УДК 621.828:62-5

СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУЛЬДОЗЕРА

Игорь Вадимович Лесковец, канд. тех. наук
Белорусско-Российский университет
Республика Беларусь, 212000, Могилев, пр-т Мира, 43
E-mail: leskovets1966@mail.ru

Алексей Андреевич Грачев, канд. тех. наук
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б
E-mail: grachev_aa@spbstu.ru

Аннотация. Целью данного исследования является определение положений отвала бульдозера в процессе копания грунта, при которых силы сопротивления копанию являются минимальными, а также установление возможности изменения положения отвала в процессе копания для минимизации сил сопротивления копанию. Результаты научных исследований, выполненных ранее другими авторами, а также исследования авторов статьи показывают, что силы сопротивления копанию бульдозерным оборудованием существенно зависят от параметров грунта и рабочего оборудования, которые оказывают комплексное влияние на величины суммарных сил сопротивления передвижению бульдозера. Исследования, проведенные авторами, показывают, что силы сопротивления копанию значительно зависят от угла установки отвала, причем во время зарезания грунта и набора призмы волочения эти силы имеют меньшие значения при больших углах установки отвала, а при транспортировании полной призмы волочения силы сопротивления копанию имеют меньшие значения при больших углах установки отвала. Угол установки отвала может изменяться в установленном диапазоне. Результаты, полученные авторами, при определении сил сопротивления копанию с помощью специализированного программного обеспечения позволили установить, что изменение угла установки отвала во время транспортирования призмы волочения может снизить силы сопротивления копанию и повысить топливную экономичность бульдозера. Предполагается, что использование цифрового двойника бульдозера позволит устанавливать характеристики процесса копания без измерения параметров грунта в течение рабочего времени на рабочей площадке.

Ключевые слова: бульдозер; рабочее оборудование; копание грунта; цифровой двойник.

Развитие информационных технологий и оборудования позволяющего увеличить скорость вычислительных операций приводят к появлению и широкому распространению цифровых двойников в различных отраслях промышленности [1].

С помощью применения математического моделирования и алгоритмов, позволяющих вычислить параметры и характеристики процессов, происходящих во время работы различного оборудования, цифровые двойники позволяют оценить состояние систем, которое невозможно измерить традиционными средствами измерения во время рабочих процессов. Анализ состояния различных механизмов и машин, который выполняется на основе численной информации, предоставляемой цифровым двойником, позволяет установить зависимости, возникающее между взаимодействующими частями и элементами во время выполнения машиной рабочих операций [2].

Современный гусеничный бульдозер – это энергетически насыщенная машина, предназначенная для выполнения земляных работ в различных внешних условиях. Как правило, гусеничный бульдозер настоящего времени обладает системами управления рабочим оборудованием, которые значительно облегчают труд оператора, по сравнению с ранее используемыми системами механического управления. Наиболее широкое распространение в гусеничных бульдозерах получили гидравлические системы управления рабочим оборудованием. Различные компании, выпускающие промышленные гусеничные бульдозеры используют для управления силовым гидроприводом рабочего оборудования гидравлические или электрогидравлические системы дистанционного управления [3]. Гидравлическое управление отвалом обеспечивает до четырех степеней свободы относительно системы координат, расположенной в центре масс машины. Таким образом, во время копания грунта, имеется техническая возможность найти положение отвала, которое обеспечивает максимальную производительность при минимальном расходе топлива.

Проблемам повышения производительности и снижения сил сопротивления копанию уделялось ранее [4 – 6] и уделяется сейчас значительное количество научных исследований. Например, авторами [7] проанализированы различные конструкции рабочего оборудования и выявлены наиболее эффективные из них при работе в различных условиях. Автором [8] используется методика статистического анализа для выбора наиболее оптимальных параметров бульдозера с целью достижения максимальной эффективности машины. Авторами [9] используются методы математического моделирования, основанные на регрессионном анализе для определения наиболее эффективных параметров бульдозера. Авторами

[10] проанализированы различные конструкции отвалов бульдозеров и на основании выбранных критериев установлены наиболее эффективные.

Целью данного исследования является определение положений отвала бульдозера в процессе копания грунта, при которых силы сопротивления копанию являются минимальными, а также установление возможности изменения положения отвала в процессе копания для минимизации сил сопротивления копанию.

