

ПОДЧАСОВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ¹

E-mail: podch@mail.ru

ПОДЧАСОВ ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ²

E-mail: podchacha@yahoo.com

ТЕРЕНТЬЕВА АРИНА ДМИТРИЕВНА²

E-mail: terentyevaad@gmail.com

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

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

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ УЧАСТКОВ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Произведен анализ точности возможного производства земельных работ, производимых одноковшовыми экскаваторами. Оценка точности производства работ рабочим механизмом проведена на математической модели рабочего механизма ввиду возможностей уточнения модели другими параметрами, влияющими на точность, для дальнейших исследований. Построена кинематическая модель рабочего механизма для отечественного гусеничного экскаватора Четра ЭГП-230, создана ее математическая модель для проведения настоящих исследований кинематической точности рабочего механизма с возможностью проведения дальнейших расчетов точности с учетом динамических характеристик. Для оценки точности влияния каждого из гидроцилиндров рабочего механизма на точность положения режущей кромки ковша построены рабочая область и зона обслуживания. Построена область возможных положений режущей кромки ковша с учетом погрешностей изготовления звеньев. При исследовании точности кинематической цепи рабочего механизма классическим методом «максимума-минимума» область возможных положений составляет 20,6 мм по вертикальной координате. Однако при других сочетаниях погрешностей выполнения звеньев область возможных положений составляет 133,5 мм по вертикальной координате, что в несколько раз превышает регламентируемое СНИП значение 50 мм. Исследовано влияние погрешностей перемещения штоков гидроцилиндров на положение режущей кромки ковша в зоне обслуживания. При разработке траншеи глубиной до 2,5 м погрешность положения режущей кромки ковша рабочего механизма экскаватора с учетом погрешностей перемещения штоков гидроцилиндров может составлять от 10 до 20 мм, а при разработке более глубокой траншеи погрешность положения режущей кромки составляет не более 10 мм. Произведены оценки геометрической погрешности перемещения рабочего механизма и погрешности перемещения рабочего механизма с учетом погрешности перемещения штоков. 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 приведет к невозможности прокладки мелиоративных систем.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, математическая модель, система управления, зона обслуживания, точность, точное земледелие.

Введение. Одним из основных направлений развития сельского хозяйства является освоение точного (координатного) земледелия. Для внедрения подобного метода ведения сельскохозяйственных работ необходимо решать комплекс проблем, которые могут быть разделены на агротехнические и механико-технологические. Одной из основных задач, необходимых для решения механико-технологических задач точного земледелия, является

разработка исходных требований к технологиям, функциональным схемам и рабочим органам машин для дифференцированного воздействия на факторы плодородия [1]. В свою очередь, одним из наиболее важных факторов плодородия является влажность почв. Для ее регулирования необходимо осуществлять мелиоративные работы, которые могут включать в себя устройство как систем внесения жидкости, так и систем осушения почв [2].

Для осуществления этих работ могут применяться одноковшовые экскаваторы с оборудованием «обратная лопата».

Существующие в России своды правил диктуют высокие требования к точности производства земельных работ при мелиорации. Допускаются недоборы грунта в основании земляных сооружений, разрабатываемых экскаваторами, не более 0,05 м. Увеличение выборки грунта, в свою очередь, не допускается ввиду того, что укладка труб должна производиться на грунт ненарушенной структуры [3]. Столь высокие требования зачастую не могут быть выполнены на существующем оборудовании.

Важнейшей составной частью современных экскаваторов являются системы управления, использование которых актуально для проведения земельных работ по мелиорации. Такого рода системы управления позволяют оперативно оценивать с помощью вычислительной техники функционирование систем одноковшового экскаватора и составляющих их подсистем и устройств [4-7], что позволит более точно оценивать положения одноковшового экскаватора и прокладываемой траншеи, а также повысить точность процесса копания грунта. Выбор метода управления рабочим органом машины для земельных работ должен быть основан на знании динамических свойств машины, а также статистических характеристик случайных возмущений, действующих на указанную машину. Основное направление автоматизации одноковшового экскаватора – это управление рабочим органом с целью обеспечения высокого качества работ, т.е. обеспечения требований к геометрической точности дна траншеи.

Таким образом, одноковшовые экскаваторы с системами управления рабочим органом могут быть применены для решения проблемы повышения точности разработки участков для точного земледелия.

