

УДК 004.946

ПРИМЕНЕНИЕ VR-ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ГРУЗОВИКОВ

И.В. Макарова, А.Д. Бойко (Набережные Челны)

Введение

Парадигма перехода к человекоцентричным системам приводит к изменениям процессов и технологий, в том числе в производственных системах, где должна быть создана безопасная рабочая среда. Происходит смещение фокуса на человека, поэтому эргономичность производственных операций, комфортность обучения, выходят на первый план. В автомобилестроении, особенно, в грузовом, проблема обостряется динамичным переходом не только на новый модельный ряд автомобилей, но и появлением различных модификаций, надстроек, что требует проверки технологической цепочки операций на эргономичность и собираемость каждой такой модели. Для этих целей хорошо подходит имитационное моделирование и применение виртуальной реальности для исследования процессов перед запуском модели в серию. Кроме того, такие технологии являются хорошим инструментом в системах обучения персонала. Технологии виртуальной реальности (VR) активно внедряются в промышленность, предлагая инновационные методы для проектирования, сборки и оценки эргономичности операций. Производители могут создавать виртуальные копии реальных условий с помощью передовых методов моделирования, что позволяет им проектировать автомобили и системы, отвечающие самым высоким стандартам безопасности, эффективности производства и нормативным требованиям. Таким образом, технология виртуальной реальности – необходимый инструмент для решения задач в создании автомобилей следующего поколения для удовлетворения растущих экологических, технологических и социальных требований.

Особый интерес представляет применение VR в автомобилестроении, в частности, для проверки эргономичности рабочих процессов сборки узлов грузовиков на конвейере и их оптимизации. В данной статье анализируются ключевые проблемы, рассмотренные в исследованиях на текущий момент, а также практические примеры применения VR в этой области и перспективы развития технологии.

Проблемы проектирования процессов сборки грузовых автомобилей

Для организации серийного выпуска новых высокопроизводительных, долговечных, надежных в эксплуатации машин этапы подготовки производства, проведения исследовательских и экспериментальных работ должны быть эффективными. Для этих целей на стадии подготовки производства (проектирования технологического процесса) используют 3D-моделирование сборочных процессов.

Проектирование процессов сборки грузовых автомобилей сопряжено с рядом системных проблем, связанных как с высокой сложностью производимой продукции, так и с организационно-технологическими ограничениями производственных систем.

Во-первых, существенную трудность представляет высокая вариативность конфигураций изделий, характерная для сегмента грузового автопрома. Производители реализуют сборку по принципу *mixed-model line*, что предполагает значительные различия во времени выполнения и трудоёмкости операций при переходе от одной модификации к другой. Это приводит к необходимости сложного балансирования сборочных линий и постоянной адаптации маршрутов при сохранении ритма производства [1, 2].

Во-вторых, к числу типичных проблем относится обеспечение сборки крупногабаритных и тяжёлых узлов (кабина, силовой агрегат, мосты, топливные баки),

требующей применения подъемно-транспортного оборудования и согласования траекторий его движения с рабочими зонами операторов. Недостаточный уровень проработки маршрутов часто приводит к коллизиям в потоках и к дополнительным простоям оборудования [3].

Третьей критической проблемой выступает высокая эргономическая нагрузка на работников. Несмотря на широкую механизацию, значительное количество операций остаётся ручным, включая монтаж кабельных жгутов, установку элементов интерьера кабины, фиксацию многочисленных крепёжных элементов. Эти операции часто выполняются в неудобных позах (над головой, в наклонном положении), сопровождаются повторяющимися усилиями и сопряжены с риском развития профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата. Эмпирические исследования на предприятиях европейских производителей грузовиков фиксируют высокий уровень факторов риска WMSD (work-related musculoskeletal disorders) на подобных рабочих местах [4]. С учетом перехода к человекоцентричным системам, необходимо учитывать при этом физиологические возможности работников, что возможно с использованием виртуальной модели завода [5]. Такой подход позволит на стадии подготовки производства выявить ошибки и проверить собираемость изделия с учетом физиологических возможностей рабочего с учётом применяемого оборудования и ресурсов, обеспечит визуальным представлением процессы выполнения технологических операций, позволит сократить затраты.

