

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГУСЕНИЧНЫХ БУЛЬДОЗЕРОВ**

*Лесковец И.В*  
*Белорусско-Российский университет*

Гусеничный бульдозер это одна из основных машин, которая нашла широкое применение при производстве земляных работ. Бульдозеры используются при строительстве насыпей и выемок а также для формирования земляного полотна дорожных покрытий. Условия эксплуатации бульдозеров очень широки и значительно варьируются климатическими условиями нагрузками на рабочие и ходовое оборудование категориями и состояния грунта. Это обуславливает наличие больших запасов прочности металлоконструкций, рабочего оборудования, ходового оборудования и рамы бульдозера, которые закладываются при проектировании. Прочность металлоконструкции бульдозера и кинематических передач рассчитывается на основании максимальных нагрузок с использованием коэффициент динамичности, значения которых принимаются в пределах от 2 до 3,5. Такой подход приводит к значительному увеличению массы дорогостоящих конструкций машин, которые изготавливаются из высокопрочных сталей. Тем не менее, в настоящее время, не удастся спроектировать конструкции которые работают в течении всего срока службы и не требуют замены частей выходящих из строя в результате износа.

Бурное развитие информационных технологий, средств приема передачи и обработки информации, создание автономных вычислителей позволяют предположить, что эти технологии будут широко внедряться в области проектирования и эксплуатации строительных и дорожных машин. Ведущие производители строительной и дорожной техники в настоящее время используют такие технологии для создания автономных управляющих и диагностических комплексов своих машин. С течением времени такие комплексы трансформируется в цифровые двойники, которые позволяют на основании анализа информации поступающей от внешних измерительных устройств вычислять характеристики процессов происходящих во время работы машин и не поддающихся измерению, устанавливать состояние элементов машин и их систем, а также прогнозировать работоспособность этих элементов и систем и определять их остаточный ресурс в режиме реального времени.

Работа цифрового двойника любой машины строится на основании ее математической модели. Учитывая что гусеничный бульдозер - это сложная система состоящая из ряда взаимодействующих элементов которые могут работать в различных режимов для него требуется составление интегральной математической модели которая позволит установить взаимосвязи процессов происходящих при работе машины.

Цифровые двойники могут иметь различное назначение и применяться на различных этапах жизненного цикла изделия или комплектов изделий [1]. В зависимости от сложности изучаемых конструкций или процессов необходимо использовать модели различных уровней.

При разработке цифровых двойников можно использовать математические модели различной степени сложности. Современные расчетные приложения, такие, как Adams, Solid Works и др. оперируют системами дифференциальных уравнений с числом степеней свободы, превосходящим  $10^6$  и более [2].

В области проектирования металлоконструкций, кинематических, гидравлических, электрических и других механизмов широчайшее применение нашли системы, основанные на методах конечных или граничных элементов [3]. На основе применения этих методик инженерам предоставляется возможность нахождения оптимизированных решений по заданным критериям. [4]

В области управления транспортными потоками и эксплуатации транспортных машин, широкое применение могут найти цифровые двойники, основанные на использовании имитационных моделей, применение таких технологий позволяет оптимизировать транспортные процессы, учитывая случайные факторы, решать задачи, не имеющие аналитического решения [5].

В области диагностирования транспортных систем информационные технологии используются для выявления признаков неисправностей, поиска причин и методов устранения.

При проектировании и при эксплуатации транспортных систем большое значение имеет правильное определение внешних нагрузок, действующих на несущие системы и рабочее оборудование транспортных и технологических машин. Нагрузки являются функциями не только параметров внешней среды, но и параметров проектируемой машины, т.к. работа всех механизмов связана с выполнением рабочих операций и преодолением сил инерции.

Стремление к повышению конкурентоспособности техники заставляет производителей повышать качество изделий. Решение возникающих при этом задач требует разрешения конфликтных ситуаций, с одной стороны требуется увеличение прочности конструкций, их надежности,

долговечности, с другой стороны улучшение качества материалов и увеличение массы изделий приводит к увеличению себестоимости и потере конкурентоспособности. Одним из путей является повышение качества расчетов для уточнения нагрузок действующих на машину, систему или узел. Решение таких задач достижимо на стадии функционального проектирования, когда возможен выбор параметров машины, наиболее полно удовлетворяющих установленным целевым функциям [6].

