

5. Krasilnikov, A.Y., Kravchenko K.Y. Issledovanija us-tojchivosti sistem s zapazdyvanijem, opisy-vajushhijh process frezerovanija, v sluchae s odnoj stepen'ju svobody [Investigation of the stability of systems with delay, describing the process of milling, in the case of one degree of freedom]. *Vestnik mashinostroenija*, 2013, no 9. pp. 67-75.

6. Ignatov M.G., Babin S.V., Perminov A.E. K voprosu ob izmenenii vektora vertikal'noj sostavljajushhej sily rezanija pri vstrechnom frezerovanii [On the question of changing the vector of the vertical component of the cutting force with a head milling]. *Vestnik mashinostroenija*, 2006, no 1. pp. 75-76.

7. Ignatov M.G. Perminov A.E., Prokofiev E.Y. Vlijanie vektora vertikal'noj sostavljajushhej sily rezanija na tochnost' i sherohovatost' obrabatyvaemoj po-verhnosti pri vstrechnom frezerovanii [Influence of vertical component of the vector cutting forces on the accuracy and roughness of the surface to be treated with a head milling]. *Vestnik mashinostroenija*, 2008, no 9. pp. 49-50.

Кузнецова Виктория Николаевна (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры "Эксплуатация транспортно-

технологических машин и комплексов в строительстве (ЭСМиК)" ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Кiryushkina Нина Александровна (Омск, Россия) – аспирантка кафедры "Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве (ЭСМиК)" ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: vesnyshka_28@mail.ru).

Kuznetsova Victoria Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor "Operation of transport technological machines and complexes in construction" of The Siberian automobile and highway academy (SIBADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Kiryushkina Nina Aleksandrovna (Russian Federation, Omsk) – the graduate student of "Operation of Transport Technological Machines and Complexes in Construction (ESMIK)" of The Siberian automobile and highway academy (SIBADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: vesnyshka_28@mail.ru).

УДК 621.879.3

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА

Р.Ю. Сухарев, А.В. Старостин
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье представлен алгоритм работы автоматической системы управления рабочего процесса одноковшового гидравлического экскаватора (ЭОГ), позволяющий осуществлять автоматическую разработку траншей, а также расчетная схема положения рабочего органа ЭОГ. Данный алгоритм автоматической разработки траншеи ЭОГ позволит вести разработку траншеи с заданными глубиной, длиной и в заданном направлении автоматически, без участия человека-оператора, что позволит повысить эксплуатационную производительность ЭОГ.

Ключевые слова: гидравлический одноковшовый экскаватор, алгоритм автоматизации, автоматическая разработка траншеи.

Введение

На сегодняшний день очень остро стоит вопрос рационализации, модернизации и совершенствования дорожного строительства, в том числе дорожных, строительных и подъемно-транспортных машин, а также систем управления. Одной из наиболее распространенных землеройных машин является ЭОГ.

На данный момент, в мире существует ряд автоматизированных систем управления ЭОГ. По принципу действия все эти системы являются индикаторными, то есть они позволяют человеку-оператору визуально отсле-

живать положение режущей кромки ковша в рабочем пространстве. Несмотря на точные показания положения режущей кромки ковша в рабочем пространстве (погрешность не превышает 10 мм), человеческий фактор ничем не компенсируется и по-прежнему оказывает существенное влияние как на производительность, точность работ, так и на время, необходимое для выполнения строительных работ.

В данной статье речь пойдет о разработках в области автоматизации рабочего про-

цесса ЭОГ, а именно о системе автоматического управления рабочим процессом ЭОГ.

Автоматическая система управления одноковшовым гидравлическим экскаватором. Уравнения геометрических связей

На данный момент разработана расчетная пространственная схема ЭОГ (рис.1). Основными расчетными звеньями являются:

- 1) Базовая машина, включая платформу ЭОГ с центром масс в точке O_1 и связанной с ней системой координат $O_1X_1Y_1Z_1$.
- 2) Стрела с центром масс в точке O_{g2} и связанной с ней системой координат $O_2X_2Y_2Z_2$.
- 3) Рукоять с центром масс в точке O_3 и связанной с ней системой координат $O_3X_3Y_3Z_3$.
- 4) Ковш с центром масс в точке O_{g4} и связанной с ним системой координат $O_4X_4Z_4Y_4$.