Особое место занимают операции по прокладке кабельных жгутов и монтажу элементов интерьера, которые характеризуются плотной компоновкой, ограниченным доступом и высокой чувствительностью к допускам. Традиционное моделирование в автомобильном производстве часто не отражает реальную сложность сборки, что приводит к дорогостоящим ошибкам и задержкам. Инженеры и производители автомобилей активно используют эластичные детали, такие как зажимы, шланги и жгуты проводов, которые скручиваются, изгибаются и подвергаются различным манипуляциям в процессе сборки. Такой подход может не учитывать реальные условия труда рабочих при сборке или разборке компонентов и приводить к созданию конструкций, которые просто невозможно реализовать в заводских условиях. Более того, эти дефекты обнаруживаются лишь на поздних этапах производства, что приводит к невозможности сборки детали. В отличие от крупных узлов, данные процессы хуже поддаются автоматизации и требуют значительных усилий по обеспечению качества. Ошибки на данном этапе трудно выявляются при финальной инспекции, что повышает риск скрытых дефектов и, как следствие, приводит к росту затрат на доработку [6].

Немаловажным фактором является и связь условий труда с качеством продукции. Ряд исследований подтверждает, что неблагоприятные эргономические условия повышают вероятность ошибок при выполнении операций сборки, что, в свою очередь, отражается на показателях «правильно с первого раза» (First Time Through, FTT) [7].

Отдельного внимания заслуживает проблема интеграции цифровых данных. Несмотря на активное внедрение CAD/PLM-систем, между конструкторскими моделями и их использованием в иммерсивных VR-средах сохраняется «цифровой разрыв». CAD-модели требуют упрощения для VR-применений, а маршруты и инструкции часто не синхронизированы с актуальными версиями производственных данных. Это снижает доверие технологов и операторов к результатам виртуальной проверки [8].

При этом использование VR-технологий также сопряжено с рядом ограничений. Исследования показывают, что без реалистичной физической модели контактов, веса и

усилий невозможно достоверно оценить собираемость тяжёлых узлов [9]. Недостатки в моделировании коллизий и допусков могут приводить к ошибочным выводам о технологичности процесса [10]. Кроме того, отсутствие тактильной обратной связи затрудняет адекватную оценку усилий и доступности крепежа при ручных операциях [11]. Для повышения достоверности анализа требуется интеграция VR со специализированными методиками эргономической оценки (RULA, NIOSH, OWAS), а также участие производственного персонала в процессе виртуальных верификаций.

Обзор современных VR-технологий в промышленном проектировании и оценке эргономики

Применение виртуальной реальности в промышленности, особенно в автомобилестроении, активно исследуется в контексте оптимизации сборки, обучения операторов и оценки эргономики. Виртуальная реальность широко используется в различных отраслях включая инженерную деятельность, открывая новые возможности для повышения производительности и надежности производства, качества продукции и процессов. Авторы статьи [12] указываются возможности применения этого метода в других отраслях промышленности, учитывая опыт, накопленный в автомобильной промышленности.

Иммерсивные технологии направлены на воссоздание реальности посредством интерактивных цифровых сред и поскольку кажутся естественными и интуитивно понятными, то в той или иной степени внедрены всеми крупными автопроизводителями, которые осваивают эту метавселенную. С их помощью можно получить более глубокое понимание технологий проектирования и производства, что ранее было недоступно. Дополненная и виртуальная реальность в автомобильном секторе играют инновационную роль в преобразовании автомобильной экосистемы. Оптимизируя операции, снижая затраты и повышая безопасность, эти технологии являются ключевыми в инновациях. Если говорить об автомобильной отрасли, то иммерсивные технологии, такие как дополненная реальность (AR), виртуальная реальность и искусственный интеллект (ИИ), широко применяются на всех стадиях жизненного цикла автомобиля — от маркетинга, проектирования и производства до эксплуатации и логистики, включая взаимодействие с клиентами и обучения специалистов. VR может играть ключевую роль в маркетинговых исследованиях [13] в автомобильной промышленности, снижая затраты и сокращая время запуска нового продукта. Однако при этом необходимо учитывать такие ключевые факторы, как характеристики оборудования и программного обеспечения, качество стимулов и цели исследования.

