

## Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора

© Е.О. Подчасов, А.Д. Терентьева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В гражданском строительстве при прокладке траншей для городских коммуникаций в условиях точечной застройки существует необходимость применять высокоточные строительные машины, оборудованные системами управления. Наиболее перспективны машины, построенные на базе адаптивных методов, так как они позволяют синтезировать контрольный алгоритм управления в процессе работы. Необходимость применения подобных систем обусловлена высокими требованиями к производству земляных работ, установленными строительными нормами и правилами. Существенная доля работ по прокладке коммуникаций выполняется с применением одноковшовых экскаваторов с гидроприводом. Для получения практических рекомендаций по повышению точности и применения систем управления разработана математическая модель рабочего механизма одноковшового экскаватора, позволяющая оценить точность земляных работ, определить возможные источники геометрических погрешностей и составить рабочую область и зону обслуживания, а также проанализировать кинематические и технологические погрешности и выявить источники их появления. Предложены два способа уменьшения погрешности до допустимых пределов как с использованием системы управления, так и без применения таковой на существующем оборудовании.*

**Ключевые слова:** одноковшовый экскаватор, математическая модель, система управления, зона обслуживания, точность

**Введение.** При гражданском строительстве в городских условиях на территории России необходимо рыть траншеи для прокладки телефонных и электрических сетей, водопровода и канализации. При точечной застройке работы проводятся в стесненных условиях, поэтому следует использовать высокоточные экскаваторы с гидроприводом, способные выполнять до 38 % земляных работ. Таким образом, совершенствование одноковшовых экскаваторов с целью улучшения их технических характеристик и повышения точности выполнения работ имеет важное значение для машиностроительных предприятий, разрабатывающих такие средства механизации [1–4].

**Анализ проблем, влияющих на точность копания одноковшовыми экскаваторами.** Строительные нормы и правила, принятые в России, устанавливают высокие требования к точности производства земляных работ. Недоборы грунта в основании земляных сооружений, разрабатываемых экскаваторами, допускаются не более 0,05 м [5–8]. Такое высокое требование зачастую невозможно обеспечить имеющимся оборудованием.

Такая составная часть современного экскаватора, как система управления, особенно важна для проведения землеройных работ в городских условиях, поскольку позволяет оперативно оценивать с помощью вычислительной техники функционирование и самой машины, и составляющих ее подсистем и компонентов [4, 9–10], а также точнее определять положение экскаватора и прокладываемой траншеи, повышать точность процесса копания грунта. При выборе метода управления рабочим органом машины для земляных работ следует исходить из ее динамических свойств и статистических характеристик случайных возмущений, действующих на нее. Основное направление автоматизации одноковшового экскаватора — это управление рабочим органом в целях обеспечения высокого качества работ, т. е. тех требований, которые предъявляются к геометрической точности рытья траншеи.

Точная оценка положения одноковшового экскаватора и прокладываемой траншеи необходима в связи с наличием большого количества уже имеющихся коммуникаций вблизи впервые прокладываемых. При неправильной (неточной) прокладке новых легко повредить ранее сделанные, что нанесет недопустимый ущерб городскому хозяйству. Цель настоящей работы — проанализировать точность проведения землеройных работ одноковшовыми экскаваторами.

**Кинематическая модель рабочего механизма экскаватора.** Моделирование систем управления рабочим механизмом для повышения точности копания грунта невозможно без построения математической модели как самого процесса, так и рабочего механизма.

На точность копания грунта рабочим механизмом оказывают влияние не только точность управления, зависящая от оператора, работающего в ручном режиме, или от системы автоматизированного управления, включая запаздывание любого из этих вариантов управления, но и характеристики грунта, неровности поверхности, точность компонентов рабочего механизма: стрелы, рукояти, гидроцилиндров, а также погрешности, допускаемые при их изготовлении.

Для моделирования систем управления рабочим механизмом предварительно следует выбрать модель экскаватора, чтобы предлагать гарантированные методы повышения точности копания грунта уже для нее. Их можно применять и для других экскаваторов выбранного типа, однако моделирование с выводами и рекомендациями для принятия конкретных решений без привязки к конкретной модели невозможно.

Для расчетов был выбран отечественный гусеничный экскаватор ЧЕТРА ЭГП-230 с оборудованием «обратная лопата» (рис. 1), выпускаемый АО «ЧЕТРА–Промышленные машины» (г. Чебоксары).