Цель работы – анализ точности возможного производства земельных работ, производимых одноковшовыми экскаваторами.

Материал и методы. Для выбора оптимальных методов повышения точности копания грунта применялось моделирование кинематической цепи рабочего механизма с целью возможности дальнейшего расширения математической модели и исследования других параметров, влияющих на точность работы и положения режущей кромки ковша рабочего механизма.

Построение кинематической модели рабочего механизма экскаватора.

Для моделирования процесса копания грунта с целью дальнейшего создания систем управления рабочим механизмом для повышения точности копания необходимо создание модели рабочего механизма экскаватора.

На точность копания грунта рабочим механизмом оказывают влияние: точность управления, которая, в свою очередь, зависит от оператора, управляющего экскаватором в ручном режиме, или от си-

стемы управления в случае наличия автоматизированной системы управления рабочим механизмом; запаздывание от любого из указанных вариантов управления; характеристики грунта; неровности поверхности, на которой расположена гусеничная либо колесная база экскаватора; точность изготовления звеньев рабочего механизма, т.е. допускаемые погрешности при изготовлении основных звеньев.

Для выбора оптимальных методов повышения точности копания грунта и моделирования систем управления рабочим механизмом необходимо выбрать конкретную модель экскаватора и предложить методы рассматривать и исследовать уже для нее. Если для одной конкретной модели экскаватора будут верны предлагаемые методы, то и для других экскаваторов того же типа они будут также верны. Кроме того, моделирование с выводами и принятием конкретных решений без привязки к какому-либо конкретному экскаватору и его характеристикам невозможно.

Для дальнейших расчетов был выбран гусеничный экскаватор ЧЕТРА ЭГП-230 (рис. 1), выпускаемый Чебоксарским предприятием «Четра – Промышленные машины».



Рис. 1. Гусеничный экскаватор ЧЕТРА ЭГП-230

Выбранный для моделирования одноковшовый экскаватор может быть использован на общестроительных работах. Для решения поставленной задачи была разработана кинематическая схема рабочего механизма экскаватора с целью создания ее математической модели.

Плоская модель рабочего механизма на основе структурно-кинематических связей позволяет исследовать особенности рабочего механизма. Для модели обобщенными координатами входного воздействия являются s_1, s_2, s_3 , а координатами выходного воздействия – x, y, γ . Схема рабочего механизма с числом подвижностей $W = 3$ [8, 9] представлена на рисунке 2.

Определение положений всех кинематических пар звеньев рабочего механизма экскаватора, представляющего собой разомкнутую кинематическую цепь, производится методом проекций векторных контуров.

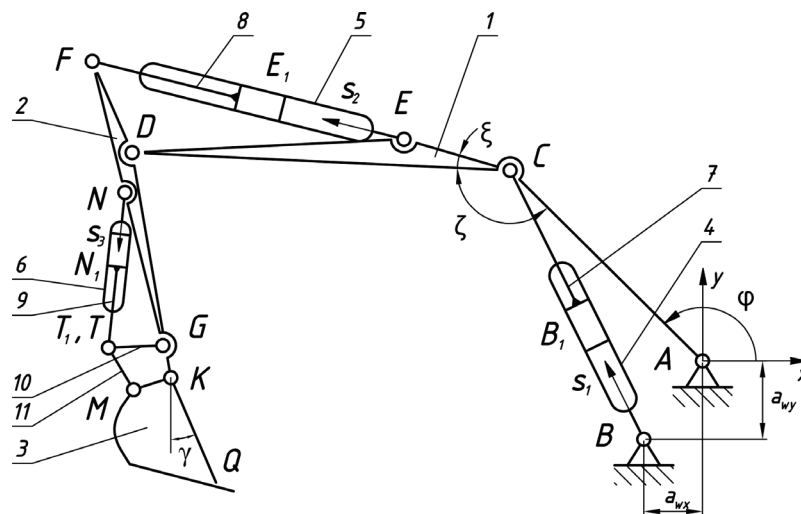


Рис. 2. Кинематическая схема рабочего механизма:
 1 – стрела; 2 – рукоять; 3 – ковш; 4, 5, 6 – гидроцилиндры;
 7, 8, 9 – штоки гидроцилиндров; 10 – коромысло; 11 – тяга

Анализ всех участков кинематической цепи рабочего механизма и определение положений звеньев и кинематических пар проводится с учетом изменения всех трех обобщенных координат входного воздействия s_1, s_2, s_3 применением пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB [10-13] и в рамках решения указанной задачи не приводится. Изменение положений всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма экскаватора задается функциями положения.