Теоретические исследования показывают, что силы сопротивления копанию рабочим оборудованием гусеничного бульдозера зависят от текущего состояния грунта и параметров рабочего оборудования [4, 11 – 13]. Результаты этих исследований применяются при проектировании рабочего оборудования и позволяют за счет выбора параметров профиля отвала минимизировать силы сопротивления копанию и повысить топливную экономичность машины. В то же время, во время работы гусеничного бульдозера величины сил сопротивления копанию зависят от конкретного положения рабочего оборудования, в частности угла установки отвала, поэтому, его изменение во время процесса копания может увеличить эффективность работы [14]. Для изменения положения отвала необходимо определить критерии, позволяющие принять конкретное решение для определения положения, которое является наиболее эффективным в конкретный момент копания грунта.

В своей работе оператор бульдозера руководствуется информацией, получаемой через органы чувств, поэтому он не всегда в состоянии определить оптимальное положение отвала в каждый момент времени. Копание грунта отвалом бульдозера является сложным динамическим процессом, стадии которого быстро меняются и предусматривают опускание отвала, зарезание грунта, набор призмы волочения и транспортирование призмы волочения к месту отсыпки.

Цифровой двойник гусеничного бульдозера может оказать значительную помощь оператору для обеспечения оптимального положения отвала в процессе копания грунта.

Величины сил сопротивления копанию существенно зависят от стадии рабочего процесса и быстро меняются во времени. При отсутствии информации об их значениях и направлении в текущий момент времени, вероятность установки отвала в оптимальное рабочее положение в зависимости от стадии копания невелика. Таким образом, на основании имеющейся у оператора информации он не всегда в состоянии обеспечить

положение отвала, которое соответствует максимальной производительности и минимальному расходу топлива. Моделированию рабочего оборудования бульдозера уделяется внимание авторами научных работ для его автоматизации [15].

Авторами статьи разработан ряд теоретических положений, которые позволяют определить величины и направления сил, возникающих при разработке грунта в зависимости от стадий копания, и построить их динамическую характеристику [14]. Методики, разработанные авторами, основываются на использовании параметров рабочего оборудования и грунта которые могут быть недоступны для измерения на конкретной рабочей площадке или интенсивно меняться во времени, что не позволяет установить их конкретное значение в текущий момент времени. Это связано, в том числе и с возможным интенсивным изменением параметров окружающей среды.

Параметры рабочего оборудования, как правило, известны и незначительно изменяются в процессе эксплуатации машины либо периодически восстанавливаются до исходных значений. На основании имеющихся теоретических положений для каждых конкретных условий по результатам измеренных значений параметров, определяющих текущее состояние рабочего оборудования и характеристик, позволяющих установить нагрузки на рабочее оборудование, имеется возможность вычисления сил сопротивления копанию. Использование таких методик возможно при непосредственной работе бульдозера с использованием системы сбора данных.

Система сбора данных для вычисления характеристик рабочего процесса, определения наилучшего положения рабочего оборудования и управления рабочим оборудованием может позволить вычислить оптимальное положение рабочего оборудования в соответствии с заданными критериями.

При проведении вычислительных экспериментов приняты следующие исходные данные, представленные в таблице.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в процессе копания грунта, с целью минимизации сил сопротивления копанию и увеличения производительности рекомендуется изменять угол установки отвала по мере увеличения призмы волочения. Для реализации этой идеи необходимо обеспечить постоянное измерение угла установки отвала. Кроме того, на основании результатов измерений сил сопротивления

копанию необходимо обеспечить вычисление средних значений и амплитуды.

Исходные данные

Параметры отвала представленного на рис. 1	Параметры грунта
высота, *H,* мм 1000; ширина, *B,* мм 3000; радиус криволинейной части, *r*, мм 1000; длина прямолинейной части, *a,* мм 200; высота козырька, *Hk,* мм 100; угол резания, γ, град47; угол установки отвала, ε, град73 – угол захвата отвала, δ, град 73;	параметры грунта: категория – 1; угол внутреннего трения, град 28; угол трения грунта по металлу, град 26; угол наклона призмы волочения к горизонту, град 38; удельное сцепление грунта ненарушенной структуры, Па 2; удельное сцепление грунта в призме волочения, Па 0,5; удельное сопротивление резанию, Па 12; плотность грунта на рабочем органе, т/м^3 1,2; коэффициент жесткости, кПа/м 3000.

Наиболее оснащенные средствами цифрового измерения параметров современные промышленные бульдозеры обеспечивают контроль положения отвала рабочего оборудования в пространстве с помощью цифровых средств измерения. В качестве таких средств измерения может использоваться, например, оборудование, представленное организацией «TopCon» [16].

