

7. Targ S.M. Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki [Brief course of theoretical mechanics]. Moscow, Vyssh. shk., 1995. 416 p.(in Rus.)

8. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Reference book on mathematics for researchers and engineers]. Moscow, Nauka, 1978. 832 p.(in Rus.)

9. Bronshteyn I.N., Semendyayev K.A. Spravochnik po matematike [Reference book on mathematics].

Moscow, Izd. Fiziko-matematicheskoy literatury, 1959. 608 p.(in Rus.)

10. Mukhin P.G. Issledovaniye protsessa vyti-raniya semyan mnogoletnikh trav: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Study of a process of extracting seeds of perennial grasses: PhD (Eng) thesis]. Moscow, 1952. 146 p.(in Rus.)

*The paper was received on March 26, 2018*

УДК 517.977.5

DOI 10.26897/1728-7936-2018-4-26-32

**ПОДЧАСОВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ**, заведующий лабораторией<sup>1</sup>

E-mail: podch@mail.ru

**ПОДЧАСОВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ**, ассистент<sup>2</sup>

E-mail: podchacha@yahoo.com

**ТЕРЕНТЬЕВА АРИНА ДМИТРИЕВНА**, ассистент<sup>2</sup>

E-mail: terentyevaad@gmail.com

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; 105005, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, Москва, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ УЧАСТКОВ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Согласно разработанной ранее математической модели, определяющей параметры точности земельных работ, произведен анализ точности производимых работ с учетом сил резания. Прежняя математическая модель рабочего механизма экскаватора Четра ЭГП-230 дополнена динамическими характеристиками. Построена циклограмма работ, и с ее помощью выявлена оценка каждого из гидроцилиндров рабочего механизма на точность формирования продольного профиля дна разрабатываемой траншеи. Произведена оценка отклонения значения входной обобщенной координаты от времени, задаваемой перемещением штока гидроцилиндра под действием сил, от теоретического значения, задаваемого управляющим воздействием. Обнаруженное несоответствие перемещений по обобщенной координате от штока гидроцилиндра и от теоретического управляющего воздействия влияет также и на координаты выходного воздействия на режущей кромке ковша рабочего механизма. Значения координат входного и выходного воздействия с учетом динамических характеристик рабочего механизма и возможного запаздывания гидропривода могут значительно отличаться от теоретических положений, что неизбежно приводит к несовершенству производства земляных работ и является дополнительным источником погрешностей отклонений формы продольного профиля дна траншеи. При учете динамических характеристик рабочего механизма разница между заданным и получаемым положениями составляет 0,0892 м. А суммарная динамическая погрешность положения режущей кромки ковша рабочего механизма с учетом сил резания и возможного запаздывания гидропривода составляет 0,1176 м. Полученное значение превышает требуемое значение (0,05 м) более чем в 2 раза. По результатам моделирования выявлено, что соответствие всех звеньев техническим требованиям не гарантирует соблюдения требуемой точности перемещения выходного звена кинематической цепи, а значит, недобор грунта в основании траншеи может превысить требуемое значение (0,05 м), либо возможна увеличенная выемка грунта, что может привести к невозможности прокладки мелиоративных систем.

**Ключевые слова:** одноковшовый экскаватор, математическая модель, система управления, циклограмма, сила резания, точность, точное земледелие.

**Введение.** Для проведения мелиоративных работ точного земледелия могут применяться одноковшовые экскаваторы с гидроприводом, оснащенные обратной лопатой, которые являются одними из наиболее универсальных средств механизации труда.

Отклонения отметок при разработке одноковшовыми экскаваторами допускаются не более 0,05 м. Увеличение выборки грунта не допускается ввиду того, что укладка труб должна производиться на грунт ненарушенной структуры [1]. Столь высокие требования зачастую не могут быть выполнены на существующем оборудовании.

Все современные экскаваторы оснащены системами управления, которые позволяют более эффективно производить мелиоративные работы. Такие системы позволяют оценивать функционирование систем и подсистем экскаватора, что позволяет повысить точность процесса копания грунта [2-5].

Одноковшовые экскаваторы с гидроприводом, оснащенные системами управления рабочего органа, могут использоваться, с целью повышения качества разработки участков, для точного земледелия.

**Цель работы** – анализ точности возможного производства земельных работ, производимых одноковшовыми экскаваторами, с учетом динамических характеристик.