Построение рабочей области и зоны обслуживания экскаватора. Построение математической модели рабочего механизма исследуемого экскаватора приводит к возможности проведения дальнейших исследований на этой модели. Имея математическую модель рабочего механизма, можно оценить влияние каждой из обобщенных

координат входного воздействия, а также влияние каждого из звеньев кинематической цепи на рабочую область и зону обслуживания. Также представляется возможным произвести оценку точности положения режущей кромки ковша 3 в зависимости от входных обобщенных координат. Для исследования точности положения режущей кромки ковша в любой точке рабочей области необходимо вначале выполнить построение рабочей области.

Рабочую область и зону обслуживания можно получить, задаваясь возможным перемещением по входным обобщенным координатам s_1, s_2, s_3 . Для исследования влияния обобщенных координат на положение точки Q на режущей кромке ковша рабочего механизма экскаватора построение рабочей области проводится отдельно от каждой выходной обобщенной координаты (рис. 3).

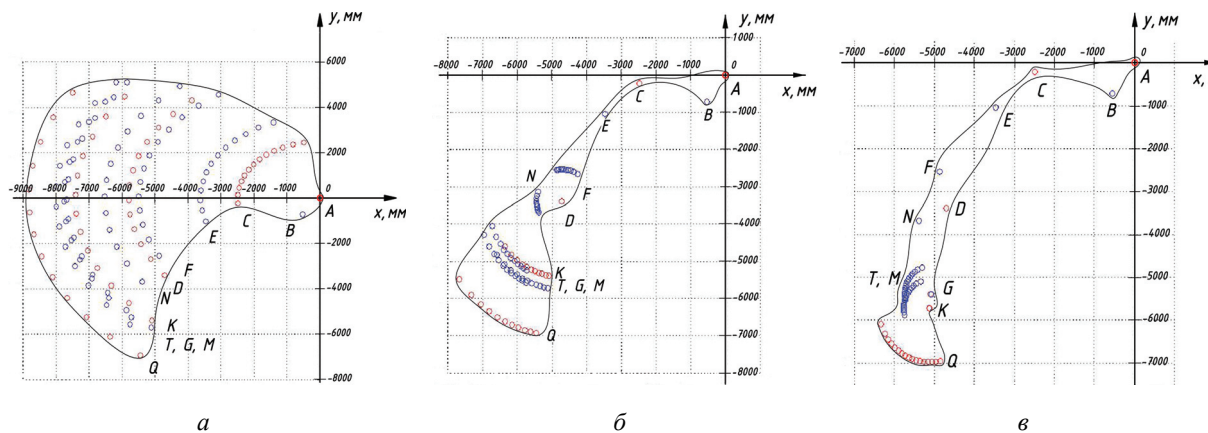


Рис. 3. Рабочая область рабочего механизма экскаватора
 в зависимости от изменения входных обобщенных координат s_1, s_2, s_3 :
 а) $s_1 = var, s_2 = 0, s_3 = 0$; б) $s_1 = 0, s_2 = var, s_3 = 0$; в) $s_1 = 0, s_2 = 0, s_3 = var$

Для исследования влияния каждой из входных обобщенных координат s_1, s_2, s_3 на положение режущей кромки ковша рабочие области от каждой из обобщенных координат последовательно расширялись введением возможного перемещения

от каждой последующей обобщенной координаты. Построение производилось начиная от обобщенной координаты s_1 в направлении обобщенной координаты s_3 , т.е. в направлении от стрелы к ковшу (рис. 4).