Математическое описание ЭОГ начинается с выбора его обобщенных координат, так чтобы каждая координата описывала состояние соответствующего звена расчетной схемы. При этом разным способом выбора обобщенных координат соответствуют различные по сложности и наглядности уравнения кинематики и динамики ЭОГ[1,2,3].

Выбранные обобщенные координаты для принятой расчетной схемы с соответствующими степенями свободы (q) [2]: q_1, Y_0 – перемещение центра масс точки O_1 вдоль оси O_0X_0 ; q_2, Υ_0 – поворот платформы ЭОГ вокруг оси O_0X_0 ; q_3, Υ'_0 – поворот платформы ЭОГ вокруг оси O_0Y_0 ; q_4, Ψ_0 – поворот платформы ЭОГ вокруг оси O_0Z_0 ; q_5, Υ'_1 – поворот стрелы ЭОГ вокруг оси O_1Z_1 ; q_6, Υ'_2 – поворот рукояти ЭОГ вокруг оси O_2Z_2 ; q_7, Υ'_3 – поворот ковша ЭОГ вокруг оси O_3Z_3 .

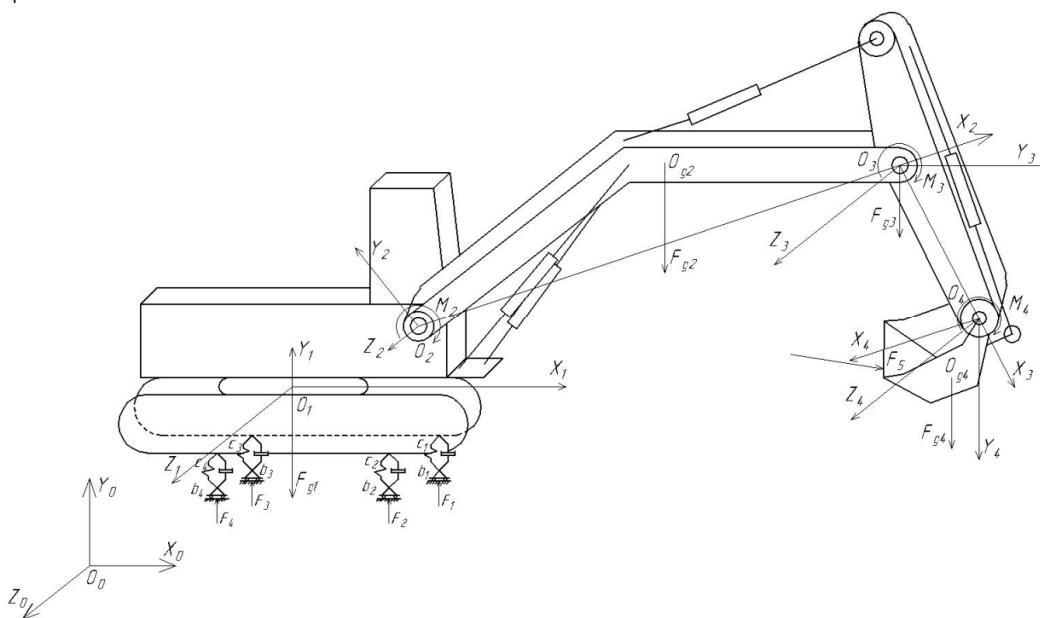


Рис. 1. Расчетная пространственная схема одноковшового гидравлического экскаватора

Со стороны гидропривода на рабочее оборудование действуют моменты сил M_2, M_3, M_4 . Реакции грунта на элементы ходового оборудования представлены силами F_1, F_2, F_3 и F_4 . Реакция грунта на рабочий орган представлена вектором \vec{F}_5 :

$$\vec{F}_5 = [F_{5X}, F_{5Y}, F_{5Z}, 1]^T \quad (1)$$

Упруго-вязкие свойства связей, наложенных на элементы ходового оборудования, характеризуются коэффициентами жесткости c_1, c_2 и коэффициентами вязкости b_1, b_2 [2,4,5].

Для проведения анализа кинематических характеристик ЭОГ, необходимых для выяв-

ления основных закономерностей влияния изменения обобщенных координат расчетной схемы ЭОГ, погрешностей координат расчетной схемы ЭОГ, погрешностей информационно-измерительного устройства, конструктивных параметров ЭОГ, составим уравнения геометрической связи между элементами рабочего оборудования [2,6,7].