**Материал и методы.** Для выбора оптимальных методов повышения точности копания грунта применялось моделирование кинематической цепи рабочего механизма с учетом составляющих силы

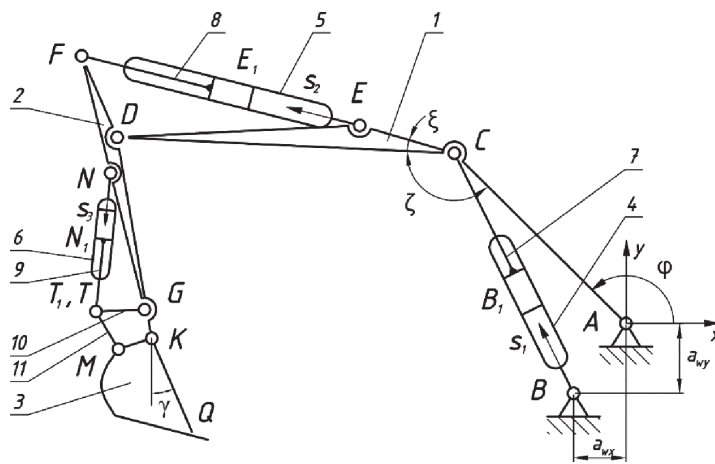
резания и реакций на штоках гидроцилиндров, влияющих на точность работы, и положения режущей кромки ковша рабочего механизма.

**Результаты и обсуждение.**

*Построение математической модели рабочего механизма экскаватора.* Моделирование проводилось для отечественного гусеничного экскаватора ЧЕТРА ЭГП-230. Данная работа является продолжением исследований, приведенных в [6], с расширением математической модели рабочего механизма и анализом возможных динамических погрешностей.

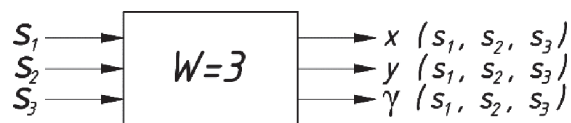
Рабочий механизм экскаватора представляет собой замкнутую систему последовательно соединенных одноподвижных групп. Геометрический анализ кинематической цепи рабочего органа экскаватора выполнен с использованием имитационного моделирования в среде MATLAB. Изменение положений звеньев задается функциями положения.

Плоская модель механизма копания грунта одноковшовым экскаватором в каждый момент времени описывает продольный профиль малого участка траншеи [7]. Положение рабочего механизма, а также исходный и обработанный профили грунтовой поверхности характеризуются только координатами вдоль осей  $x$  и  $y$ , при этом поворот рабочего механизма относительно гусеничной базы не рассматривается ввиду того, что в этот момент не происходит формирования продольного профиля дна траншеи. Кинематическая схема рабочего механизма представлена на рисунке 1.



**Рис. 1. Кинематическая схема рабочего механизма:**  
 1 – стрела; 2 – рукоять; 3 – ковш; 4, 5, 6 – гидроцилиндры;  
 7, 8, 9 – штоки гидроцилиндров; 10 – тяга; 11 – коромысло

Кинематическая схема плоского рабочего механизма экскаватора с числом подвижностей  $W = 3$  [6-8] имеет три обобщенных координаты входного воздействия и три координаты выходного воздействия и условно может быть представлена в виде связанной системы управления (рис. 2).



**Рис. 2. Условное представление схемы рабочего механизма экскаватора**

Построение математической модели [9-12] рабочего механизма экскаватора невозможно без учета динамических явлений в системе рабочего механизма, а также явлений в гидроцилиндрах. Иными словами, для адекватной оценки возможных погрешностей копания траншеи рабочим органом экскаватора при построении математической модели, учитывающей динамические явления в системе рабочего механизма, помимо геометрии кинематической цепи, необходимо учитывать зависимость ее параметров от времени. Данные параметры представлены обобщенными координатами, являющимися функциями от времени,  $s_{1,2,3} = f(t)$ . Зависимость обобщенных координат от времени обуславливает появление рассогласования между входным и выходным сигналами, что и определяет появление погрешности системы гидропривода [13].

Определение влияния запаздывания от системы гидропривода представляет собой задачу исследования динамики системы с переменными массами. Для упрощения расчетов задача рассматривается методом дискретизации. Ввиду того, что процесс копания рассматривается как процесс перемещения из одного дискретного состояния в другое, радиус кривизны траектории звеньев представлен в виде ломаной линии.