Рис. 1. Гусеничный экскаватор ЧЕТРА ЭГП-230

Плоская модель рабочего механизма одноковшового экскаватора, построенная на основе структурно-кинематических связей, позволяет исследовать характерные конструктивные особенности рабочего механизма с числом подвижностей  $W = 3$  [11, 12] (рис. 2).

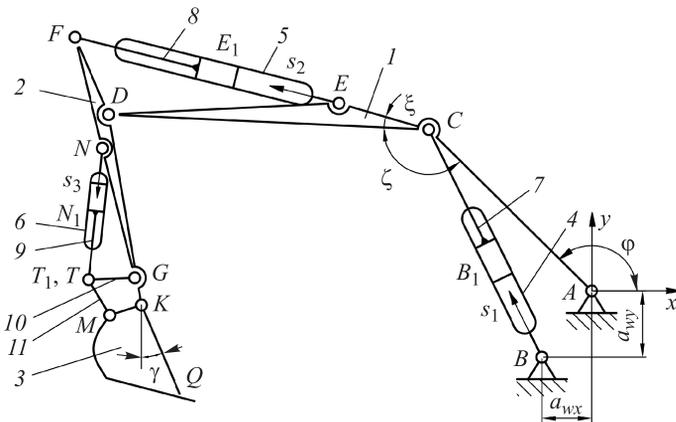


Рис. 2. Кинематическая схема рабочего механизма:  
 1 — стрела; 2 — рукоять; 3 — ковш; 4, 5, 6 — гидроцилиндры;  
 7, 8, 9 — штоки гидроцилиндров; 10 — коромысло; 11 — тяга

Для плоской модели рабочего механизма экскаватора обобщенными координатами входного воздействия являются  $s_1, s_2, s_3$ , а обобщенными координатами выходного —  $x, y, \gamma$ .

Кинематику разомкнутой цепи рабочего механизма экскаватора следует описывать по методу проекций векторных контуров. В непо-

движной системе координат положение вращательных кинематических пар рабочего механизма характеризуется координатами центров пар, поступательных — координатами какой-либо точки, лежащей на направляющей поступательной пары, и углом между вектором положительного направления поступательной пары и осью  $x$ .

Геометрический анализ всех участков кинематической цепи рабочего механизма экскаватора выполняется с учетом изменения обобщенных координат  $s_1, s_2, s_3$  с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB [13, 14] (в рамках решения указанной задачи не приводится). Изменение положения всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма экскаватора задается функциями положения.

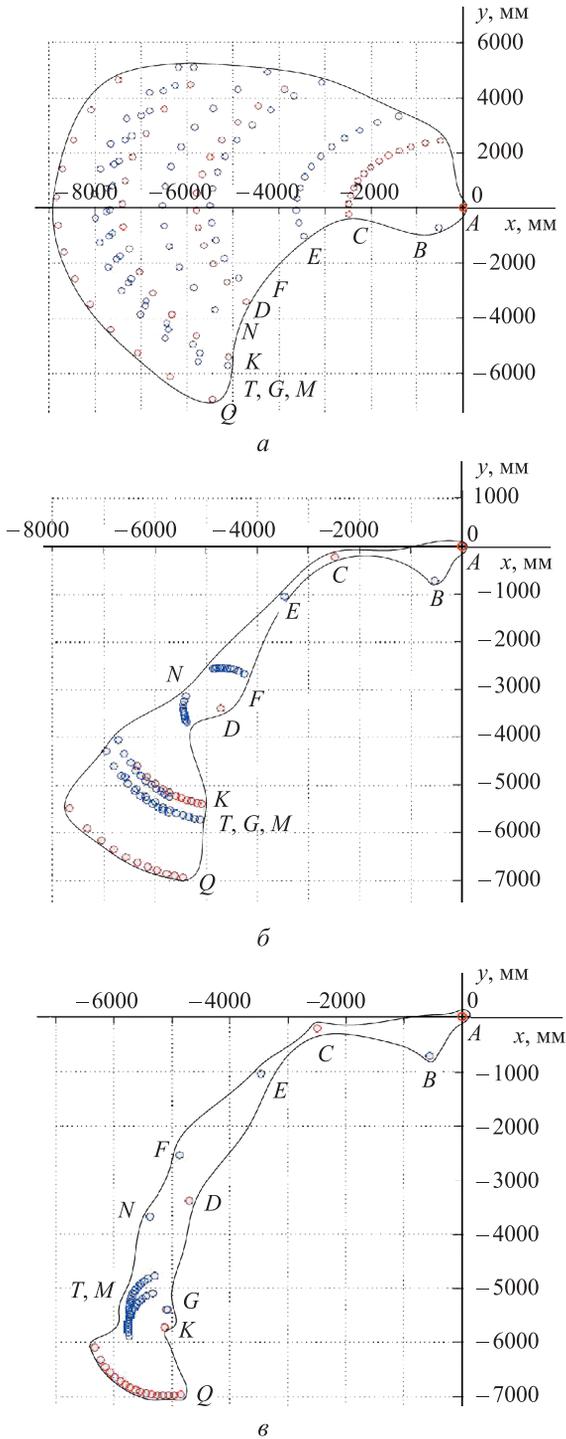
**Рабочая область и зоны обслуживания экскаватора.** Математическая модель позволяет исследовать характеристики кинематической цепи рабочего механизма одноковшового экскаватора, оценить влияние каждого из звеньев цепи на рабочую область и зону обслуживания, а также точность положения режущей кромки ковша 3 (см. рис. 2) в зависимости от входных обобщенных координат. Для исследования точности положения ковша 3 в любой точке рабочей области необходимо вначале построить рабочую область.