Учитывая условие некоммутативности углов Эйлера, определяющих поворот систем координат относительно друг друга, и выбранную последовательность поворота локальных систем координат вокруг осей Z_i, Y_i и X_i на соответствующие углы Ψ_i, Υ'_i и Υ_i , для принятой расчетной схемы матрица перехода

из систем координат $O_1X_1Y_1Z_1$ в систему ко-

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_6 \cdot \cos q_5 & \sin q_5 & -\sin q_6 \cdot \cos q_5 & 0 \\ \sin q_6 \cdot \sin q_4 - & & \cos q_6 \cdot \sin q_4 + & Y_1 \\ -\cos q_6 \cdot \cos q_4 \cdot \sin q_4 & \cos q_5 \cdot \cos q_4 & +\sin q_6 \cdot \cos q_4 \cdot \sin q_4 & \\ \sin q_6 \cdot \cos q_4 + & & \cos q_6 \cdot \cos q_4 - & 0 \\ +\cos q_6 \cdot \sin q_4 \cdot \sin q_5 & -\cos q_5 \cdot \sin q_4 & -\sin q_6 \cdot \sin q_4 \cdot \sin q_5 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ординат $O_0X_0Y_0Z_0$ имеет вид [1,2,8]:

Матрица перехода из системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ в систему координат $O_1X_1Y_1Z_1$ имеет вид:

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_7 & \sin q_7 & 0 & l_1 \\ -\sin q_7 & \cos q_7 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где l_1 и l_2 – линейные размеры ЭОГ, определяющие положение точки O_2 в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ по соответствующим осям O_1X_1 и O_1Y_1 .

Матрица перехода из системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$ в систему координат $O_2X_2Y_2Z_2$ имеет вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos q_8 & \sin q_8 & 0 & l_3 \\ -\sin q_8 & \cos q_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где l_3 – расстояние между центрами шарниров крепления стрелы и рукояти.

Матрица перехода из системы координат $O_4X_4Y_4Z_4$ в систему координат $O_3X_3Y_3Z_3$ имеет вид:

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_9 & \sin q_9 & 0 & l_4 \\ -\sin q_9 & \cos q_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где l_4 – расстояние между центрами шарниров крепления рукояти и ковша.

Матрицы перехода из i -ой локальной системы координат в инерциальную систему ко-

ординат представлены следующими формулами [2,6]:

$$T_1 = A_1; \quad (6)$$

$$T_2 = A_1 \cdot A_2; \quad (7)$$

$$T_3 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3; \quad (8)$$

$$T_4 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4. \quad (9)$$

Алгоритм автоматической разработки траншеи одноковшовым гидравлическим экскаватором

Разработка траншеи под проектную отметку является одним из наиболее важных видов строительных работ, осуществляемых одноковшовым экскаватором. Однако, на сегодняшний день, не существует оптимального алгоритма работы ЭОГ, позволяющего автоматизировать процесс разработки траншей и полностью исключить человеческий фактор, который негативно влияет на производительность, точность осуществляемых работ и на общее время, требуемое для выполнения работ [1,2,4].

С целью повышения качества проводимых работ, а также повышения производительности на основании представленной выше расчетной пространственной схемы был получен алгоритм автоматизации рабочего процесса разработки траншеи (рис.3).

Плоская расчетная схема определения положения рабочего оборудования ЭОГ в продольной плоскости представлена на рисунке 2. Данная схема также позволяет определить длину разрабатываемого участка траншеи, а также высотное положение ковша в любой момент времени используя габаритные размеры рабочего оборудования ЭОГ.

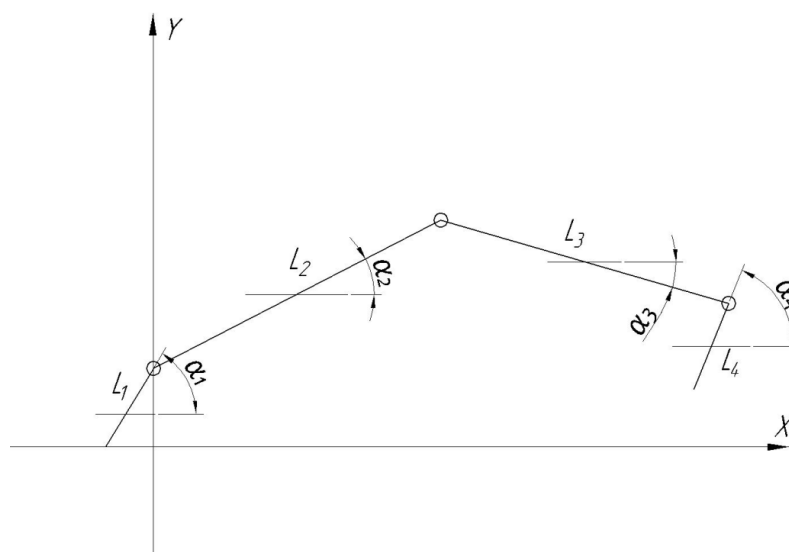


Рис. 2. Определение положения рабочего оборудования гидравлического одноковшового экскаватора в продольной плоскости