Запаздывание рассматривается на каждом этапе отдельно по обобщенной координате, которая изменяется в данный момент. Циклограмма рабочего процесса представлена на рисунке 3.

Обобщенная координата	1	2	3	4	5	6	7
$s_1$							
$s_2$							
$s_3$							

Рис. 3. Циклограмма рабочего процесса

На всем процессе копания траншеи по циклограмме рисунка 3 можно выделить этапы, когда возможен процесс несвоевременного заглубления либо выглубления ковша, а значит, появления дополнительной составляющей погрешности – погрешности от динамических свойств гидропривода – помимо геометрической погрешности копания (при изменении обобщенной координаты  $s_2$  на этапе 5 и при изменении обобщенной координаты  $s_3$  на этапе 6). Изменение обобщенной координаты  $s_1$  на точность процесса копания не влияет, так как при непосредственном контакте с грунтом на дне траншеи изменения этой обобщенной координаты не происходит. Однако формирование продольного профиля дна разрабатываемой траншеи происходит непосредственно на этапе 6, следовательно, изменение обобщенной координаты  $s_3$  может оказывать наибольшее влияние на вносимые погрешности положения дна траншеи.

Процесс копания с учетом введенных в расчеты упрощений рассматривается как процесс с одной степенью свободы: в каждый момент времени изменяется только одна обобщенная координата. При изменении обобщенной координаты  $s_3$  остальные обобщенные координаты не изменяются, что позволяет считать звенья, не связанные с обобщенной координатой  $s_3$ , условно неподвижными.

Для расчетов в качестве примера выбран тип почвы – суглинок крепкий; глина средняя, крепкая, влажная или разрыхленная; очень мягкие аргиллиты и алевролиты; уголь очень мягкий, рыхлый.

*Оценка влияния динамических характеристик на работу экскаватора.* Проведенный расчет динамических характеристик позволяет оценить возможное отклонение входных обобщенных координат, которые задаются перемещением штоков гидроцилиндров рабочего механизма, от теоретического значения, задаваемого на штоки гидроцилиндров управляющим воздействием. Результаты указанных расчетов выводятся для обобщенной координаты  $s_3$  в силу того, что при перемещении именно вдоль этой обобщенной координаты происходит формирование продольного профиля дна траншеи, а при неточном производстве этих работ операции заглубления или выглубления ковша рабочего механизма могут быть выполнены несвоевременно. Расчет производится для этапа 6-й циклограммы рабочего процесса при значениях обобщенных координат  $s_1 = 0$  м,  $s_2 = 0$  м. Результаты отклонения положений обобщенной координаты  $s_3$  с учетом динамических характеристик рабочего механизма экскаватора от теоретических их положений представлены на рисунке 4.