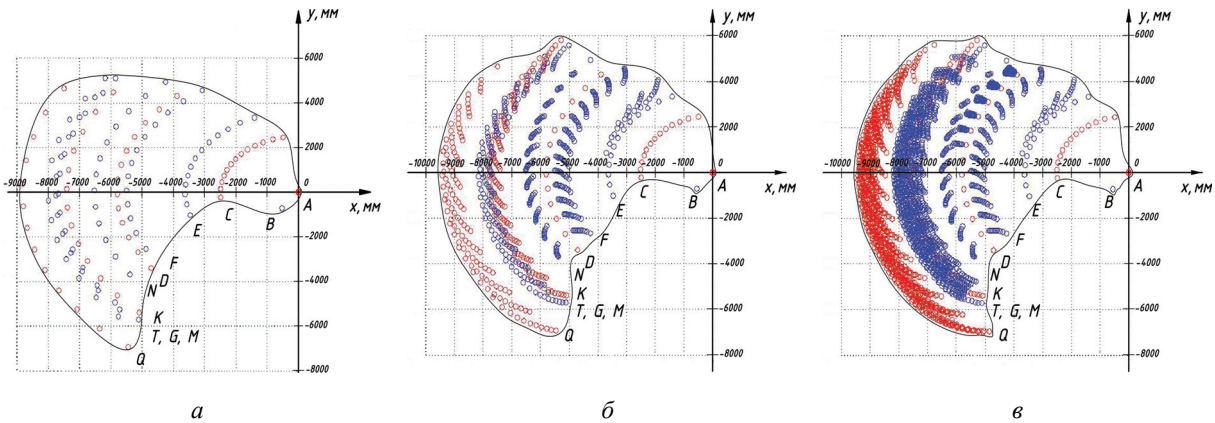


Рис. 4. Рабочая область рабочего механизма экскаватора в зависимости от последовательного изменения входных обобщенных координат s_1, s_2, s_3 :
 а) $s_1 = var, s_2 = 0, s_3 = 0$; б) $s_1 = var, s_2 = var, s_3 = 0$; в) $s_1 = var, s_2 = var, s_3 = var$

Совокупная рабочая область (рис. 4в) представляет собой множество положений участка кинематической цепи при изменении обобщенной координаты s_1 , на каждое из которых наложено множество положений участка кинематической цепи при изменении обобщенной координаты s_2 , на каждое из которых, в свою очередь, наложено множество положений участка кинематической цепи при изменении обобщенной координаты s_3 .

Зона обслуживания рабочего механизма получается аналогичной рабочей области рабочего механизма экскаватора и выводится при одновременном изменении всех трех обобщенных координат входного воздействия s_1, s_2, s_3 (рис. 5).

Совокупная зона обслуживания представляет собой множество положений точки Q режущей кромки ковша при одновременном изменении всех обобщенных координат входного воздействия s_1, s_2, s_3 .

Оценка геометрических погрешностей перемещения рабочего механизма экскаватора. Все звенья кинематической цепи рабочего механизма имеют допуски на величину хода штока в зависимости от основных размеров [14], а также возможны погрешности при сборке элементов рабочего механизма. Сочетание погрешностей изготовления звеньев рабочего механизма погрешностей сборки рабочего механизма и погрешности сборки рабочего механизма с поворотной платформой, а также проблемы, связанные с погрешностью управления рабочим механизмом, могут оказывать существенное влияние на точность копания, а значит, положение режущей кромки ковша экскаватора может существенно отличаться от теоретического, а точность

копания, в свою очередь, может отличаться от регламентируемой СНиП. Существование указанных погрешностей может приводить к выходу режущей кромки ковша рабочего механизма из поля допуска.

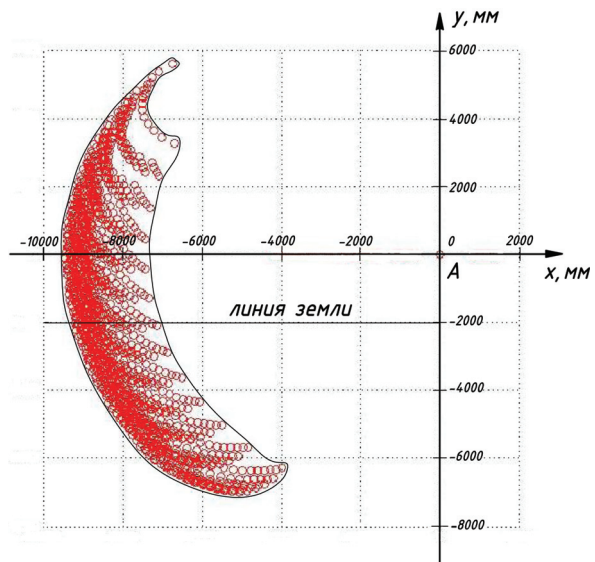


Рис. 5. Зона обслуживания рабочего механизма экскаватора в зависимости от изменения входных обобщенных координат s_1, s_2, s_3

Оценка погрешностей перемещения рабочего механизма экскаватора проводится методом максимума-минимума составлением размерной цепи [15]. Однако применение известной методики рас-

чета размерных цепей затруднено ввиду того, что кинематическая цепь рабочего механизма является разомкнутой, а значит, применение стандартной методики невозможно. В этом случае можно заменить геометрический расчет размерной цепи повторным расчетом кинематической цепи с учетом возможных погрешностей изготовления звеньев рабочего механизма экскаватора. Сравниваются идеализированные геометрические расчеты (размеры приняты номинальными, погрешности отсутствуют) и кинематическая цепь с максимально и минимально возможными линейными погрешностями перемещения.