Иммерсивные технологии особенно полезны для производителей и инженеров, которые могут использовать такое моделирование для повышения эффективности и экономичности процессов. Используя эти альтернативные подходы, можно сократить расходы и время, затрачиваемые на разработку прототипов или ремонт автомобилей, поскольку такие технологии позволяют представить более подробно как модель в целом, так и ее детали. Виртуальная и/или дополненная реальность могут быть реализованы на этапе проектирования для визуализации продукта и внесения изменений, без затрат на создание физических прототипов. Эти методы используют такие автомобильные компании как Jaguar Land Rover (для визуализации автомобиля в процессе проектирования), Porsche, Range Rover и BMW (которые используют дополненную реальность для выявления технических проблем в автомобилях).

Рассмотрим ключевые исследования, посвященные использованию VR для анализа сборки грузовых автомобилей и улучшения условий труда на производственных линиях. Дополненная и виртуальная реальность постепенно становится неотъемлемой частью автомобильной промышленности благодаря

многочисленным вариантам применения и преимуществам, которые они предоставляют. Моделирование с помощью виртуальной реальности обеспечивает практическое обучение рабочих, инженеров и отделов продаж, способствуя усвоению знаний и повышению осведомленности в вопросах безопасности.

VR позволяет инженерам тестировать сборку узлов в виртуальной среде, выявляя коллизии и конструктивные недочеты до начала физического производства. Например, в исследовании [14] VR использовалась для оценки когнитивной нагрузки операторов при работе с виртуальными моделями, что повысило точность проектирования. VR-тренажеры сокращают время обучения и снижают количество ошибок. В работе показано, что VR-симуляторы для обучения операторов погрузчиков позволяют отрабатывать сложные сценарии без риска для оборудования.

VR-симуляции позволяют моделировать действия рабочих, выявляя неудобные позы и избыточные нагрузки. Например, в исследовании [15] VR использовалась для анализа рабочих поз на конвейере, что позволило снизить риск травм. Комбинация VR и motion capture (MoCap) позволяет проектировать эргономичные рабочие места до начала производства. В работе [16] предложен метод, который сокращает время на проектирование и улучшает условия труда. Исследование [17] показало, что методы оценки эргономики, такие как NIOSH и SCANIA Ergonomics Standard (SES), помогают выявлять опасные операции.

В таблице 1 обобщены преимущества применения VR-симуляции на этапах ЖЦ автомобиля.

Таблица 1. Преимущества VR-симуляции на этапах ЖЦ автомобиля

Этап ЖЦ	Преимущества VR-симуляции
Дизайн, проектирование и прототипирование	Сокращение затрат на разработку и времени вывода продукта на рынок
Производство	Повышение эффективности, эргономичности и точности процессов
Обучение	Улучшение навыков и обеспечение безопасности сотрудников
Опыт вождения	Обучение навыкам управления, с помощью имитации сложных условий
Эксплуатация	Повышение безопасности и эргономичности операций сервиса и ремонта
Логистика	Повышение эффективности навигации и оповещения об опасностях в режиме реального времени
Утилизация	Минимизация отходов материалов при прототипировании и изготовлении деталей

Предлагаемое решение

При проектировании сборочных процессов могут возникнуть такие трудности, как невозможность закручивания крепления или крепление возможно закрутить лишь с помощью ручных инструментов. Кроме того, могут выявиться такие проблемы как отсутствие эргономики рабочего места. Решением становятся специализированные программные средства, позволяющие оптимизировать процессы на этапе проектирования с использованием VR и цифрового моделирования.

Современные VR-технологии в производстве опираются на мощные программные решения, которые делают процесс проектирования более эффективным и наглядным.