Задавая перемещения по входным обобщенным координатам  $s_1, s_2, s_3$ , можно определить рабочую область и зону обслуживания рабочего механизма. Построение рабочей области целесообразно провести отдельно от каждой из выходных обобщенных координат для дальнейшего исследования их влияния на положение режущей кромки ковша (рис. 3).

Для того чтобы выяснить влияние входных обобщенных координат на положение режущей кромки ковша 3 (см. рис. 2), рабочие области от каждой из входных обобщенных координат последовательно расширялись путем введения возможного перемещения от последующей, начиная от  $s_1$  в направлении к  $s_3$  (рис. 4).

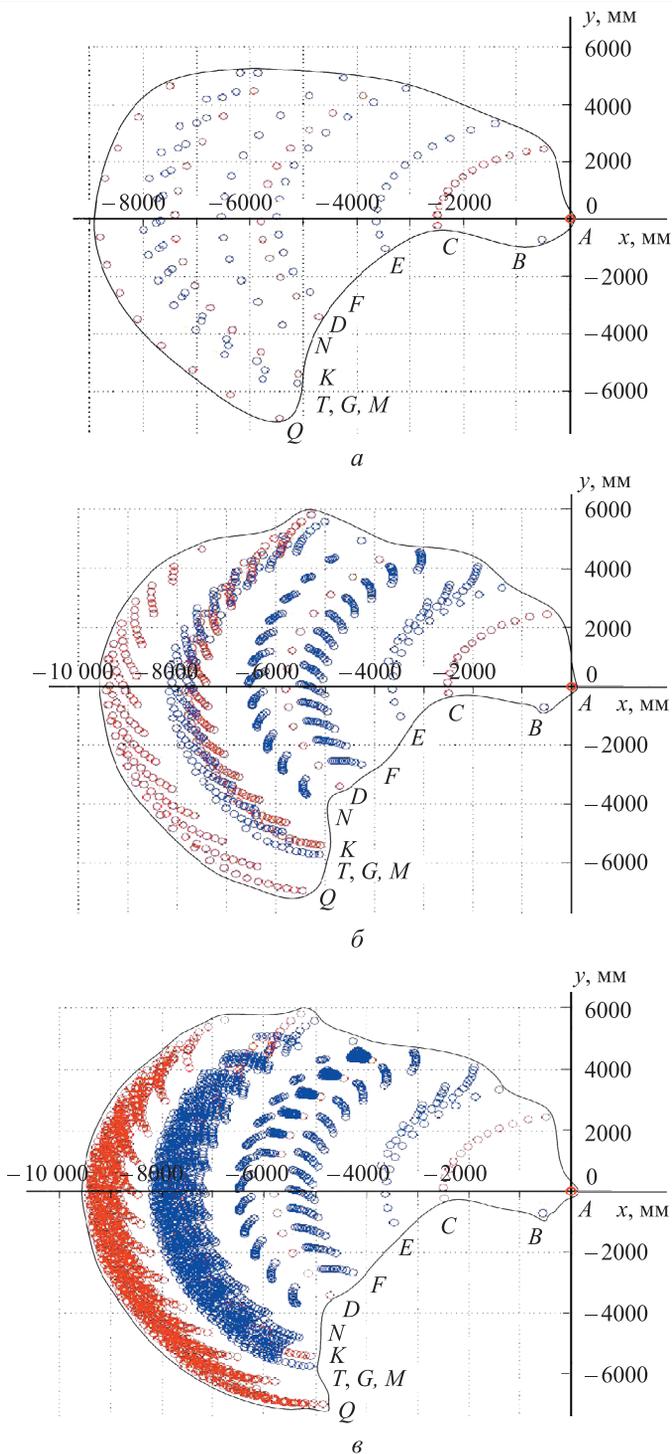
Совокупная рабочая область представляет собой множество положений участка кинематической цепи гидроцилиндра 4 (обобщенная координата  $s_1$ ), на каждое из которых наложено множество положений участка кинематической цепи гидроцилиндра 5, а на любое из них, в свою очередь, — множество положений участка кинематической цепи гидроцилиндра 6 (см. рис. 2).