Расчет размерной цепи рабочего механизма экскаватора с учетом погрешностей изготовления элементов рабочего механизма проводится с применением пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB.

На основании проведенных расчетов с учетом погрешностей изготовления звеньев получена область возможных положений точки Q на режущей кромке ковша экскаватора в момент врезания в грунт на дне траншеи глубиной 2,4 м (при $s_1 = 0$ мм, $s_2 = 300$ мм, $s_3 = 200$ мм). Область возможных положений представлена графически на рисунке 6.

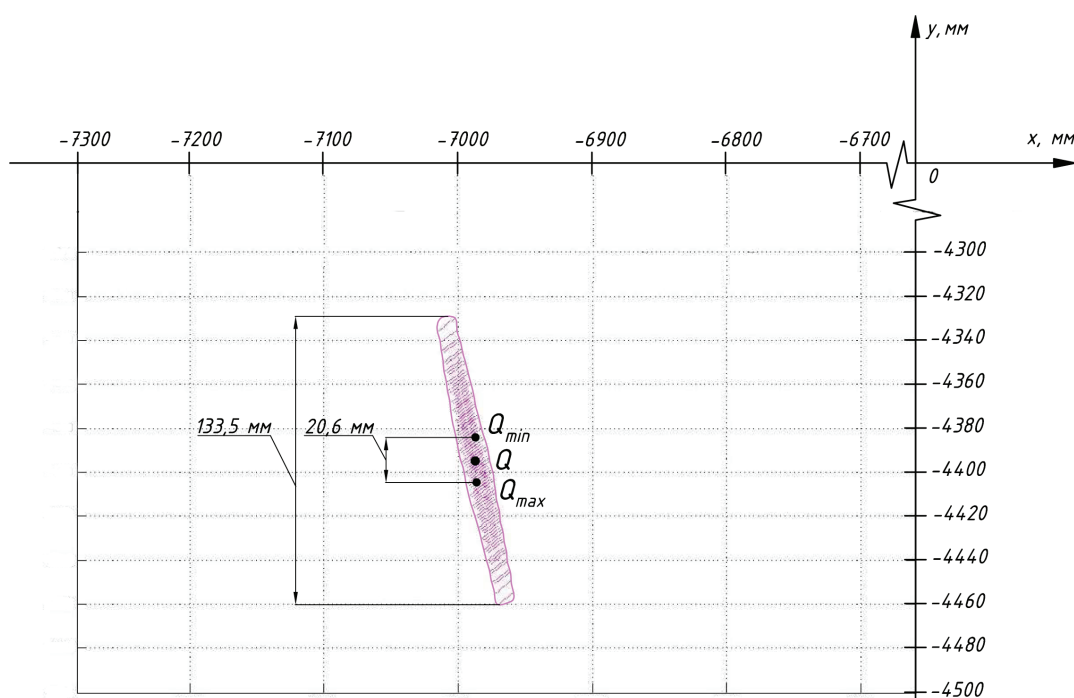


Рис. 6. Область возможных положений режущей кромки ковша в момент врезания в грунт на дне траншеи при $s_1 = 0$ мм, $s_2 = 300$ мм, $s_3 = 200$ мм

В построенной области отмечена точка Q – идеальное положение режущей кромки ковша экскаватора при изготовлении всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма без погрешностей. Также в построенной области отмечены точки Q_{max} и Q_{min} – положения режущей кромки ковша при проведении оценки точности возможных положений методом максимума-минимума. Точка Q_{max} получена при максимальном отклонении всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма, а Q_{min} – при минимальном отклонении. В случае проведения оценки точности методом максимума-минимума область возможных положений составляет 20,6 мм вдоль оси ординат. Однако при других сочетаниях погрешностей выполнения звеньев область возможных положений существенно расширяется и составляет 133,5 мм вдоль оси ординат, что в несколько раз превышает регламентируемое СНиП значение 50 мм.