Пакеты Autodesk Maya и 3ds Max позволяют создавать детальные 3D модели производственных помещений и оборудования. Интеграция с виртуальной реальностью дает возможность просматривать созданные модели в VR-среде, что значительно упрощает оценку масштабов и пропорций проектируемых объектов.

Пакет Unreal Engine позволяет преобразовывать статичные 3D модели в интерактивные виртуальные пространства, создавать реалистичные симуляции производственных процессов и проводить виртуальные экскурсии по еще не построенным объектам.

Есть необходимость разработки решения, которое будет в себя включать множество инструментов, применяемых на производстве, позволит загружать модели из систем проектирования, используемых на производстве и будет наглядно демонстрировать физическую модель. Все это необходимо визуализировать в виртуальной реальности и достаточно точно переносить позицию пользователя и его рук в пространстве.

Для разработки прототипа подобного решения была выбрана среда разработки Unreal Engine 5. Этот игровой движок совместим с множеством моделей шлемов, в том числе имеющимся в наличии HTC Vive pro 2. В UE5 применяется собственный графический язык разработки Blueprint, также можно применять C++.

Для демонстрации возможности был выбран процесс установки на конвейерной ленте блока охлаждения грузового автомобиля на раму. Подвешенный на лебедке блок охлаждения необходимо спустить на место крепления, установить болты, шайбу и гайку, затем закрутить пневмогайковертом и так повторить со всеми местами для крепления.

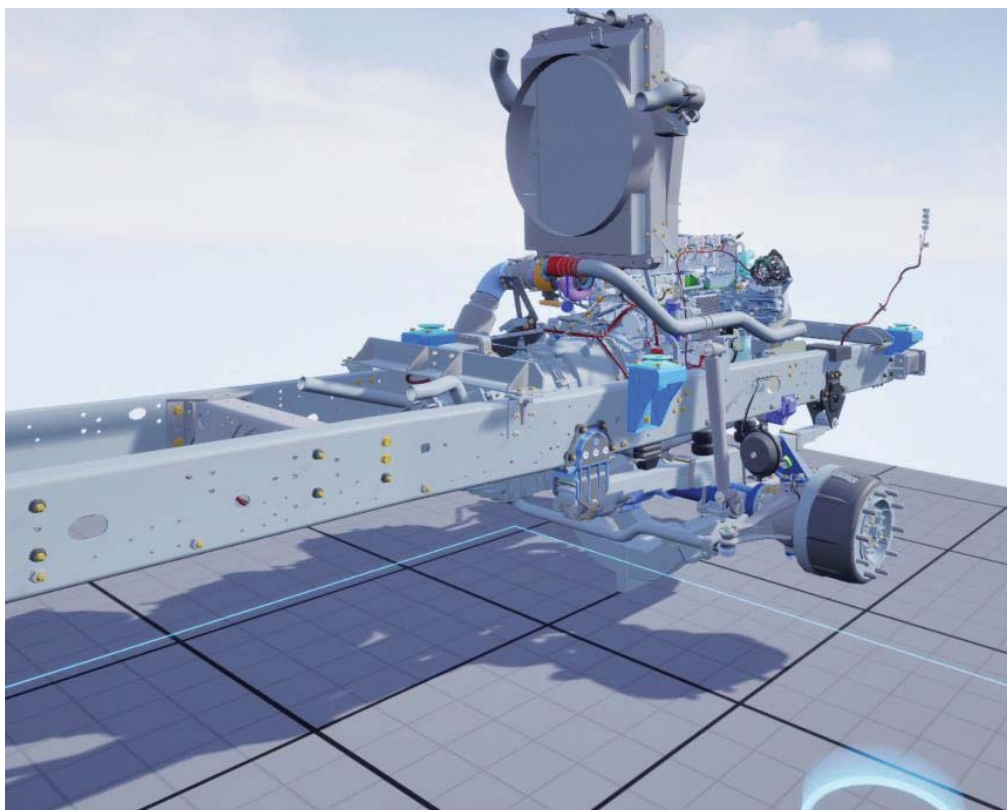


Рис.1. Виртуальная симуляция процесса установки блока охлаждения на раму грузового автомобиля в среде Unreal Engine 5

Реализация включила в себя несколько особенностей, позволяющих оценить эргономику процесса:

- инструмент и крепеж не может пересекать другие объекты;
- инструмент и крепеж имеет физическую модель и может быть обронён;
- при контакте объектов, находящихся «в руке» с другими объектами, происходит виброотдача, имитирующая физические отклики.