Зона обслуживания рабочего механизма исследуемого одноковшового экскаватора (рис. 5) получается аналогично его рабочей области. В силу указанной причины зона обслуживания рабочего механизма выводится при одновременном изменении всех трех входных обобщенных координат  $s_1, s_2, s_3$  без разбиения по координатам.



**Рис. 3.** Зависимость рабочей области рабочего механизма экскаватора от изменения входных обобщенных координат:

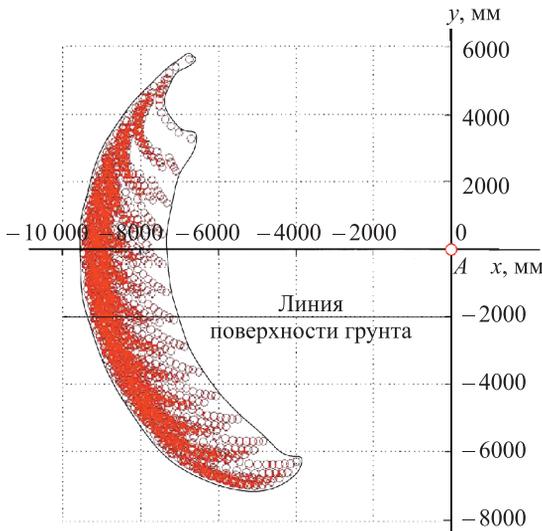
а —  $s_1 = var, s_2 = 0, s_3 = 0$ ; б —  $s_1 = 0, s_2 = var, s_3 = 0$ ;  
 в —  $s_1 = 0, s_2 = 0, s_3 = var$



**Рис. 4.** Зависимость рабочей области рабочего механизма экскаватора от последовательного изменения входных обобщенных координат:

*а* —  $s_1 = \text{var}, s_2 = 0, s_3 = 0$ ; *б* —  $s_1 = \text{var}, s_2 = \text{var}, s_3 = 0$ ;

*в* —  $s_1 = \text{var}, s_2 = \text{var}, s_3 = \text{var}$



**Рис. 5.** Зависимость зоны обслуживания рабочего механизма экскаватора от изменения входных обобщенных координат  $s_1, s_2, s_3$

Совокупная зона обслуживания, подобно рабочей области, представляет собой множество положений точки  $Q$  режущей кромки ковша 3 (см. рис. 2) при последовательном изменении положения участка кинематической цепи: гидроцилиндра 4 (обобщенная координата  $s_1$ ), гидроцилиндра 5 и гидроцилиндра 6.