Для расчета нелинейной разомкнутой кинематической цепи классический метод максимума-минимума не дает оценки максимальной погрешности положения точки Q на режущей кромке ковша экскаватора. Получаемая этим методом погрешность является систематической и может быть скорректирована при проведении приемо-сдаточных испытаний посредством системы управления рабочим механизмом экскаватора.

Оценка погрешностей перемещения рабочего механизма экскаватора с учетом погрешностей перемещения штоков гидроцилиндров. Штоки гидроцилиндров также имеют допуски на величину хода в зависимости от основных размеров. С учетом погрешностей хода штоков гидроцилиндров рабочего механизма для звеньев без учета погрешностей их изготовления может быть получено распределение возможных погрешностей в зоне обслуживания (рис. 7).

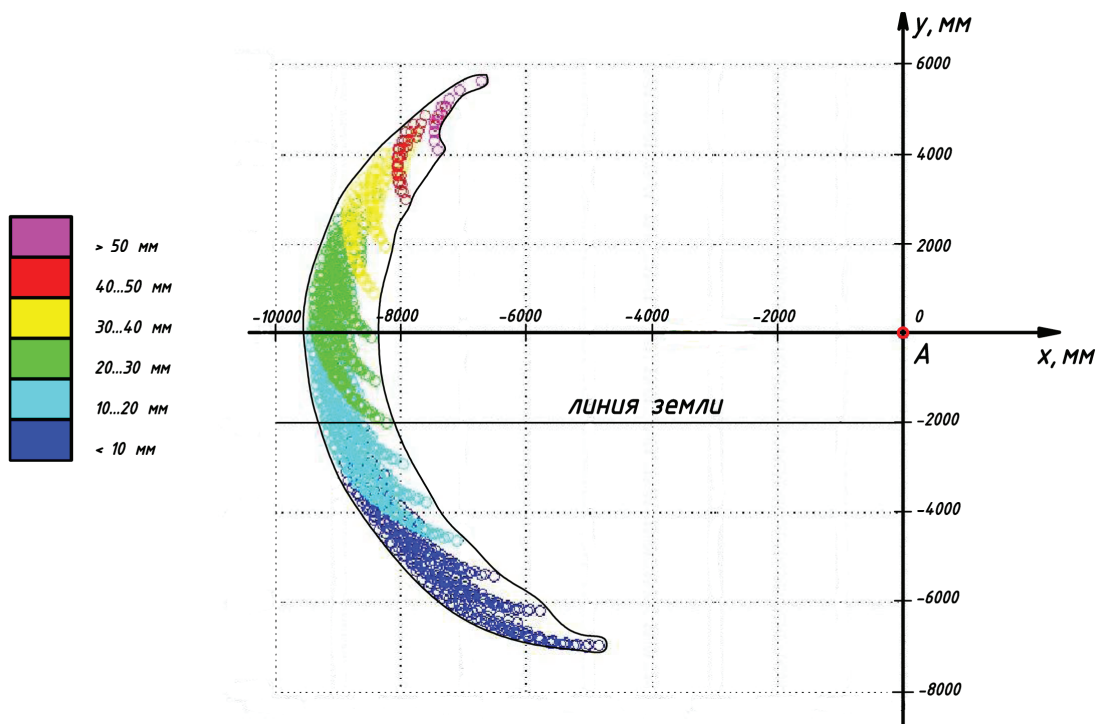


Рис. 7. Распределение возможных погрешностей положения точки Q в зоне обслуживания

Положение точки Q на режущей кромке ковша экскаватора в зоне обслуживания может значительно колебаться из-за изменений положений штоков. Для наглядности на рисунке также показана линия земли для конкретно выбранного экскаватора с учетом высоты гусеничной базы.

Выводы

В результате математического моделирования получена область, в которую может попадать режущая кромка ковша экскаватора при изготовлении всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма с допустимыми погрешностями. Также дополнительно было проведено исследование положения режущей кромки ковша экскаватора с учетом погрешностей хода штоков гидроцилиндров в зависимости от основных размеров. Проведенные исследования и расчеты показали, что в случае нелинейной разомкнутой кинематической цепи классический метод максимума-минимума не дает оценки максимальной погрешности положения точки Q на режущей кромке ковша экскаватора, что важно для оценки требований точности выполнения элементов рабочего механизма. Это означает, 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 приведет к невозможности прокладки систем мелиорации.