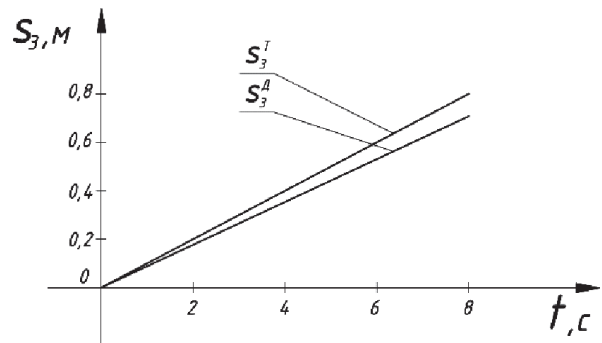
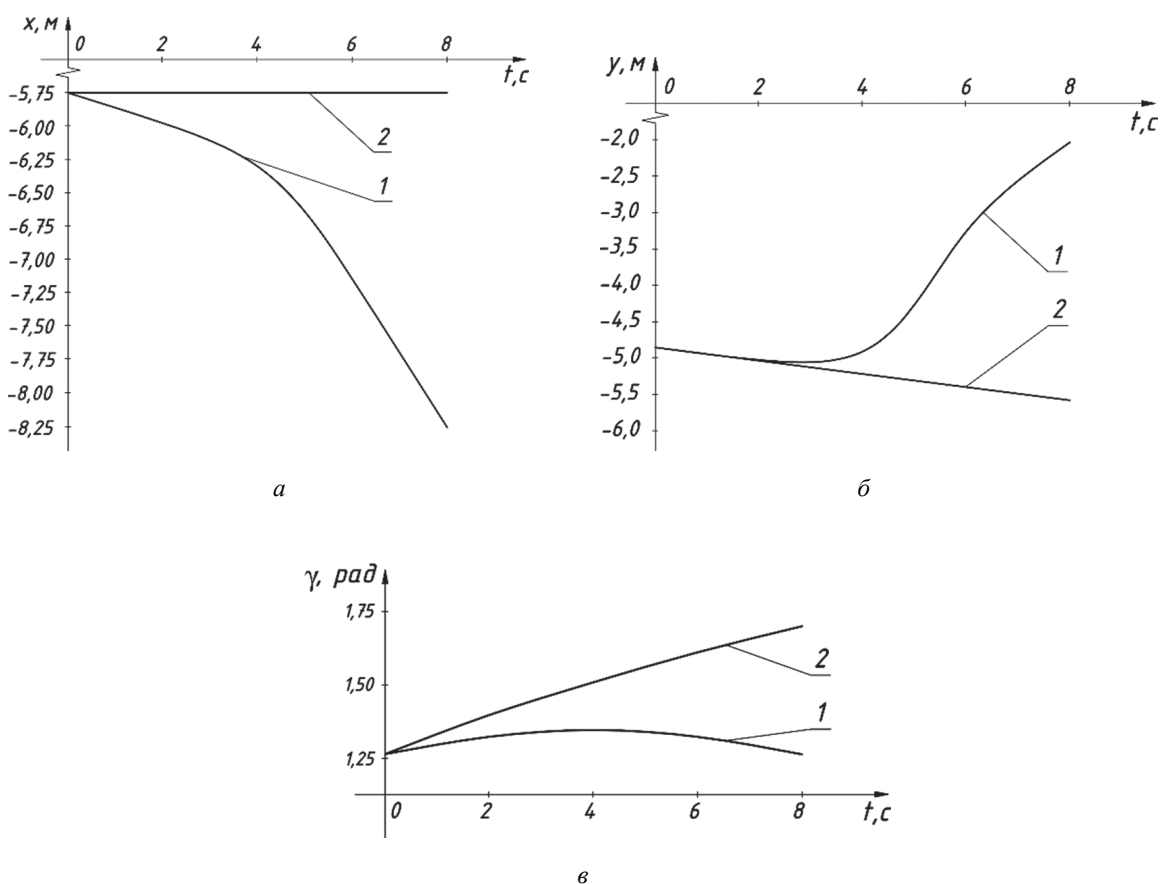


Рис. 4. Отклонения положений обобщенной координаты  $s_3^A$  с учетом динамических характеристик рабочего механизма от теоретических значений  $s_3^T$

С учетом указанных погрешностей положения штока гидроцилиндра ковша (обобщенная координата  $s_3$ ) можно также оценить влияние обобщенной координаты входного воздействия  $s_3$  на координаты выходного воздействия  $x, y, \gamma$  с учетом динамических характеристик рабочего механизма экскаватора (рис. 5).



**Рис. 5. Отклонения выходных координат  $x$ ,  $y$ ,  $\gamma$  от времени:**  
 1 – теоретические значения; 2 – с учетом динамических характеристик:  
 а – координата  $x$ ; б – координата  $y$ ; в – координата  $\gamma$

На рисунках указаны теоретические (расчетные) величины для координат выходного воздействия  $x$ ,  $y$ ,  $\gamma$ , теоретические величины координат выходного воздействия обозначены 1, а величины обобщенных координат с учетом динамических характеристик – 2.

Значения координат входного и выходного воздействия с учетом динамических характеристик рабочего механизма и возможного запаздывания гидропривода могут значительно отличаться от теоретических положений, что неизбежно приводит к несовершенствам производства земляных работ и является еще одним источником погрешностей отклонений формы продольного профиля дна траншеи (рис. 4, 5).

Однако моделирование силы резания производилось для выбранных параметров грунта при фиксированном значении удельного сопротивления резанию, которое может существенно изменяться для конкретной категории грунта, что может приводить к отклонению режущей кромки ковша от заданного положения. Но поскольку речь идет о разработке участков точного земледелия, следует учитывать и возможные изменения характеристик грунта в пределах одной категории и их влияние на силу резания.