Рис. 2. Пример проверки эргономики и собираемости: позиционирование пневмогайковерта для затяжки крепления

Заключение

Современные условия производства в машиностроении характеризуются высоким уровнем конкуренции, повышением требований к качеству изделий и сокращению цикла производства. Одновременно повышается сложность изделий, в частности, усложняется конструктивная форма проектируемых изделий с целью снижения материалоёмкости и массы конструкции изделия. Конструкция изделия может быть признана технологичной, если она обеспечивает простое и экономичное изготовление и эксплуатацию этого изделия. Для совершенствования оценки технологичности необходимо автоматизировать данный подход, что возможно с применением иммерсивных технологий.

Применение VR-технологий в проектировании процессов сборки грузовиков демонстрирует высокий потенциал для снижения издержек, повышения качества и улучшения условий труда. Проведённый прототип на базе Unreal Engine 5 показал возможность реалистичной симуляции операций монтажа узлов с учётом физических свойств объектов, что позволяет выявлять потенциальные ошибки проектирования ещё до запуска производства.

Внедрение подобных решений способствует:

- сокращению времени на отработку технологических маршрутов;
- повышению достоверности оценки эргономики рабочих мест;
- снижению риска производственных травм и профессиональных заболеваний;
- оптимизации использования оборудования и пространства сборочного цеха.

Отдельного внимания заслуживает интеграция VR-тренажёров с системами имитационного моделирования производственных процессов. Виртуальные тренажёры позволяют не только обучать операторов и проверять эргономику операций, но и формировать нормативные показатели, которые могут служить исходными данными для цифровых моделей. В процессе отработки операции в VR фиксируются время выполнения, допустимые траектории движения, количество ошибок, усилия и ограничения, связанные с доступом к рабочей зоне. Эти данные могут быть перенесены в имитационные модели производственной линии, где используются для расчёта такта, балансировки операций, определения потребности в ресурсах и оценки загрузки оборудования. Таким образом, VR-среда становится источником реалистичных норм

и ограничений, что повышает достоверность имитационного моделирования и позволяет заранее прогнозировать производительность и выявлять потенциальные узкие места. В перспективе это открывает возможность построения сквозного цифрового контура – от CAD/PLM-модели через VR-проверку операций к имитационной модели производственного процесса, что обеспечивает комплексный подход к проектированию и организации автомобильного производства.

Перспективным направлением развития является интеграция VR-платформы с существующими CAD/PLM-системами и корпоративными базами данных, что позволит обеспечить сквозной цифровой поток информации от проектирования до производства. Дополнительно важным этапом станет внедрение систем тактильной обратной связи и имитации физических усилий, что повысит точность оценки технологичности ручных операций.

По мере дальнейшего развития иммерсивных технологий, будет наблюдаться всё более широкое их внедрение в разработку, производство автомобилей и обеспечение качества обслуживания клиентов. Благодаря интеграции искусственного интеллекта, Интернета вещей и систем автономного вождения, будущее дополненной и виртуальной реальности в автомобильной промышленности обещает быть революционным.

VR-технологии становятся не только инструментом визуализации, но и полноценным средством анализа и оптимизации производственных процессов в автомобилестроении. Их дальнейшее развитие открывает новые возможности для цифровизации и повышения конкурентоспособности отрасли.