Основой для создания цифрового двойника, предназначенного для функционального проектирования транспортно-технологических машин является набор динамических, математических и имитационных моделей составленных с достаточной степенью детализации. Такие модели необходимо разрабатывать на основе системного подхода [7]. Степень детализации устанавливается требованиями к решению задач.

Предлагается использовать цифровые двойники для функционального проектирования гусеничного бульдозера, оборудованного фронтальным отвалом. В соответствии с системным подходом бульдозер рассматривается, как ВНЕШНЯЯ СРЕДА – РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ - ГУСЕНИЧНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ – РАМА – ТРАНСМИССИЯ – ДВИГАТЕЛЬ – ОПЕРАТОР. Целью моделирования, является определение нагрузок, возникающих в системах и механизмах бульдозера при выполнении технологических операций.

В динамической модели бульдозера используются массы двигателя, трансмиссии, ведущего и ведомого дисков сцепления (насосного и турбинного колес гидротрансформатора), ведущего, направляющего, опорных и поддерживающих колес, траков, рабочего оборудования элементов условно подвижного и условно неподвижного потоков призмы волочения.

На основе математических моделей разработано программное обеспечение, представляющее собой цифровой двойник, предназначенный для определения параметров машины на стадии проектирования, проведения серий вычислительных экспериментов и получения характеристик процессов, сопровождающих работу основных систем и механизмов бульдозера при выполнении технологических операций [8]. Получаемые характеристики дают возможность проведения оптимизационных мероприятий с целью выбора наилучшего сочетания параметров исследуемых систем и достижения заданных показателей эффективности. Кроме того получаемая информация может быть использована для показателей нагруженности отдельных механизмов, их надежности и долговечности.

Применение цифровых двойников в функциональном проектировании позволяет установить влияние параметров исследуемых систем на их характеристики. При проектировании гусеничных машин для земляных работ важно рассматривать машину в виде единой модели, где представлены системы и механизмы, оказывающие существенное влияние на исследуемые характеристики и показатели. Использование цифровых двойников в виде программных имитационных комплексов позволяет получить информацию о влиянии параметров систем, взаимного расположения деталей и механизмов на характеристики машины в целом. При моделировании гусеничного бульдозера появляется возможность установить теоретическим путем величины и направление действия сил во взаимодействующих системах, что невозможно, либо требует больших материальных затрат при проведении натуральных экспериментов. Цифровые двойники приобретают все большее значение при проектировании машин, обеспечивают снижение затрат на экспериментальные исследования, позволяют снизить себестоимость опытно-конструкторских работ.

#### Литература

1. A P Galvão, S T Fernandes, P M L Moura de Oliveirac, A BanerjeeaJosé, A B Montevechic An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature *Computers & Industrial Engineering* Volume 124, October 2018, Pages 474-492.
2. Zhang L, Zeigler B P, Yuanjun Li Chapter 1 - Introduction to Model Engineering for Simulation *Model Engineering for Simulation* 2019, Pages 1-23.
3. A Armin, R Fotouhi, W Szyszkowski On the FE modeling of soil-blade interaction in tillage operations *Finite Elements in Analysis and Design*. Volume 92, December 2014, Pages 1-11.
4. Liu G R *Finite Element Method. A Practical Course* <https://www.sciencedirect.com/book/9780750658669/> finite-element-method.
5. S M Sohel Mahmuda, L Ferreiraa, Md S Hoqueb, A Tavassolia *Micro-simulation modelling for traffic safety: A review and potential application to heterogeneous traffic environment* *IATSS Research* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0386111217302133>.
6. Y-M Deng, G A Britton S B Tor *Constraint-based functional design verification for conceptual design* *Computer-Aided Design*. Volume 32, Issue 14, December 2000, Pages 889-899.

7. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В.П. Тарасик. — Минск : Новое знание, 2013. — 584 с.
8. Leskovets I V, Struktura i vzaimosvyazi v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya bul'dozera Stroitel'naya nauka i texnika. 2011. № 5 (38). S. 48-51.