Введение случайной составляющей силы резания из-за колебаний удельного сопротивления резанию приводит к появлению дополнительных отклонений при изменении обобщенной координаты  $s_3$ . Результаты моделирования представлены на рисунке 6 для средних значений обобщенной координаты  $s_3$ .

Добавление случайной составляющей силы резания путем учета изменения удельного сопротивления резанию приводит к дополнительным колебаниям положения обобщенной координаты  $s_3$  вдоль штока гидроцилиндра, что влечет к избыточным или недостаточным перемещениям штока относительно заданного значения. При учете динамических характеристик рабочего механизма к концу этапа 6 циклограммы рабочего процесса разница между заданным и получаемым положениями составляет 89,2 мм, а при учете динамических характеристик с добавлением случайной составляющей силы резания – 92,5 мм.

Погрешность системы гидропривода является динамической характеристикой, она зависит от скоростного и силового режима работы гидроцилиндра. При моделировании погрешность удобно рассматривать как сумму погрешностей и от запазды-

вания гидропривода, и от избыточного перемещения штоков гидроцилиндров, то есть погрешность от динамических характеристик гидропривода может быть определена следующим образом:

$$\Delta_{\text{дин}} = \Delta_1 + \Delta_2,$$

где  $\Delta_{\text{дин}}$  – погрешность от динамических характеристик гидропривода;  $\Delta_1$  – погрешность от избыточ-

ного перемещения штоков гидроцилиндров;  $\Delta_2$  – погрешность от запаздывания гидропривода.

Погрешность  $\Delta_2$  от запаздывания гидропривода рассчитывается для среднего времени запаздывания с учетом данных предыдущих исследований [14]. Суммарная погрешность положения режущей кромки ковша рабочего механизма:  $\Delta_{\text{дин}} = \Delta_1 + \Delta_2 = 120,9$  мм. Полученное значение превышает требуемое значение (0,05 м) более чем в 2 раза.

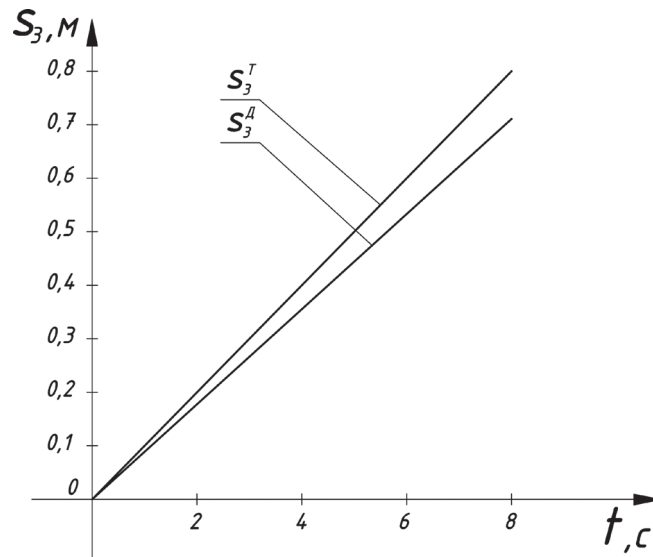


Рис. 6. Положения обобщенной координаты  $s_3$  с учетом случайной составляющей силы резания  $P_{\text{рез}}$

### Выводы

Погрешность положения режущей кромки рабочего органа экскаватора в нижней точке копаемой траншеи (при максимальной нагрузке на рабочий орган) определяется на основании траекторий возможных положений с учетом динамических характеристик и явлений запаздывания гидропривода. Максимальное возможное отклонение с учетом погрешностей изготовления звеньев кинематической цепи рабочего механизма, возможного отклонения штоков гидроцилиндров и динамических характеристик превышает предписываемое СНиП значение на 242%, то есть примерно в 2,4 раза.

Соответствие всех звеньев техническим требованиям не гарантирует соблюдения требуемой точности перемещения выходного звена кинематической цепи, а значит, недобор грунта в основной траншеи может превысить требуемое значение (0,05 м).

### Библиографический список

1. СП 100.13330.2011. Мелиоративные системы и сооружения. М.: Росстандарт, 2015. 146 с.

2. Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора: Монография Омск: СибАДИ, 2011. 152 с.

3. Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин: Дис. ... докт. техн. наук. Омск: СибАДИ, 2007. 304 с.

4. Шеховцова Д.А. Методика определения погрешности информационно-измерительных устройств для системы управления глубиной копания одноковшовым экскаватором // Вестник СибАДИ. 2014. № 3 (37). С. 34-39.