Для того, чтобы определить положение рабочего оборудования ЭОГ в продольной плоскости, необходимо знать габаритные размеры элементов рабочего оборудования: стрелы L_2 , рукояти L_3 , а также расстояние от шарнира крепления ковша до режущей кромки, принятое как длина ковша L_4 и габаритный размер базы машины L_1 (высота крепления шарнира стрелы). Зная углы наклона базы машины α_1 , стрелы α_2 , рукояти α_3 и ковша α_4 относительно гравитационной горизонтали можно определить положение режущей кромки ковша в плоскости в любой момент времени, а именно найти ее координаты по высоте H и по длине L :

$$L = L_1 \cdot \cos \alpha_1 + L_2 \cdot \cos \alpha_2 + L_3 \cdot \cos \alpha_3 - L_4 \cdot \cos \alpha_4; \quad (10)$$

$$H = L_1 \cdot \sin \alpha_1 + L_2 \cdot \sin \alpha_2 + L_3 \cdot \sin \alpha_3 - L_4 \cdot \sin \alpha_4. \quad (11)$$

Алгоритм представляет собой последовательность действий, состоящих из стандартных операций рабочего цикла разработки траншеи ЭОГ и расчетных параметров.

Алгоритм является циклическим повторением вышеуказанных действий. Начало работы: оператор задаются следующие параметры: глубина, длина и направление траншеи. Далее начинается рабочий цикл экскаватора: осуществляется заглубление ковша в грунт гидроцилиндром стрелы до момента достижения максимального давления в данном гидроцилиндре. Затем осуществляется копание гидроцилиндром ковша, так как данный метод копания грунта позволяет получить максимальную силу на режущей кромке ковша. Наполнение ковша осуществляется до

момента полного заполнения грунтом. Следующим действием наполненный ковш поднимается до высоты, позволяющей произвести поворот платформы экскаватора в сторону отвала. Затем происходит опрокидывание ковша с грунтом в отвал и поворот платформы в исходное положение. Вышеперечисленные действия повторяются определенное количество раз, пока не будет достигнута требуемая глубина разрабатываемой траншеи на локальном участке. В данном процессе будут участвовать все гидроцилиндры рабочего оборудования экскаватора, а именно: заглубление осуществляется гидроцилиндром стрелы, перемещение режущей кромки ковша в продольной плоскости экскаватора осуществляется гидроцилиндром рукояти, непосредственно копание осуществляется гидроцилиндром ковша. Рабочее пространство экскаватора ограничено, следовательно и участок траншеи, не передвигаясь, экскаватор может разработать ограниченной длины. Чтобы определить длину участка траншеи был произведен соответствующий расчет, представленный формулой 10, в соответствии с графическим представлением рабочего оборудования ЭОГ (рис.2). Заданная длина траншеи состоит из некоторого количества участков данной траншеи. Если их общая длина меньше заданной длины траншеи, то экскаватор откатывается назад на длину, равную длине участка траншеи и повторяет рабочий цикл разработки участка траншеи до момента достижения заданной длины траншеи.