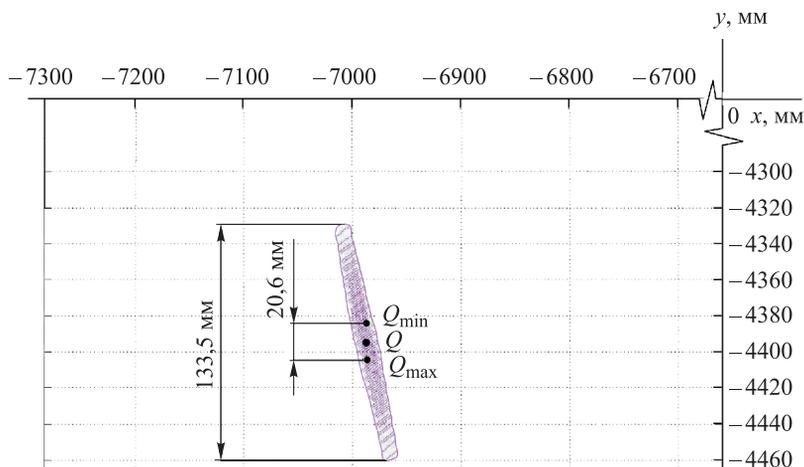
**Оценка геометрических погрешностей перемещения рабочего механизма экскаватора.** Все звенья кинематической цепи, включая гидроцилиндры, имеют допуск на изготовление, однако возможны погрешности при сборке рабочего механизма. Также каждый конкретный гидроцилиндр имеет линейную погрешность перемещения в зависимости от длины штока [15]. В связи с погрешностью изготовления стрелы, рукоятки, ковша, гидроцилиндров, сборки рабочего механизма и гидроцилиндра с поворотной платформой, а также с другими проблемами, связанными с точностью управления, точность копания может существенно отличаться от регламентируемых СНиП.

Для кинематической цепи рабочего механизма экскаватора проводится параметрический анализ с составлением размерной цепи. А в случае его рабочего механизма невозможно применение стандартной методики расчета размерных цепей [16], поскольку кинематическая цепь является разомкнутой, т. е. нет замыкающего звена. Эту проблему можно разрешить, заменив геометрический расчет размерной цепи повторным расчетом кинематической цепи с учетом возможных погрешностей изготовления и хода элементов рабочего механизма экскаватора для определения местоположения режущей кромки ковша. При этом сравниваются идеализированные геометри-

ческие расчеты (размеры приняты номинальными, погрешности отсутствуют) и кинематическая цепь с максимально возможными линейными погрешностями перемещения.

Геометрический расчет размерной цепи рабочего механизма экскаватора с учетом погрешностей изготовления элементов рабочего механизма проводится, как и в предыдущем случае, путем имитационного моделирования в среде MATLAB. Изменение положения звеньев задается функциями положения. Оценка погрешностей перемещения рабочего механизма выполняется по схеме расчета кинематической цепи (см. рис. 2) от входного звена (стрела 1) к выходному звену (ковш 3).

На основании результатов проведенных расчетов построена область возможных положений режущей кромки ковша 3 (точки  $Q$ ) в момент врезания в грунт на дне траншеи глубиной 2,4 м с учетом погрешностей изготовления звеньев цепи (рис. 6).



**Рис. 6.** Область возможных положений режущей кромки ковша при  $s_1 = 0$  мм;  $s_2 = 300$  мм;  $s_3 = 200$  мм

В построенной области возможных положений указана точка  $Q$  — положение режущей кромки ковша 3 экскаватора в момент врезания в грунт на дне траншеи при идеальном выполнении всех звеньев кинематической цепи без погрешностей. Также в построенной области отмечены точки  $Q_{\max}$  и  $Q_{\min}$  — положения режущей кромки ковша при анализе точности возможных отклонений методом максимума-минимума, где точка  $Q_{\max}$  получена при предельном максимальном отклонении всех звеньев кинематической цепи рабочего механизма, а точка  $Q_{\min}$  — при предельном минимальном отклонении.

В случае анализа точности методом максимума-минимума область возможных положений составляет 4,7 мм вдоль оси абсцисс

и 20,6 мм вдоль оси ординат при регламентируемой СНИП, равной 0,05 м. Дополнительно в область возможных положений точки  $Q$  режущей кромки ковша  $З$  введен расчет возможных положений точки  $Q$  (при изготовлении всех звеньев кинематической цепи без погрешностей, появление которых в процессе работы готового экскаватора невозможно), но с учетом геометрических погрешностей при перемещении штока гидроцилиндра. В этом случае область возможных положений существенно расширится и составит 57,1 мм вдоль оси абсцисс и 133,5 мм вдоль оси ординат, что в несколько раз превышает регламентируемое СНИП значение 0,05 м.

В случае тригонометрически нелинейной разомкнутой кинематической цепи классический метод максимума-минимума не дал бы оценки такого сочетания погрешностей изготовления звеньев цепи, при котором погрешность выходного звена ковша  $З$  рабочего механизма была бы максимальной, что важно для оценки требований точности выполнения элементов рабочего механизма. Данная погрешность, являющаяся систематической, определяется для каждого конкретного экскаватора в ходе приемосдаточных испытаний. Она подлежит обязательной корректировке системой управления рабочим механизмом экскаватора, однако следует представлять ее возможные значения.