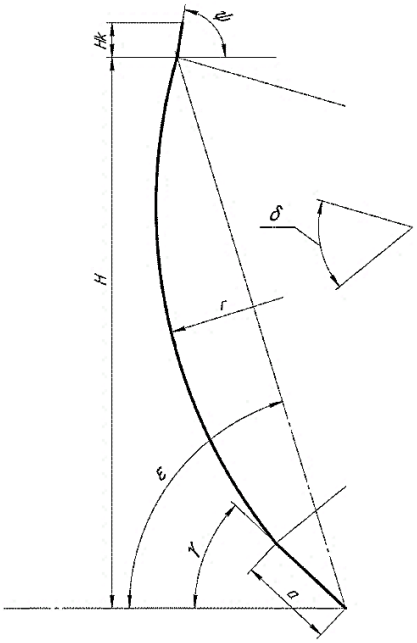

Рис. 1. Параметры профиля отвала [12, 13]

Измерение сил сопротивления копанию представляет собой сложную задачу, так как они изменяются во времени с большой амплитудой и частотой и могут принимать достаточно большие значения. К использованию в качестве средств измерений оборудования, которое основано на измерении деформаций, а также встраивание датчиков деформаций в рабочее оборудование представляются достаточно сложным, так как оборудование работает в тяжелых условиях при высокой загрязненности и влажности. Одним из возможных вариантов может стать использование датчиков, которые могут устанавливаться на опорах двигателя и трансмиссии. Во время копания грунта происходит увеличение сил сопротивления копанию, которое воспринимается двигателем и трансмиссией. В связи с тем, что, как правило, копание грунта происходит на известной передаче, измеряемая деформация опор, на которых установлены двигатель и трансмиссия, позволяет определить момент, который воспринимается рамой машины, и вычислить силы сопротивления копанию.

Еще одним параметром, который требуется измерить, является величина призмы волочения. Практически невозможно измерить величину призмы волочения, когда она находится в середине отвала. Однако имеется хорошая возможность определения момента набора полной призмы волочения путем установки датчика перемещения на козырьке отвала, который имеет возможность поворота вокруг оси установки под действием подпора грунта.

Полученные при проведении вычислительных экспериментов результаты, позволяют установить, что современный промышленный бульдозер, оснащенный средствами дистанционного гидравлического управления рабочим оборудованием, содержит ряд электронных устройств, позволяющих получить часть информации, которая характеризует текущее состояние рабочего оборудования. Наиболее просто путем измерений получить информацию, характеризующую геометрическое и взаимное расположение элементов рабочего оборудования. Определение параметров грунта, которые оказывают значительное влияние на величины сил сопротивления копанию в условиях постоянно изменяющихся параметров окружающей среды сильно затруднено. Косвенное определение значений этих параметров возможно на основании характеристик силовых параметров двигателя или трансмиссии. Анализ результатов расчетов показывает, что величины моментов на валах трансмиссии являются функциями сил сопротивления копанию, изменения моментов носят

колебательный характер. Колебания при постоянной толщине стружки имеют затухающий характер. Момент, когда амплитуда колебаний максимальна, соответствует моменту набора полной призмы волочения. Полученная информация позволяет установить, что на основании измерения характеристик бульдозера, которые изменяются с изменением толщины стружки и течением времени имеется возможность установления положения отвала, которое позволит минимизировать силы сопротивления копанию.

Кроме обоснования возможности снижения сил сопротивления копанию путем изменения угла установки отвала необходима разработка алгоритмов измерения сил сопротивления копанию, которые позволяют запоминать данные о величинах исследуемых сил во время зарезания грунта и во время копания с полной призмой волочения для нескольких проходов. Алгоритм должен позволять усреднять значения, которые имеют колебательный характер, а также анализировать их амплитуду с целью более точного установления величин во время нескольких проходов.

Предполагаемая система состоящая из аппаратных средств измерения модуля обработки информации, вычислительного модуля и системы управления рабочим оборудованием бульдозера может обеспечить создание цифрового двойника рабочего оборудования, задачей которого является определение теоретических характеристик процесса копания грунта, сравнения этих характеристик с получаемыми путем измерений и управление рабочим оборудованием бульдозера таким образом, чтобы минимизировать величины сил сопротивления копанию и затраты топлива при выполнении рабочего процесса.