Библиографический список

1. Личман Г.И., Беленков А.И. История развития точного (координатного) земледелия // Нивы Зауралья. 2014. № 9 (120).
2. Чайка Е.А. Разработка опытного участка для низконапорного орошения стоками КРС / Инновационные технологии мелиорации земель сельскохозяйственного назначения: Межвузовский сборник трудов молодых ученых и специалистов. Новочеркасск, 2014. С. 19-22.
3. СП 100.13330.2011. Мелиоративные системы и сооружения. М.: Росстандарт, 2015. 146 с.
4. Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора. Омск: СибАДИ, 2011. 152 с.
5. Мещеряков В.А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин: Дис. ... докт. техн. наук. Омск: СибАДИ, 2007. 304 с.
6. Шеховцова Д.А. Методика определения погрешности информационно-измерительных устройств для системы управления глубиной копания одноковшовым экскаватором // Вестник СибАДИ. 2014. № 3 (37). С. 34-39.
7. Баловнев В.И., Зеленин А.Н., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.
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. Терентьева А.Д. Анализ точности перемещения рабочего органа одноковшового экскаватора // Теория механизмов и машин. 2016. № 4 (32). Т. 14. С. 218-228.

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

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

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

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

13. Подчасов Е.О., Терентьева А.Д. Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68).

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

15. Плуталов В.Н. Метрология и техническое регулирование. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 416 с.

Статья поступила 02.11.2017

ANALYSING PROSPECTS OF EMPLOYING SINGLE-BUCKET EXCAVATOR IN CULTIVATING PRECISION AGRICULTURE PLOTS

OLEG V. PODCHASOV¹

E-mail: podch@mail.ru

EVGENY O. PODCHASOV²

E-mail: podchacha@yahoo.com

ARINA D. TARENTIEVA²

E-mail: terentyevaad@gmail.com

¹Russian Timiryazev State Agrarian University; 127550, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

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

The authors have made an analysis of the accuracy of earthworks carried out by single-bucket excavators. The accuracy of works carried out by the working mechanism is estimated basing on the mathematical model of the working mechanism with account of possible influence of other parameters in terms of further research. The paper provides the design of a kinematic model of the working mechanism for the domestic caterpillar excavator Chetra EGP-230, outlines its mathematical model intended to estimate the kinematic accuracy of the working mechanism providing for further accuracy calculations with account of dynamic characteristics. To assess the influence accuracy of each hydraulic cylinder of the working mechanism on the position accuracy of the bucket cutting edge, a working area and a service area have been constructed. The range of possible positions of the bucket cutting edge has been calculated with account of errors in the manufacturing of links. When investigating the kinematic chain accuracy of the working mechanism using the classical "maximum-minimum" method, the range of possible positions accounts for 20.6 mm along the vertical coordinate. However, with other combinations of errors in the manufacturing of links, the range of possible positions accounts for 133.5 mm along the vertical coordinate, which is several times higher than the regulated SNiP (Construction Rules and Regulations) value of 50 mm. The authors have studied the influence of errors in the travelling of hydraulic cylinder rods on the position of the bucket cutting edge in the service area. In making a trench up to 2.5 m deep, the position error of the bucket cutting edge of the excavator's working mechanism, with account of the errors in the travelling of hydraulic cylinder rods, can vary from 10 to 20 mm, and for a deeper trench, the position error of the cutting edge is less than 10 mm. The authors have estimated the geometrical error in the working mechanism displacement and the error in the working mechanism displacement with account of the error in the travelling of rods. Basing on the simulation results, it has been found that the compliance of all links with technical requirements does not guarantee the compliance with the required accuracy of the displacement of the output link of a kinematic chain, which means that insufficient soil amount at the trench base may exceed the required value of 0.05 m, or there is a possibility of increased soil excavation, which could make the development of reclamation systems impossible.

Key words: single-bucket excavator, mathematical model, automatic control system, service zone, precision, precision agriculture.