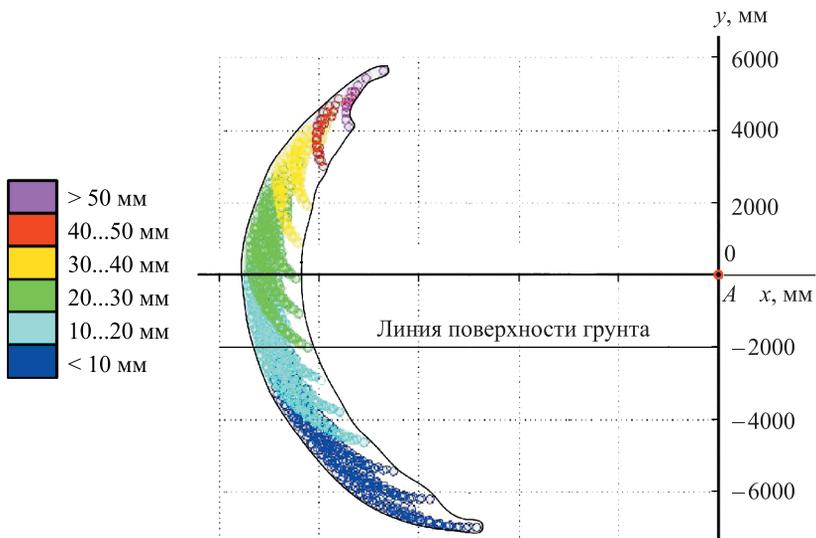


Рис. 7. Распределение возможных погрешностей положения точки  $Q$  в зоне обслуживания

**Оценка погрешностей перемещения рабочего механизма экскаватора с учетом погрешностей перемещения штоков гидроцилиндров.** Штоки гидроцилиндров имеют допуски на величину хода штока в зависимости от основных размеров. С учетом погрешностей

их хода для идеализированных звеньев без учета погрешностей их изготовления можно получить распределение возможных погрешностей в зоне обслуживания в зависимости от положения точки  $Q$  режущей кромки ковша  $З$  рабочего механизма экскаватора (рис. 7).

Изменение положения штоков гидроцилиндров, влияющее на положение режущей кромки ковша  $З$  экскаватора в зоне обслуживания, оказывает существенное воздействие на погрешность положения точки  $Q$  режущей кромки ковша  $З$  рабочего механизма экскаватора и может значительно колебаться (см. рис. 7). Для наглядности определения этого влияния на рис. 7 также показана линия поверхности грунта для конкретно выбранного экскаватора с учетом высоты гусеничной базы.

**Заключение.** По результатам математического моделирования рабочего механизма экскаватора получена область, в которой может находиться режущая поверхность его ковша в диапазоне погрешностей изготовления всех его звеньев. Исследована область нахождения режущей кромки ковша в диапазоне погрешностей ходов штоков гидроцилиндров от максимальных до минимальных без учета запаздывания. Проведенные исследования показали, что в случае тригонометрически нелинейной разомкнутой кинематической цепи классический метод максимума-минимума не дал бы оценки такого сочетания погрешностей при работе гидроцилиндров, при котором погрешность выходного звена рабочего органа была бы максимальна, 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, равное 0,05 м.

Один из методов уменьшения погрешности состоит в том, чтобы организовать работу экскаватора исключительно в части зоны обслуживания с менее допустимой погрешностью и построить управляющий алгоритм, обеспечивающий там же работу его выходного звена. Если же существует необходимость выхода из такой части этой зоны, то необходимо ввести адаптивное управление [17], которое позволит существенно сократить разброс получаемой погрешности перемещения выходного звена экскаватора.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баловнев В.И., Зеленин А.Н., Керов И.П. *Машины для земляных работ*. Москва, Машиностроение, 1975, 422 с.
- [2] Павлов В.П. *Методология автоматизированного проектирования рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов*. Дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2011, 349 с.

