемы машиностроения в области механических передач.

Даценко Виталий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов средства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: современные тенденции развития средств механизации сбора, транспортировки и переработки твердых бытовых отходов, системы автоматизированного проектирования машин.

Фініченко Владислав Олександрович – кандидат технічних наук, доцент. Наукові інтереси: сучасні проблеми машинобудування в області механічних передач.

Даценко Віталій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри наземних транспортно-технологічних комплексів і засобів ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: сучасні тенденції розвитку засобів механізації збору, транспортування та переробки твердих побутових відходів, системи автоматизованого проектування машин.

Finichenko Vladislav – Ph.D. (Eng.), Associate Professor. Scientific interests: modern problems of mechanical engineering in the field of mechanical transmissions.

Datsenko Vitaly – Ph.D. (Eng.), Associate Professor at Ground Transportation and Technological Complexes and Facilities Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: current trends in the development of mechanization of collection, transportation and processing of solid waste, CAD systems.