References

1. Lichman G.I., Belenkov A.I. Istoriya razvitiya tochnogo (koordinatnogo) zemledeliya [The history of the development of precision (site-specific) agriculture]. *Nivi Zauralia*, 2014, No. 9 (120). (in Rus.)
2. Chaika Ye.A. Razrabotka opitnogo uchastka dlya nizkonapornogo orosheniya stokami KRS [Development of a pilot site for low-pressure irrigation with cattle farm effluents]. *Innovatsionnyee tehnologii melioratsii zemel selskokhozyajstvennogo naznacheniya. Mezhdvuzovskiy sbornik trudov molodykh uchennykh i spetsialistov*. Novocherkassk, 2014, Pp. 19-22. (in Rus.)
3. SP. 100.13330.2011. Meliorativniye sistemy i sooruzheniya [Construction regulations. 100.13330.2011. Reclamation systems and facilities]. Moscow, Rosstandart, 2015, 146 p. (in Rus.)
4. Shcherbakov V.S., Sukharev R.Y. Sovershenstvovaniye sistemy upravleniya rabochim organom tsepnogo transheynogo ekskavatora [Improving the operation of a working body of a chain trencher. Omsk, SibADI, 2011, 152 p. (in Rus.)
5. Meshcheryakov V.A. Adaptivnoye upravleniye rabochimi protsessami zemleroino-transportnykh mashin [Adaptive control of working units of earthmovers]. DSc (Eng) thesis. Omsk, SibADI, 2007, 304 p. (in Rus.)
6. 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 controlling the depth of digging in single-bucket shovels]. *Vestnik SibADI*, 2014, No. 3 (37). Pp. 34-39. (in Rus.)
7. Balovnev V.I., Zelenin A.N., Kerov I.P. Mashiny dlya zemlianykh rabot [Earth moving machines]. Moscow, Mashinostroeniye, 1975, 422 p. (in Rus.)
8. Timofeyev G.A. Teoriya mekhanizmov i mashin. Uchebnik i praktikum dlya SPO [Theory of mechanisms and machines. Tutorial and Workshop for secondary professional educational establishments]. 3rd ed., reviewed and extended. Moscow, Urait, 2016, 429 p. (in Rus.)
9. Terent'eva A.D. Analiz tochnosti peremeshcheniya rabocheho organa odnokovshovogo ekskavatora [Analyzing the motion precision of working units of a single-bucket shovel excavator. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2016, No. 4(32), Vol. 14. Pp. 218-228. (in Rus.)
10. Pavlov V.P. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya rabocheho oborudovaniya odnokovshovykh ekskavatorov [Methodology of computer-aided designing the parameters of working equipment of shovel excavators. DSc (Eng) thesis. Krasnoyarsk, 2011, 349 p. (in Rus.)
11. Shcherbakov I.S. Sistema avtomatizatsii modelirovaniya odnokovshovogo ekskavatora s gidroprivodom [The system of automated simulation of a shovel excavator with a hydraulic drive]. PhD (Eng) thesis. Omsk, SibADI, 2006, 179 p. (in Rus.)
12. Podchasov Ye.O., Terent'eva A.D. Analiz vozmozhnosti primeneniya odnokovshovogo ekskavatora pri prokladke kommunikatsiy [Analyzing opportunities of using a shovel excavator for pipeline laying]. *International Scientific Conference "Fundamental and applied problems of mechanics"*. Moscow, October, 24-27, 2017. BMSTU Publishing House. Pp. 141-142. (in Rus.)
13. Podchasov Yo.O., Terent'eva A.D. Analiz tochnosti rabot, proizvodimykh rabochim mekhanizmom odnokovshovogo ekskavatora [Precision analysis of earthworks carried out by a working unit of a shovel excavator]. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, No. 8 (68). (in Rus.)
14. Nazemtsev A.S. Pnevmaticheskie i gidravlicheskie privodi i sistemi. Osnovi. Uchebnoe posobie [Pneumatic and hydraulic drives and systems. Part 2: Hydraulic actuators and systems. Fundamentals. Tutorial]. Moscow, FORUM, 2007, 304 p. (in Rus.)
15. Plutalov V.N. Metrologiya i tekhnicheskoye regulirovaniye [Metrology and Technical Regulations]. Moscow, BMSTU Publishing House, 2011, 416 p. (in Rus.)
16. Timofeyev G.A., Barbashov N.N., Terent'yeva A.D. Statisticheskiye metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Statistical methods of controlling technological processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, 2016, No. 12 (681). Pp. 58-65.

The paper was received on November 2, 2017