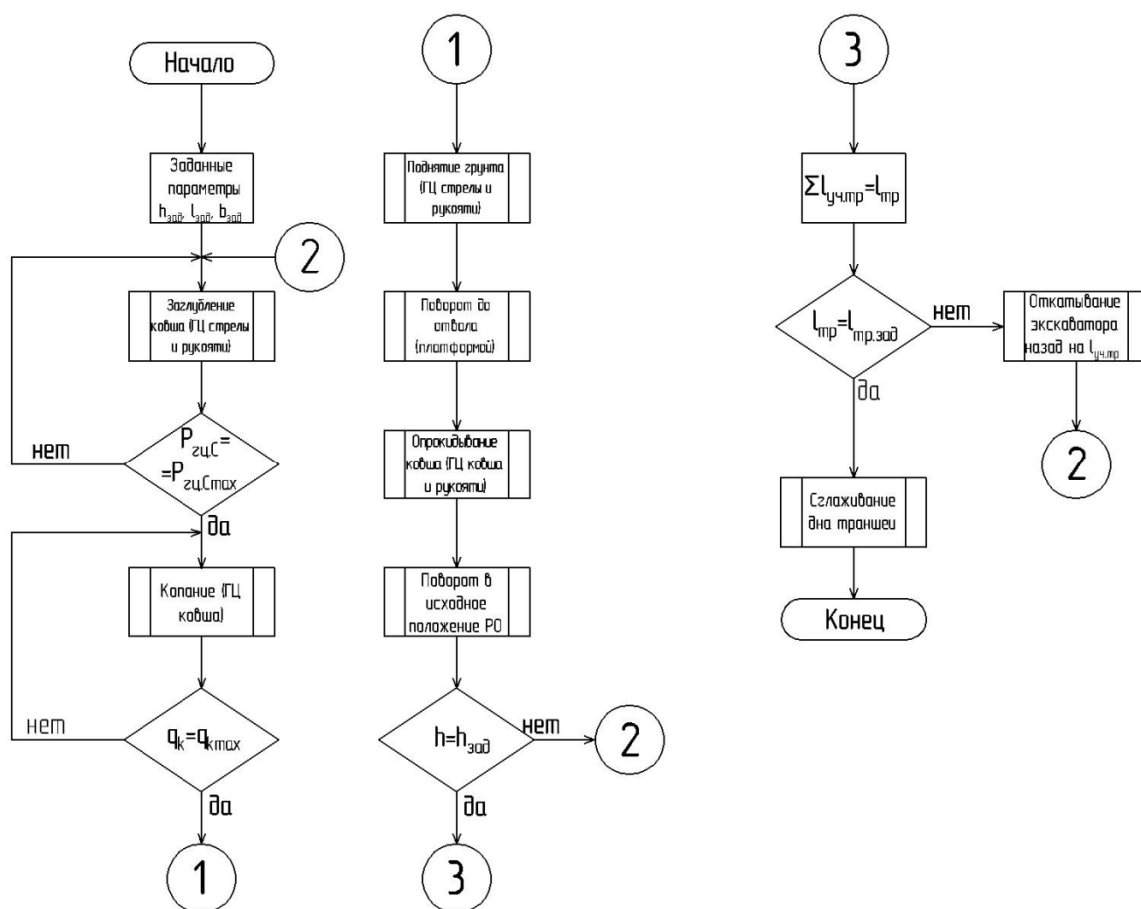


Рис. 3. Алгоритм автоматической разработки траншеи одноковшовым гидравлическим экскаватором

Таким образом протекает рабочий процесс разработки траншеи согласно разработанному алгоритму автоматизации. Работу можно вести круглые сутки, что позволит увеличить производительность и уменьшить время проведения работ.

Заключение

Разработанный алгоритм автоматической разработки траншеи одноковшовым гидравлическим экскаватором позволяет вести разработку траншеи с заданной глубиной, длиной и в заданном направлении автоматически, без участия человека-оператора. В дальнейшем планируется разработать алгоритм автоматизации рабочего процесса разработки котлована, тем самым расширить область работы одноковшового экскаватора в автоматическом режиме.

Библиографический список

1. Щербаков, В.С. Исследование системы управления одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения точности разработки грунта: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1974. – 155 с.

2. Руппель, А.А. Повышение точности разработки грунта одноковшовым гидравлическим экскаватором с гидроприводом: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / А.А. Руппель. – Омск: СибАДИ, 1986. – 266 с.

3. Брайковский, Ю.А. Исследование и разработка системы управления одноковшовым гидравлическим экскаватором для планировочных и зачистных работ: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИстройдормаш, 1971. – 189 с.

4. Санаров, В.Ф. Исследование статических и динамических характеристик следящей системы управления одноковшовым гидравлическим экскаватором: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ, 1973. – 150 с.

5. Шлыков, В.Н. Исследование одноковшового экскаватора с гидроприводом с целью повышения точности выполнения земляных работ: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: СибАДИ. – 143 с.

6. Княжев, Ю.М. Исследование одноковшового экскаватора с целью повышения точности выполнения земляных работ: дисс. ... канд. техн. наук. – Омск, СибАДИ, 1980. – 213 с.