Список использованных источников

1. *Зуйкова А.* Что такое цифровые двойники и где их используют // Режим доступа https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb (дата обращения 23.07.2024).
2. *Семенов А. Д.*, *Волков А. В., Ермилина О. В.* Математические модели систем управления : учебное пособие. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022, 200 с. - Текст: электронный. – URL: https://znanium.com/catalog/product/1903133 (дата обращения: 18.08.2022).
3. *Довгяло В. А., Бочкарев Д. И.* Дорожно-строительные машины. Часть I: Машины для земляных работ. – Гомель: БелГУТ, 2010, 250 с.
4. *Артемьев К. А.* Теория резания грунтов землеройными машинами: уч. пособие / К. А. Артемьев. – Новосибирск, 1978, 104 с.
5. *Баловнев В. И.* Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов. – М.: Росвузиздат, 1963, 95с.

6. *Домбровский Н. Г., Панкратов С. А.* Землеройные машины. – М.: Гостройиздат, 1961, 321 с.
7. *Демиденко А. И., Семкин Д. С., Сурженко Р. С.* Повышение производительности бульдозерной техники и уменьшение энергоемкости процесса копания за счет использования отвала ковшевого типа // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск, 2021, С. 8-13.
8. *Симонов Д. А.* Прогнозирование эффективности выполнения бульдозерами земляных работ. автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Научно-исследовательский институт транспортного строительства, Москва, 2005, 10 с.
9. *Чичик Е. А., Семенов Д. А.* Возможность применения регрессионных зависимостей для прогнозирования основных параметров перспективных моделей гусеничных бульдозеров // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – № 5-1 (44). – С. 107-109.
10. *Горбунова М. А.*, *Вахрушев С. И.* Усовершенствование отвалов бульдозера и сравнение их производительности // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2018. – Т. 2. – С. 475-483.
11. *Берестов Е. И., Лесковец И. В.* Влияние свойств грунта на усилия сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера // Вестник Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность и прикладные науки. Машиностроение и машиноведение. – 2010. – № 3. – С. 45 52.
12. *Берестов Е. И.*, *Лесковец И. В.* Методика расчета геометрических параметров призмы волочения на отвале бульдозера // Вестник Белорусско-Российского. университета. – 2009. – № 2. – С. 6-12.
13. *Берестов Е. И., Лесковец И. В.*, *Пеклин В. В.* Методы определения усилий сопротивления копанию рабочим оборудованием бульдозера // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2010. – № 4. – С. 58-63.
14. *Лесковец И. В.* Определение текущих показателей при работе гусеничного бульдозера // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы Международной научно-технической конференции. Редколлегия: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. Могилев, 2021, с. 189-190.
15. *Щербаков В. С.*, *Кулибаба В. А.* Система автоматизации моделирования рабочего процесса бульдозерного агрегата // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 1. – С. 92-95.
16. Компания Topcon система нивелирования 3D-MCMAX. электронный ресурс. дата доступа 31.05.2022. Режим доступа URL: https://topcon.pro/stroitelstvo/3DMCmax_System/ Компания Topcon (дата обращения 23.07.2024).

A WAY TO INCREASE THE EFFICIENCY OF A BULLDOZER

Ihar V. Leskavets, Ph.D.
Belarusian-Russian University
The Republic of Belarus, 212000, Mogilev, pr-t Mira, 43
E-mail: leskovets1966@mail.ru

Aleksey A. Grachev, Ph.D.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russian Federation, 195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29B
E-mail: grachev_aa@spbstu.ru

Abstract. The purpose of this study is to determine the positions of the bulldozer blade during the digging process, at which the forces of resistance to digging are minimal, as well as to establish the possibility of changing the position of the blade during the digging process to minimize the forces of resistance to digging. The results of scientific research carried out earlier by other authors, as well as the research of the authors of the article, show that the forces of resistance to digging with bulldozer equipment significantly depend on the parameters of the soil and working equipment, which have a complex effect on the values of the total forces of resistance to the movement of the bulldozer. The research conducted by the authors shows that the forces of resistance to digging significantly depend on the angle of installation of the blade, and during the cutting of the soil and the set of the drawing prism, these forces have lower values at large angles of installation of the blade, and when transporting a full drawing prism, the forces of resistance to digging have lower values at large angles of installation of the blade. The angle of installation of the blade can vary in the set range. The results obtained by the authors, when determining the forces of resistance to digging using specialized software, allowed us to establish that changing the angle of installation of the blade during transportation of the drawing prism can reduce the forces of resistance to digging and increase the fuel efficiency of the bulldozer. It is assumed that the use of a digital twin of the bulldozer will allow you to set the characteristics of the digging process without measuring soil parameters during working hours on the work site.

Keywords: bulldozer; working equipment; digging; digital double.