5. Баловнев В.И., Зеленин А.Н., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

6. Подчасов О.В., Подчасов Е.О., Терентьева А.Д. Анализ возможности применения одноковшового экскаватора при разработке участков точного земледелия // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина. 2018. № 1 (83). С. 26-33. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-1-26-33.

7. Терентьева А.Д. Анализ точности перемещения рабочего органа одноковшового экскаватора // Теория механизмов и машин. 2016. Т. 14. № 4 (32). С. 218-228.



8. Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: Учебник и практикум для СПО. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2016. 429 с.

9. Павлов В.П. Методология автоматизированного проектирования рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов. Дис. ... докт. техн. наук. Красноярск, 2011. 349 с.

10. Щербаков И.С. Система автоматизации моделирования одноковшового экскаватора с гидроприводом. Дис. ... канд. техн. наук. Омск, СибАДИ, 2006. 179 с.

11. Подчасов Е.О., Терентьева А.Д. Анализ возможности применения одноковшового экскаватора при прокладке коммуникаций // Международная научная конференция «Фундаментальные и приклад-

ные задачи механики». 24-27 октября 2017 г. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 141-142.

12. Подчасов Е.О., Терентьева А.Д. Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-8-1654.

13. Наземцев А.С. Пневматические и гидравлические приводы и системы. Часть 2. Гидравлические приводы и системы. Основы: Учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2007. 304 с.

14. Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора: Монография. Омск: СибАДИ, 2011. 152 с.

Статья поступила 23.03.2018

## ESTIMATING THE INFLUENCE OF DYNAMICAL CHARACTERISTICS ON THE ACCURACY OF EARTHWORKS PERFORMED BY A POWER SHOVEL USED TO DEVELOP PRECISION FARMING PLOTS

**OLEG V. PODCHASOV**, Head of Laboratory<sup>1</sup>

E-mail: podch@mail.ru

**YEVGENY O. PODCHASOV**, Assistant Professor<sup>2</sup>

E-mail: podchacha@yahoo.com

**ARINA D. TERYTYEVA**, Assistant Professor<sup>2</sup>

E-mail: terentyevaad@gmail.com

<sup>1</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 127550, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, 2nd Baumanskaya Str., 5/1, Moscow, Russian Federation

According to the previously developed mathematical model that determines the accuracy parameters of land works, the authors have made an analysis of the accuracy of performed works taking into account cutting forces. The former mathematical model of the working mechanism of the Chetra EGP-230 power shovel actuator has been supplemented by dynamic characteristics. A working process cyclogram has been designed, and basing on it, an influence of each hydraulic cylinder of the working mechanism on the accuracy of a longitudinal profile of the developed trench bottom has been evaluated. The authors have also estimated the value deviation of the generalized input coordinate from the time determined by the hydraulic cylinder rod displacement under the action of forces as well as from the theoretical value specified by the control action. The found discrepancy of displacements along the generalized coordinate from the hydraulic cylinder rod and the theoretical control action also affects the coordinates of the output impact on the cutting edge of the working mechanism bucket. The coordinate values of the input and output effects, taking account of the dynamic characteristics of the working mechanism and a possible delay in the hydraulic drive action, can significantly differ from the theoretical values, which inevitably leads to the inaccuracy of excavation works, thus being an additional source of errors in the shape of a longitudinal profile of the trench bottom. If the dynamic characteristics of the working mechanism are taken into account, the difference between the specified and actual positions is 0.0892 m. In the meanwhile, total dynamic error in the cutting edge position of the working mechanism bucket, taking account of cutting forces and a possible delay of the hydraulic drive action, is 0.1176 m. The value obtained exceeds the required value (0.05 m) in more than 2 times. Basing on the simulation results, it has been

found that the compliance of all elements with technical requirements does not guarantee the compliance with the required accuracy of the output element (shovel) movement. It means that an insufficient amount of earth at the trench bottom may exceed the required value (0.05 m), or increased excavation may be done, so further land reclamation work may become impossible.