7. Королев, А.В. Исследование и выбор параметров механизмов телескопического рабочего оборудования гидравлических экскаваторов планировщиков: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИ-стройдормаш, 1973. – 150 с.

8. Акинфиев, А.А. Создание системы управления операцией копания одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения эффективности его работы: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: ВНИИСтройдормаш. – 1983. – 122 с.

ALGORITHM OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF HYDRAULIC EXCAVATOR

R.Y. Sukharev, A.V. Starostin

Abstract. There is presented the algorithm of automation of working process of hydraulic excavator in this article, that allows to dig trenches automatically and also the design scheme of the working equipment of hydraulic excavator in the working plane.

Keywords: Hydraulic excavator, algorithm of automation, automatic digging of trenches.

References

1. Shherbakov V.S. *Issledovanie sistemy upravlenija odnokovshovogo gidravlicheskogo jekskavatora s cel'ju povyshenija tochnosti razrabotki grunta*. Diss. kand. tehn. nauk [Research management of hydraulic excavator in order to increase the accuracy of excavation. dis. prof. technology sciences]. Omsk: SibADI, 1974. 155 p.

2. Ruppel' A.A. *Povyshenie tochnosti razrabotki grunta odnokovshovym gidravlicheskim jekskavatorom s gidroprivodom*. Dis. kand. tehn. nauk [Increasing the accuracy of excavation single bucket hydraulic excavator with a hydraulic drive. dis. Prof. technology sciences]. Omsk: SibADI, 1986. 266 p.

3. Brajkovskij Ju.A. *Issledovanie i razrabotka sistemy upravlenija odnokovshovym gidravlicheskim jekskavatorom dlja planirovochnyh i za-chistnyh работ*. Diss. kand. tehn. nauk [Research and development of control systems, single bucket hydraulic excavator for grading and stripping work. dis. Prof. technology sciences] Moscow, VNIISTrojDormash, 1971. 189 p.

4. Sanarov V.F. *Issledovanie staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik sledjashhej sistemy upravlenija odnokovshovym gidravlicheskim jekskavatorom*. Diss. kand. tehn. nauk [The study of static and dynamic characteristics of the servo control system of single bucket hydraulic excavator. dis. Prof. technology sciences]. Omsk, SibADI, 1973. 150 p.

5. Shlykov V.N. *Issledovanie odnokovshovogo jekskavatora s gidroprivodom s cel'ju povyshenija*

tochnosti vypolnenija zemljanyh работ diss. kand. tehn. nauk [Scientific Research hydraulic shovel to increase the accuracy of excavation work. dis. Prof. technology sciences]. Omsk, SibADI. 143 p.

6. Knjazhev Ju.M. *Issledovanie odnokovshovogo jekskavatora s cel'ju povyshenija tochnosti vypolnenija zemljanyh работ*. Diss.kand. tehn. nauk [Research shovel to increase the accuracy of excavation work. dis. candles. technology. Sciences]. Omsk, SibADI, 1980. 213 p.

7. Korolev A.V. *Issledovanie i izbor para-metrov mehanizmov teleskopicheskogo rabocheho oborudovanija gidravlicheskih jekskavatorov planirovshhikov*. Diss. kand. tehn. nauk [Research and selection mechanisms telescopic hydraulic excavator working equipment planners. dis. Prof. technology sciences]. Moscow, VNIISTrojDormash, 1973. 150 p.

8. Akinfiev A.A. *Sozdanie sistemy upravlenija operaciej kopanija odnokovshovogo gidravlicheskogo jekskavatora s cel'ju povyshenija jeffektivnosti ego raboty*. diss kand. tehn. nauk [Creating a management operation of digging of hydraulic excavator in order to increase its effectiveness. dis. Prof. technology sciences]. Moscow, VNIISTrojDormash. 1983. 122 p.

Сухарев Роман Юрьевич (Омск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail suharev_ry@sibadi.org).

Старостин Алексей Викторович (Россия, Омск) – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail a.v_starostin@mail.ru).

Sukharev Roman Y. (Russian Federation, Omsk) – candidate of technical sciences, docent of the department "Automation of production processes and electrical engineering" of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira, 5, e-mail suharev_ry@sibadi.org).

Starostin Aleksej Wiktorowitsch (Russian Federation, Omsk) – graduate student of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira, 5, e-mail a.v_starostin@mail.ru).