Литература

1. **Boysen N., Fliedner, M. Scholl A.** A classification of assembly line balancing problems. *Eur. J. Oper. Res.* 2007, 183, 674-693. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>.
2. **Alghazi, A.S.; Kurz, M.E.** Mixed-model line balancing with parallel stations, zoning constraints, and sequencing considerations. *Comput. Ind. Eng.* 2019, 128, 70-81. <https://doi.org/10.1007/s10601-017-9279-9>.
3. **Zare, M.; Malinge-Oudenot, A.; Höglund, R.; Biau, S.; Roquelaure, Y.** Evaluation of ergonomic physical risk factors in a truck manufacturing plant: Case Study in SCANIA Production Angers. *Ind. Health* 2015, 54, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2015-0055>.
4. **Laring, J.; Forsman, M.; Kadefors, R.; Örtengren, R.** MTM-Based Ergonomic Workload Analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2002, 30, 135-148. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(02\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(02)00091-4).
5. **Erős, E.; Dahl, M.; Hanna, A.; Albo, A.; Falkman, P.; Bengtsson, K.** Integrated virtual commissioning of a ROS2-Based collaborative and intelligent automation system. In *Proceedings of the 2019 24th IEEE International Conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, 10–13 September 2019; pp. 407-413. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869444>.
6. **Devries, H.; Jensen, A.; Fagerhult, T.** Challenges in Harness Assembly for Commercial Vehicles: Ergonomic and Quality Aspects. *Procedia CIRP* 2021, 97, 405-410. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.107>.
7. **Chalmers, K.; Larsson, T.; Falkman, P.** The Influence of Production Ergonomics on Product Quality in the Automotive Industry. *Int. J. Ind. Ergon.* 2015, 47, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.01.001>.
8. PTC. How Volvo Group Uses Augmented Reality to Transform Manufacturing and Training. PTC Customer Story, 2021. Available online: <https://www.ptc.com/en/case-studies/volvo-group>.

9. **Gvish, N.; Gutierrez, T.; Webel, S.; Rodríguez-Arce, J.; Peveri, M.; Tecchia, F.** Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *interact. Learn. Environ.* 2015, 23(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/10494820.2013.815221>.
10. **Auyeskhán, U.; Steed, C.** Virtual reality based assembly-level design for additive manufacturing: A Decision Framework Involving Human Aspects of Design. *J. Comput. Des. Eng.* 2023, 10, 1165-1183. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad041>.
11. **Čujan, Z.; Fedorko, G.; Mikušová, N.** Application of virtual and augmented reality in automotive. *Open Eng.* 2020, *10*, 113-119. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0022>.
12. **Henriques, A.; Winkler, I.** The advancement of virtual reality in automotive market research: Challenges and Opportunities. *Appl. Sci.* 2021, *11*, 11610. <https://doi.org/10.3390/app112411610>.
13. **Schaub, K.; Mühlstedt, J.; Illmann, B.; Bauer, S.; Fritzsche, L.; Wagner, T.; Bullinger-Hoffmann, A.; Bruder, R.** Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet' (EAWS). *Int. J. Hum. Factors Model. Simul.* 2012, 3(4), 398-421. <https://doi.org/10.1504/IJHFMS.2012.051581>.
14. **Bueno-Vesga, J.A.; Xu, X.; He, H.** The effects of cognitive load on engagement in a virtual reality learning environment. In 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), IEEE, 2021; pp. 645-652. <https://doi.org/10.1109/VR50410.2021.00090>.
15. **Carvalho, R.; Marçal, M.** Ergonomic evaluation of assembly line work activity in the automotive industry: A Case Study. *Explor. Musculoskelet. Dis.* 2024, 2, 336-352. <https://doi.org/10.37349/emd.2024.00060>.
16. **Kačerová, I.; Kubr, J.; Horejsi, P.; Kleinová, J.** Ergonomic design of a workplace using virtual reality and a motion capture suit. *Appl. Sci.* 2022, 12(4), 2150. <https://doi.org/10.3390/app12042150>.
17. **Zare, M.; Malinge-Oudenot, A.; Höglund, R.; Biau, S.; Roquelaure, Y.** Evaluation of ergonomic physical risk factors in a truck manufacturing plant: Case Study in SCANIA Production Angers. *Ind. Health* 2015, 54, 163-176. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2015-0055>.