- [3] Побегайло П.А. Решение прямой позиционной задачи для одноковшовых гидравлических экскаваторов. *ГИАБ*, 2014, № 12, с. 193–197.  
URL: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2014/12/28\\_193-197\\_Pobegaylo.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2014/12/28_193-197_Pobegaylo.pdf)
- [4] Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю. *Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора*. Омск, СибАДИ, 2011, 152 с. URL: <http://bek.sibadi.org/fulltext/epd303.pdf>
- [5] *СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения*. Москва, Стройиздат, 1985, 136 с.
- [6] *СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения*. Москва, ЦИТП, 1986, 72 с.
- [7] *СНиП 2.05.13-90. Нефтепродуктопроводы, прокладываемые на территории городов и других населенных пунктов*. Москва, Стройиздат, 1988, 7 с.
- [8] *СНиП 3.05.04-85. Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации*. Москва, ЦИТП, 1990, 48 с.
- [9] Мещеряков В.А. *Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин*. Дис. ... д-ра техн. наук. Омск, СибАДИ, 2007, 304 с.
- [10] Шеховцова Д.А. Методика определения погрешности информационно-измерительных устройств для системы управления глубиной копания одноковшовым экскаватором. *Вестник СибАДИ*, 2014, № 3 (37), с. 34–39.  
URL: <http://vestnik.sibadi.org/wp-content/uploads/2016/10/release-337.pdf>
- [11] Тимофеев Г.А. *Теория механизмов и машин*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Юрайт, 2016, 429 с.  
URL: [http://www.urait.ru/uploads/pdf\\_review/978-5-9916-5364-0.pdf](http://www.urait.ru/uploads/pdf_review/978-5-9916-5364-0.pdf)
- [12] Терентьева А.Д. Анализ точности перемещения рабочего орагана одноковшового экскаватора. *Теория механизмов и машин*, 2016, № 4 (32), с. 218–228. URL: [http://tmm.spbstu.ru/32/Terentyeva\\_32.pdf](http://tmm.spbstu.ru/32/Terentyeva_32.pdf)
- [13] Щербаков И.С. *Система автоматизации моделирования одноковшового экскаватора с гидроприводом*. Дис. ... канд. техн. наук. Омск, СибАДИ, 2006, 179 с.
- [14] Побегайло П.А. Исследование пропорций рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов. *ГИАБ*, 2016, № 5, с. 107–114.  
URL: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/5/107\\_114\\_5\\_2016.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/5/107_114_5_2016.pdf)
- [15] Наземцев А.С. *Пневматические и гидравлические приводы и системы. Часть 2. Гидравлические приводы и системы. Основы*. Москва, ФОРУМ, 2007, 304 с.
- [16] Плуталов В.Н. *Метрология и техническое регулирование*. Москва, Изд-во МГТУ, 2011, 416 с.
- [17] Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д., Тимофеев Г.А. Статистические методы управления технологическими процессами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 12, с. 58–65.

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Подчасов Е.О., Терентьева А.Д. Анализ точности работ, производимых рабочим механизмом одноковшового экскаватора. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1654>

**Подчасов Евгений Олегович** — ассистент кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 8 научных работ в области проектирования приводов и компонентов машин. e-mail: [podchacha@yahoo.com](mailto:podchacha@yahoo.com)

**Терентьева Арина Дмитриевна** — ассистент кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области адаптивного управления для повышения точности. e-mail: terentyevaad@gmail.com

## Accuracy analysis of earthworks performed by shovel working mechanism

© E.O. Podchasov, A.D. Terenteva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*In civil engineering, when laying trenches for urban communications in infill construction, there is a need to use high-precision construction machines equipped with control systems. The most promising are the machines built on adaptive methods, since they make it possible to synthesize the control algorithm in the work process. The need for such systems is due to the high requirements to performing excavation works, established by construction norms and rules. A significant proportion of the work on constructing the communications is carried out using a shovel excavator with a hydraulic drive. To obtain practical recommendations for improving the accuracy and application of control systems, a mathematical model of the operating mechanism of a shovel excavator has been developed. This model allows us to estimate the accuracy of excavation, analyze possible sources of geometric errors and make up a working area and service area. The developed model makes it possible to analyze the kinematic and technological errors and the sources of their appearance. We propose two ways to reduce the errors to acceptable limits, either using the control system or without using it on existing equipment.*