**Keywords:** power shovel, mathematical model, automatic control system, cyclogram, cutting force, precision, precision agriculture

### References

1. СП 100.13330.2011. Meliorativniye sistemy i sooruzheniya [Reclamation systems and structures]. Moscow, Rosstandart, 2015. 146 p. (in Rus.)
2. Shcherbakov V.S., Sukharev R.Y. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya rabochim organom tsepnogo transheinogo ekskavatora [Improving the control system of the working elements of a chain trencher]. Omsk, SibADI, 2011. 152 p. (in Rus.)
3. Meshcheryakov V.A. Adaptivnoye upravleniye rabochimi protsessami zemleroino-transportnykh mashin. Dis. ... doctor. tehn. nauk. [Adaptive control of the workflows of earth-moving machines. DSc (Eng) thesis]. Omsk, SibADI, 2007. 304 p. (in Rus.)
4. Shekhovtseva D.A. Metodika opredeleniya pogreshnosti informatsionno-izmeritelnykh ustroystv dlya sistemy upravleniya glubinoi kopaniya odnokovshovym ekskavatorom [Methods of determining the accuracy of information-measuring devices for the control system of deep-digging power shovels]. *Vestnik SibADI*. 2014. No. 3 (37). Pp. 34-39. (in Rus.)
5. Balovnev V.I., Zelenin A.N., Kerov I.P. Mashini dlya zemlianih rabot [Earth-moving machines]. Moscow, Mashinostroeniye, 1975. 422 p. (in Rus.)
6. Podchasov O.V., Podchasov Ye.O., Terentieva A.D. Analiz vozmozhnostey primeneniya odnokovshovogo ekskavatora pri razrabotke uchastkov tochnogo zemledeliya [Feasibility analysis of the use of a power shovel for developing precision farming plots]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018. No. 1 (83). Pp. 26-33. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-1-26-33. (in Rus.)
7. Terentieva A.D. Analiz tochnosti peremeshcheniya rabocheho organa odnokovshovogo ekskavatora [Accuracy analysis of working element movements of a power shovel]. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2016. No. 4. Pp. 218-228. (in Rus.)
8. Timofeyev G.A. Teoriya mekhanizmov i mashin. Uchebnik i praktikum dlya SPO [Theory of mechanisms and machines. Study manual and workshop course for secondary technical educational institutions]. 3<sup>rd</sup> ed., rev. and ext. Moscow, Yurait, 2016, 429 p. (in Rus.)
9. Pavlov V.P. Metodologiya avtomatizirovanogo proektirovaniya rabocheho oborudovaniya odnokovshovykh ekskavatorov. Dis. ... dokt. tehn. nauk. [Methodology of computer-aided design of working equipment for power shovels. DSc (Eng) thesis]. Krasnoyarsk, 2011. 349 p. (in Rus.)
10. Shcherbakov I.S. Sistema avtomatizatsii modelirovaniya odnokovshovogo ekskavatora s gidropriivodom. Dis. ... kand. tehn. nauk. [Automation system of simulating the operation of a power shovel with a hydraulic drive. PhD (Eng) thesis.]. Omsk, SibADI, 2006, 179 p. (in Rus.)
11. Podchasov Ye.O., Terentieva A.D. Analiz vozmozhnosti primeneniya odnokovshovogo ekskavatora pri prokladke kommunikatsiy [Feasibility analysis of the use of a power shovel for pipe laying]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Fundamental'nyye i prikladnyye zadachi mekhaniki". 24-27 oktyabrya 2017 g.* Moscow, Izdatel'stvo MGТУ im. N.E. Bauman. Pp. 141-142. (in Rus.)
12. Podchasov Ye.O., Terentieva A.D. Analiz tochnosti rabot, proizvodimyykh rabochim mekhanizmom odnokovshovogo ekskavatora [Accuracy analysis of working element movements of a power shovel]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2017. No. 8 (68). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-8-1654. (in Rus.)
13. Nazemtsev A.S. Pnevmaticheskiye i gidravlicheskiye privody i sistemy. Chast 2. Gidravlicheskiye privody i sistemy. Osnovy. Uchebnoye posobiye [Pneumatic and hydraulic actuators and systems. Part 2: Hydraulic actuators and systems. Basics. Study manual. Moscow, FORUM, 2007, 304 p. (in Rus.)
14. Shcherbakov V.S., Sukharev R.Yu. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya rabochim organom tsepnogo transheinogo ekskavatora. Monografiya [Improving the control system of the working element of a chain trench shovel: Monograph]. Omsk, SibADI, 2011. 152 p. (in Rus.)

*The paper was received on March 23, 2018*