**Keywords:** shovel excavator, mathematical model, automatic control system, service zone, precision

### REFERENCES

- [1] Balovnev V.I., Zelenin A.N., Kerov I.P. *Mashiny dlya zemlyanykh работ* [Machines for excavation works]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 422 p.
- [2] Pavlov V.P. *Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya rabochego oborudovaniya odnokovshovykh ekskavatorov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of automated design of working equipment for shovel excavators. Dr. eng. sc. diss.]. Krasnoyarsk, 2011, 349 p.
- [3] Pobegaylo P.A. *Gorny Informatsionno-analiticheskiy Byulleten — Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2014, no. 12, pp. 193–197. Available at: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2014/12/28\\_193-197\\_Pobegaylo.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2014/12/28_193-197_Pobegaylo.pdf)
- [4] Scherbakov V.S., Sukharev R.Y. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya rabochim organom tsepnogo transheynogo ekskavatora* [Perfection of the control system of the working body of the chain trench excavator]. Omsk, SibADI Publ., 2011, 152 p. Available at: <http://bek.sibadi.org/fulltext/epd303.pdf>
- [5] *SNIP* [Building regulations] 2.04.02–84. *Vodosnabzhenie. Naruzhnie seti i sooruzheniya* [Water supply. External networks and facilities]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, 136 p.
- [6] *SNIP* [Building regulations] 2.04.03–85. *Kanalizatsiya. Naruzhnie seti i sooruzheniya* [Sewerage. External networks and facilities]. Moscow, CITP Publ., 1986, 72 p.
- [7] *SNIP* [Building regulations] 2.05.13–90. *Nefteproduktoprovody, prokladyvaemie na territorii gorodov i drugikh naseennykh punktov* [Oil-

- products pipelines laid on the territory of cities and other settlements]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 7 p.
- [8] *SNIP* [Building regulations] 3.05.04–85. Naruzhnie seti i sooruzheniya vodosnabzheniya i kanalizatsii [External networks and facilities of water supply and sanitation]. Moscow, CИTP Publ., 1990, 48 p.
- [9] Mescheryakov V.A. *Adaptivnoe upravlenie rabochimi protsessami zemleroyno-transportnykh mashin*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Adaptive management of earth-moving machinery. Dr. eng. sc. diss.]. Omsk, SibADI Publ., 2007, 304 p.
- [10] Shekhovtseva D.A. *Vestnik SibADI — Siberian State Automobile and Highway University Bulletin*, 2014, no. 3 (37), pp. 34–39. Available at: <http://vestnik.sibadi.org/wp-content/uploads/2016/10/release-337.pdf>
- [11] Timofeev G.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. 3th. ed., rev. and enlarg. Moscow, Yurayt Publ., 2016, 429 p. Available at: [http://www.urait.ru/uploads/pdf\\_review/978-5-9916-5364-0.pdf](http://www.urait.ru/uploads/pdf_review/978-5-9916-5364-0.pdf)
- [12] Terenteva A.D. *Teoriya mekhanizmov i mashin — Theory of mechanisms and machines*, 2016, no. 4, pp. 218–228. Available at: [http://tmm.spbstu.ru/32/Terentyeva\\_32.pdf](http://tmm.spbstu.ru/32/Terentyeva_32.pdf)
- [13] Scherbakov I.S. *Sistema avtomatizatsii modelirovaniya odnokovshovogo ekskavatora s gidroprivodom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Automated modeling system for shovel excavator with hydraulic drive. Cand. eng. sc. diss.]. Omsk, SibADI Publ., 2006, 179 p.
- [14] Pobegaylo P.A. *Gornyye Informatsionno-analiticheskiy Byulleten — Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2016, no. 5, pp. 107–114. Available at: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/5/107\\_114\\_5\\_2016.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2016/5/107_114_5_2016.pdf)
- [15] Nazemtsev A.S. *Pnevmaticheskie i gidravlicheskie privody i sistemy. Chast 2. Gidravlicheskie privody i sistemy. Osnovy* [Pneumatic and hydraulic actuators and systems. Part 2: Hydraulic actuators and systems. Fundamentals]. Tutorial. Moscow, FORUM Publ., 2007, 304 p.
- [16] Plutalov V.N. *Metrologiya i tehnikeskoe regulirovanie* [Metrology and technical regulations]. Moscow, BMSTU Publ., 2011, 416 p.
- [17] Barbashov N.N., Terenteva A.D., Timofeev G.A. *Izvestiya vuzov. Ser. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 12, pp. 58–65.

**Podchasov E.O.**, Assistant Lecturer, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University. Author of 8 publications in the field of drives and machine components designing. e-mail: podchacha@yahoo.com

**Terenteva A.D.**, Assistant Lecturer, Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications.