

М.С. Высоцкий, академик НАН Беларуси,
С.В. Харитончик, к.т.н.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

СИСТЕМА ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Достижение высоких результатов при выпуске сложных промышленных изделий требует широкого использования инструментария, основанного на применении современных информационных (компьютерных) технологий, предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессах. Современное компьютерное автоматизированное проектирование идет по пути быстрого расширения исследуемого поля вариантов проектных решений и одновременно выдвигает более жесткие требования к снижению затрат на проработку каждого варианта. При этом достигнут определенный уровень, когда автоматизация существенно ускорила разработку проектной документации, но мало затронула другие виды проектных работ.

Сегодня настало время, когда быстрый и экономичный вывод на рынок новых машин фактически сводится к соревнованию в области освоения и применения компьютерных технологий. Автомобильные производители ставят задачу сократить время вывода на рынок очередной модели до 1,5 лет.

Поэтому при создании новой перспективной техники следует существенно обновить традиционный процесс проектирования (рисунок 1, а), поскольку влияние отдельных его этапов негативно сказывается не только на качестве проектирования, но и на эксплуатационных характеристиках будущей машины несмотря даже на то, что внедрение компьютерных технологий существенно сократило ряд этапов проектирования, не исключив их полностью. Изменение подходов к процессу проектирования с последующим проведением виртуальных испытаний (рисунок 1, б) с одной стороны позволяют сразу приступить к сертификации техники, а с другой стороны — начать подготовку ее производства. При этом натурные испытания должны выйти на новое качество и существенно повысить свою роль уже как средства оценки не только совершенства конструкции, но и всего технологического цикла изготовления машин.

Один из путей сокращения продолжительности опытно-конструкторских работ и повышения их эффективности — частичная замена физических экспериментов компьютерным моделированием. Поэтому



Рисунок 1 — Традиционный (а) и перспективный (б) методы создания автотракторной техники

на современном этапе особая роль отводится виртуальным испытаниям. Сегодня они стали инструментом конструктора, который на стадии проектирования оценивает соответствие конструкции заданным требованиям и стандартам. Благодаря этому уже в ряде случаев сертификация продукции осуществляется на основе доверия результатам виртуальных испытаний без физических испытаний опытных образцов.

Указанный подход позволит создать более совершенные типы машин, модели которых будут высоко унифицированы, технологичны, максимально закроют потребности рынка, и существенно повысить конкурентоспособность изделий.

Из этого вытекает ряд основных на современном этапе требований к компьютерным моделям, которые используются на разных стадиях процесса проектирования:

- согласованные правила построения геометрии компьютерных моделей;
- возможность импортирования в различные системы / среды;
- использование инструментов параметризации при построении модели;
- необходимость создания инструментов верификации компьютерной модели;

- необходимость создания баз данных для упорядочения, типизации и оптимизации компьютерных моделей.

Современное высокотехнологичное промышленное изделие, такое как автомобиль, состоит из двух равнозначных компонентов: физического воплощения изделия («физический продукт») и информационного воплощения изделия («интеллектуальный продукт»), т.е. данных об изделии. При этом физический продукт начинает появляться только на этапе производства изделия и заканчивает существование на этапе его утилизации. В то же время, интеллектуальный продукт начинает свое существование вместе с началом жизненного цикла изделия (с этапа маркетинга и изучения рынка) и может продолжать существовать даже после окончания жизненного цикла изделия. Таким образом, на начальных этапах жизненного цикла интеллектуальный продукт тождественен самому изделию, т.к. физического продукта еще не существует в природе.

Компьютерные технологии обеспечивают сегодня не только самый широкий спектр наукоемких инженерных расчетов: прочности, динамики, кинематики, теплопередачи, акустики, аэродинамики, долговечности, ресурса и т.д., но также позволяют виртуально моделировать технологические процессы изготовления и сборки изделий. А самое главное — обеспечивают создание подробнейших компьютерных моделей сложных машин и механизмов, проводя глубокий их анализ с учетом реальных условий эксплуатации. Таким образом, еще на ранних стадиях проектирования создаются высокоточные компьютерные модели. При этом возникает проблема увязки разнообразных компьютерных моделей и создания удобной среды для работы с ними. Для реализации информационного потенциала, полученного с помощью компьютерных технологий, требуется многомерная многодисциплинарная среда.

Разработка структуры и самой системы виртуального проектирования техники начинается с решения задач онтологизации, которая представляет собой поэтапный процесс схематизации инженерных устройств, в ходе которого эти объекты разбиваются на отдельные части и любая замещается «идеализированным представлением» (схемой, моделью). Замещение инженерного объекта математическими моделями нужно и само по себе как нужное условие изобретения, конструирования и расчета и как стадия построения подходящих для этих процедур идеальных объектов естественной науки.

Представление машины в виде различных схем и моделей — необходимый элемент проектирования. На начальных стадиях обоснова-

ние схемных решений во многом определяет облик будущего объекта. Построение схем и проведение с их помощью многовариантных расчетов во многом способствует правильному выбору концептуальных решений. Кроме того, использование схем не только на начальных стадиях проектирования, но и на других обусловлено тем, что многие расчеты не требуют представления машины в виде модели, полностью описывающей ее геометрию. Поэтому создание автоматизированных методов построения схем и формирование по ним математических моделей является актуальной задачей.

Рассмотрим решение задачи создания системы виртуального проектирования перспективной автотракторной техники на примере функционирования системы виртуального проектирования Республиканского компьютерного центра машиностроительного профиля (РКЦМП) ГНУ «ОИМ НАН Беларуси» (рисунок 2). Здесь на базе реализованных



Рисунок 2 — Система виртуального проектирования автотракторной техники РКЦМП

проектов разработаны и отработаны на практике оригинальные специализированные пакеты наукоемких программ, включая компьютерные модели, для схемного представления и расчетов машин.

Помимо применения в процессах проектирования новой техники предприятий Беларуси созданные в РКЦМП программные продукты и модели образуют самостоятельную цепочку компьютерного проектирования из наукоемких технологий. В нее привлекаются данные о результатах САД-проработки агрегатов и узлов машин, как исходная внешняя информация. В основу указанных технологий ложатся современные методы математического моделирования, комбинаторики, теории вероятностей, теории колебаний, теории движения машин, теории надежности, теории систем и оптимизации.

Модели различных подсистем затем можно объединить в суммарную модель полной системы, которая решается совместно. Это позволяет оптимизировать взаимодействие между механическими, гидравлическими, термодинамическими и электрическими системами, прежде чем приступить к испытаниям опытного образца.

Выход на качественно новый уровень научного обеспечения процесса проектирования автотракторной и сельскохозяйственной техники стал возможен в РКЦМП благодаря совместному решению комплекса вопросов создания взаимосвязанных компьютерных технологий по обоснованию концепции машин, дизайну, моделированию и оптимизации основных свойств и проектированию.

Рассмотрим функционирование системы виртуального проектирования на примере создания перспективного многозвенного автопоезда.

Решение проблем **дизайна** заключается в отработке внешних форм машин, интерьера кабин, эргономики рабочего места водителя. Оно проводится с использованием профессиональных пакетов программ для концептуального и промышленного дизайна Icem/Surf, Alias/WaveFront, а также пакетов Pro/Engineer, UGS.

Исходными данными для разработки внешнего строения АТС являются техническое задание, задающее основные параметры АТС, и компоновочный чертеж со схематически изображенными основными узлами и агрегатами (рисунок 3). Базируясь на этих документах, дизайнеры выполняют поисковые эскизы экстерьера кабины, принимая во внимание вопросы аэродинамики, эргономики рабочего места и зоны отдыха водителя и пассажира (рисунок 4).

При разработке дизайна АТС необходимо опираться на следующие критерии эстетических свойств создаваемого объекта:

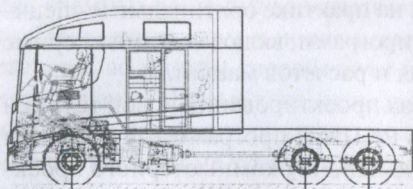


Рисунок 3 — Компоновочный чертеж со схематически изображенными основными узлами и агрегатами

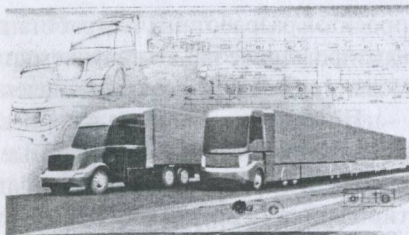


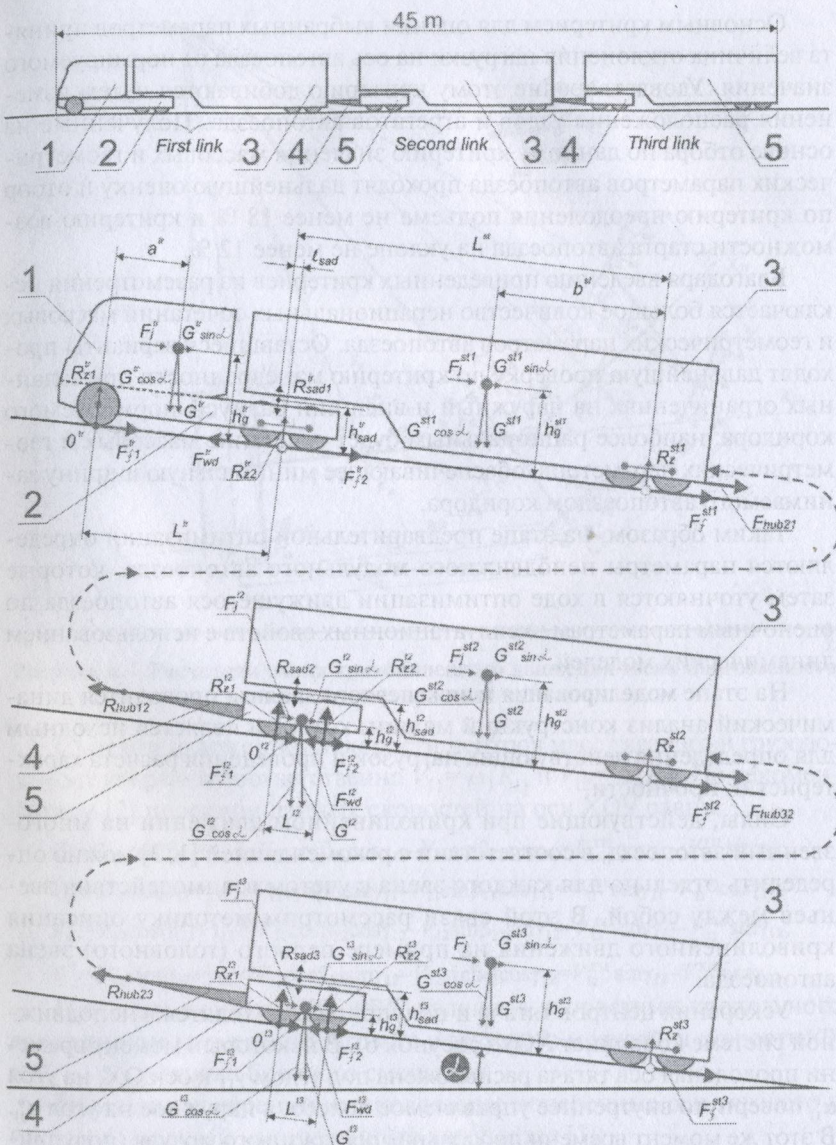
Рисунок 4 — Варианты проработки экстерьера

- информативность (наглядное выражение назначения изделия; образность формы);
- целостность композиции (выразительность объемно-пространственной структуры; тектоничность, соразмерность, колорит);
- стилевая выразительность (соответствие современным стилевым тенденциям; соответствие стилевому ансамблю среды);
- социально-утилитарная ценность (общественная оправданность; функциональное соответствие);
- экономическая эффективность (трудоемкость; материалоемкость);
- производственно-техническая ценность (технологичность; прогрессивность конструкций и материалов);
- отделка и товарный вид (качество наружной и внутренней отделки; выразительность фирменных знаков).

Итогом этапа дизайна становится уточненная трехмерная компоновка кабины. Она является основой для проведения виртуальных испытаний на прочность и аэродинамику.

Автоматизированное проектирование по выбору конструктивных параметров, определяющих эксплуатационные свойства машин, проводится с использованием программного обеспечения собственной разработки. На основе этих параметров осуществляется компоновка узлов, агрегатов и машин в целом.

Для выбора компоновочной схемы многозвенного автопоезда разработан метод предварительной оптимизации [1] (рисунок 5). Целью получения оптимальной компоновочной схемы и основных массо-геометрических параметров многозвенного модульного автопоезда является нахождение таких его геометрических параметров, при которых обеспечивается использование максимальной грузоподъемности, заданные нагрузки на оси, маневренность, а также сохранение мобильности при преодолении заданных уклонов.



1 — кабина, 2 — тяговый модуль, 3 — грузовой модуль, 4 — сцепное устройство, 5 — тяговая тележка

Рисунок 5 — Расчетная схема для предварительной оптимизации массо-геометрических параметров многозвенного автопоезда

Основным критерием для оценки выбранных параметров принята величина отклонения нагрузки на ось автопоезда от нормируемого значения. Удовлетворение этому критерию добиваются путем изменения расположения узлов и агрегатов автопоезда. Полученные на основе отбора по данному критерию значения массовых и геометрических параметров автопоезда проходят дальнейшую оценку и отбор по критерию преодоления подъема не менее 18 % и критерию возможности старта автопоезда на уклоне не менее 12 %.

Благодаря введению приведенных критериев из рассмотрения исключается большое количество нерациональных сочетаний массовых и геометрических параметров автопоезда. Оставшиеся варианты проходят дальнейшую проверку по критерию маневренности при заданных ограничениях на наружный и внешний радиусы нормируемого коридора: наиболее рациональным будет сочетание массовых и геометрических параметров, обеспечивающее минимальную ширину занимаемого автопоездом коридора.

Таким образом, на этапе предварительной оптимизации определяются параметры неподвижного модульного автопоезда, которые затем уточняются в ходе оптимизации движущегося автопоезда по оценочным параметрам эксплуатационных свойств с использованием динамических моделей.

На этапе **моделирования и инженерного анализа** проводится динамический анализ конструкций машин, который является исходным для определения действующих нагрузок и проведения расчета характеристик прочности.

Силы, действующие при криволинейном движении на многозвенный автопоезд, в соответствии с рекомендацией [1, 3] можно определить отдельно для каждого звена с учетом взаимодействия звеньев между собой. В этой связи рассмотрим методику описания криволинейного движения на примере первого (головного) звена автопоезда.

Ускорения центров тягача и полуприцепа находятся в неподвижной системе координат ХОУ (рисунок 6). В некоторый момент времени продольная ось тягача расположена под углом γ_{11} к оси ОХ, на угол α'_{11} повернуто внутреннее управляемое колесо, а наружное на угол α''_{11} . В этот же момент времени продольная ось грузового модуля (полуприцепа) к оси ОХ расположена под углом γ_{12} . С центрами тяжестей тягового и грузового модулей свяжем подвижные системы координат $x_{11}o_{11}y_{11}$ и $x_{12}o_{12}y_{12}$. Оси $o_{11}x_{11}$ и $o_{12}x_{12}$ будут направлены вдоль продольных осей модулей.

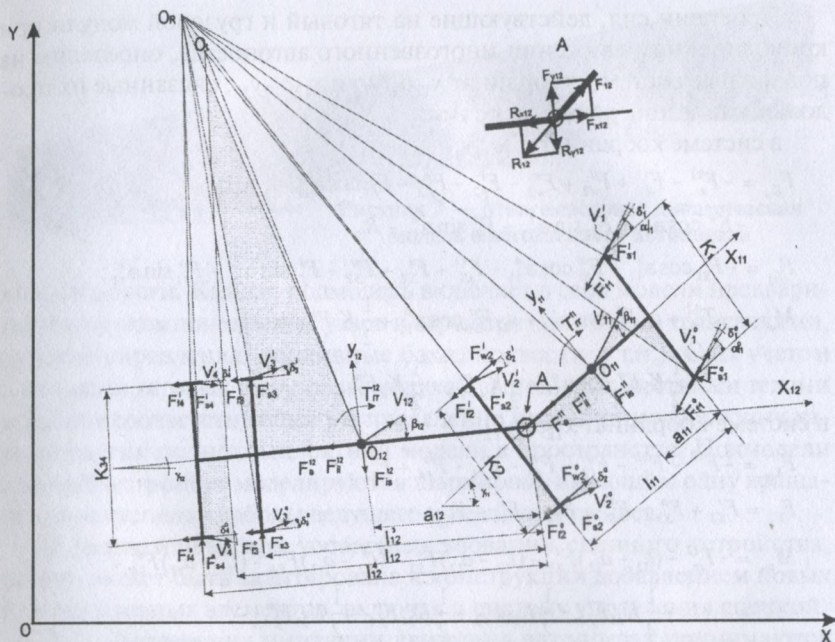


Рисунок 6— Расчетная схема криволинейного движения звена многозвенного автопоезда

С учетом изложенного скорости центров масс тягового и грузового модулей равны соответственно $V_{11} = \omega_1 R_{11}$ и $V_{12} = \omega_1 R_{12}$. По рекомендациям [2] проекции данных скоростей на оси XOY равны

$$V_{11}^X = V_{11} \cos(\beta_{11} + \gamma_{11}) = V_{11} \cos \beta_{11} \cos \gamma_{11} - V_{11} \sin \beta_{11} \sin \gamma_{11} = V_{11}^{X11} \cos \gamma_{11} - V_{11}^{Y11} \sin \gamma_{11};$$

$$V_{11}^Y = V_{11} \sin(\beta_{11} + \gamma_{11}) = V_{11} \cos \beta_{11} \sin \gamma_{11} - V_{11} \sin \beta_{11} \cos \gamma_{11} = V_{11}^{X11} \sin \gamma_{11} - V_{11}^{Y11} \cos \gamma_{11};$$

$$V_{12}^X = V_{12} \cos(\beta_{12} + \gamma_{12}) = V_{12} \cos \beta_{12} \cos \gamma_{12} - V_{12} \sin \beta_{12} \sin \gamma_{12} = V_{12}^{X12} \cos \gamma_{12} - V_{12}^{Y12} \sin \gamma_{12};$$

$$V_{12}^Y = V_{12} \sin(\beta_{12} + \gamma_{12}) = V_{12} \cos \beta_{12} \sin \gamma_{12} - V_{12} \sin \beta_{12} \cos \gamma_{12} = V_{12}^{X12} \sin \gamma_{12} - V_{12}^{Y12} \cos \gamma_{12}.$$

При этом скорости V_{11}^{X11} и V_{12}^{X12} являются скоростями продольного движения соответственно тягового и грузового модулей, а скорости V_{11}^{Y11} и V_{12}^{Y12} — скоростями бокового смещения.

Проекции ускорений на продольные поперечные оси тягового и грузового модулей многозвенного автопоезда [3]:

$$j_{11,12}^{X11,X12} = j_{11,12} - V_{11,12}^{Y11,Y12} \omega_{11,12};$$

$$j_{11,12}^{Y11,Y12} = V_{11,12}^{X11,X12} \omega_{11,12} + dV_{11,12}^{Y11,Y12} / dt,$$

где $dV_{11}^{X11}/dt = j_{11}$, $dV_{12}^{X12}/dt = j_{12}$ — продольные ускорения модулей, а $d\gamma_{11}/dt = \omega_{11}$ и $d\gamma_{12}/dt = \omega_{12}$ — угловые скорости модулей.

Проекции сил, действующие на тяговый и грузовой модули при криволинейном движении многозвенного автопоезда, определим на подвижные системы координат $x_{11}o_{11}y_{11}$ и $x_{12}o_{12}y_{12}$, связанные их продольными и поперечными осями:

в системе координат $x_{11}o_{11}y_{11}$

$$\begin{aligned}
 F_{x_{11}} &= -F_a^{11} - F_{II}^{11} + F_{w2}^i + F_{w2}^o - F_{f2}^i - F_{f2}^o - F_{f1}^i \cos a_{11}^i - \\
 &\quad - F_{f1}^o \cos a_{11}^o - F_{S1}^i \sin a_{11}^i - F_{S1}^o \sin a_{11}^o - R_{12} \quad ; \\
 F_{y_{11}} &= -F_{S1}^i \cos a_{11}^i - F_{S1}^o \cos a_{11}^o - F_{IS}^{11} + F_{S2}^i + F_{S2}^o - F_{f1}^i \sin a_{11}^i - F_{f1}^o \sin a_{11}^o ; \\
 M_{o_{11}} &= -T_{\pi}^{11} + a_{11} F_{S1}^i \cos a_{11}^i + a_{11} F_{S1}^o \cos a_{11}^o + \frac{1}{2} K_1 F_{f1}^i \cos a_{11}^i - \\
 &\quad - \frac{1}{2} K_1 F_{f1}^o \cos a_{11}^o + \frac{1}{2} K_2 F_{f2}^i + \frac{1}{2} K_2 F_{f2}^o .
 \end{aligned}$$

в системе координат $x_{12}o_{12}y_{12}$

$$\begin{aligned}
 F_{x_{12}} &= -F_a^{12} - F_{II}^{12} - F_{f3}^i - F_{f3}^o - F_{f4}^i - F_{f4}^o + F_{x_{12}} ; \\
 F_{y_{12}} &= F_{S3}^i + F_{S3}^o - F_{IS}^{12} + F_{S4}^i + F_{S4}^o + F_{y_{12}} ; \\
 M_{o_{12}} &= -T_{\pi}^{12} - (I_{12}^3 - a_{12}) F_{S3}^i - (I_{12}^3 - a_{12}) F_{S3}^o - (I_{12}^4 - a_{12}) F_{S4}^i - (I_{12}^4 - a_{12}) F_{S4}^o + \\
 &\quad + \frac{1}{2} K_{34} F_{f3}^i - \frac{1}{2} K_{34} F_{f3}^o + \frac{1}{2} K_{34} F_{f4}^i - \frac{1}{2} K_{34} F_{f4}^o ,
 \end{aligned}$$

где под F_w приняты обозначения соответствующих окружных сил ведущих колес, F_f — сил сопротивления качению колес, F_a — силы аэродинамического сопротивления, F_{II} — продольной составляющей силы инерции, F_{IS} — боковой составляющей силы инерции, F_{Si} — силы бокового удара. Смысл остальных принятых переменных следует из рисунка 6. В обозначениях индексов первая цифра указывает на порядковый номер звена автопоезда, вторая — «1» на отношение переменной к тяговому модулю, «2» на отношение переменной к грузовому модулю.

Проведение виртуальных испытаний отдельных конструкций и машин в целом позволяет еще до изготовления опытных образцов дать заключение об их соответствии действующим стандартам и нормам. В случае отклонения от норм конструкция дорабатывается. Используемое программное оборудование — MSC.ADAMS, NASTRAN, LS-DYNA.

Для анализа показателей маневренности, управляемости и устойчивости в MSC.ADAMS создана параметризованная полнокомплектная динамическая модель многозвенного автопоезда (рисунок 7), позволяющая путем компьютерного моделирования провести серию виртуальных испытаний.

Динамическая модель автопоезда включает в себя подмодели тягового модуля с кабиной, трех грузовых модулей, двух тяговых подкатных модулей, две подмодели сцепного устройства, а также модели

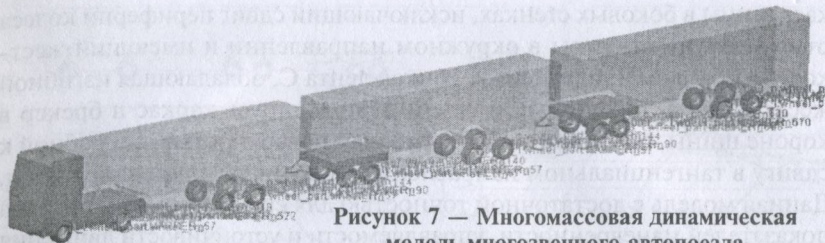


Рисунок 7 — Многомассовая динамическая модель многозвенного автопоезда

колес и дороги. Каждая подмодель включает в себя модели предварительно прокомпонованных узлов и агрегатов (двигатели, трансмиссии, рулевые управления, топливные баки, подвески и т.п.). С их учетом подмодели тяговых и грузовых модулей выполнены жесткими телами и задают соответствующее распределение инерционно-массовых характеристик полнокомплектной модели в пространстве. Подмодели сцепных устройств моделируются шарниром, имеющим одну вращательную степень свободы ведущего и ведомого звеньев.

В дальнейшем, при усовершенствовании сцепного устройства, модель может быть адаптирована к конструкции добавлением новых конструктивных элементов, включая и систему управления сцепкой.

Для обеспечения имитации движения автопоезда принимаются модели взаимодействия шины с дорогой, используемые в пакете MSC.ADAMS. В зависимости от типа испытаний используются модели шин Fiala или Расејка.

В многокомпонентной модели автопоезда применяется модель шины, на основании теории E. Fiala [4] (рисунок 8). Модель шины имеет жесткую ступицу A, пневматический элемент B, который моделирует упругое основание и сетку диагонально уложенных слоев кар-

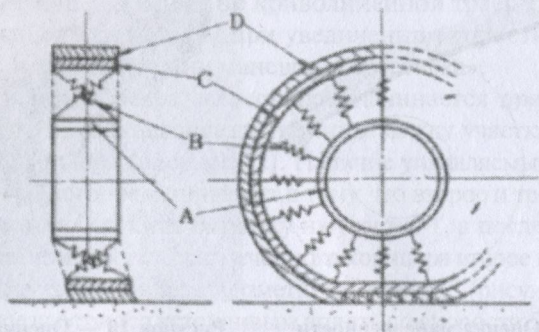


Рисунок 8 — Структура модели шины E. Fiala

каса шины в боковых стенках, исключая сдвиг периферии колеса относительно ступицы в окружном направлении и имеющий жесткость в боковом направлении, тонкая лента С, обладающая изгибной жесткостью в боковом направлении, моделирует каркас и брекер в короне шины, рабочая лента D с рабочей поверхностью, способной к сдвигу в тангенциальном направлении моделирует протектор шины. Данная модель с достаточной точностью для сравнительного анализа показателей маневренности, управляемости и устойчивости движения автопоезда воспроизводит упругие и сцепные характеристики шины.

Таким образом, виртуальные испытания, проведенные с помощью разработанной динамической модели многозвенного автопоезда, позволят оптимизировать конструктивные решения рулевого управления, подвески, сцепного устройства и др. для обеспечения заданных стандартами показателей его маневренности, устойчивости и управляемости и разработки алгоритмов управления его движением.

Рассмотрим результаты виртуальных испытаний многозвенного автопоезда на основе созданных динамических моделей по показателям эксплуатационных свойств, определенных на основе действующих стандартов (рисунки 9, 10).

При движении многозвенного автопоезда по стандартизованному коридору по часовой стрелке водитель удерживает левый габарит головного звена как можно ближе к кромке большого круга радиусом 12,5 м (рисунок 9). В силу конструктивных особенностей полуприцеп даже одного звена будет перемещаться в направлении малого круга радиусом 5,3 м по причине действия боковых сил на колеса полуприцепа. Расче-

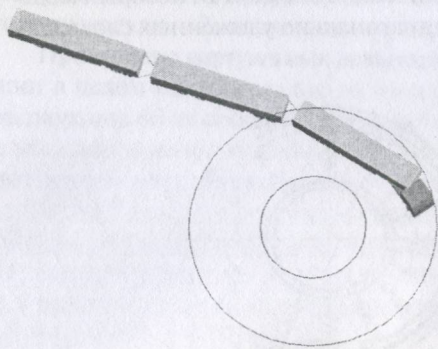


Рисунок 9 — Оценка маневренности многозвенного автопоезда

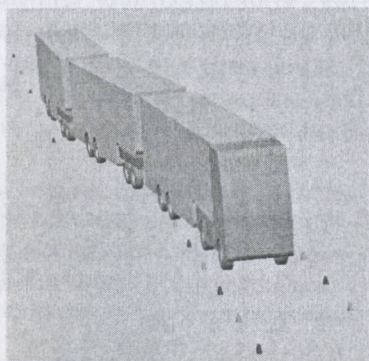


Рисунок 10 — Оценка маневра «переставка»

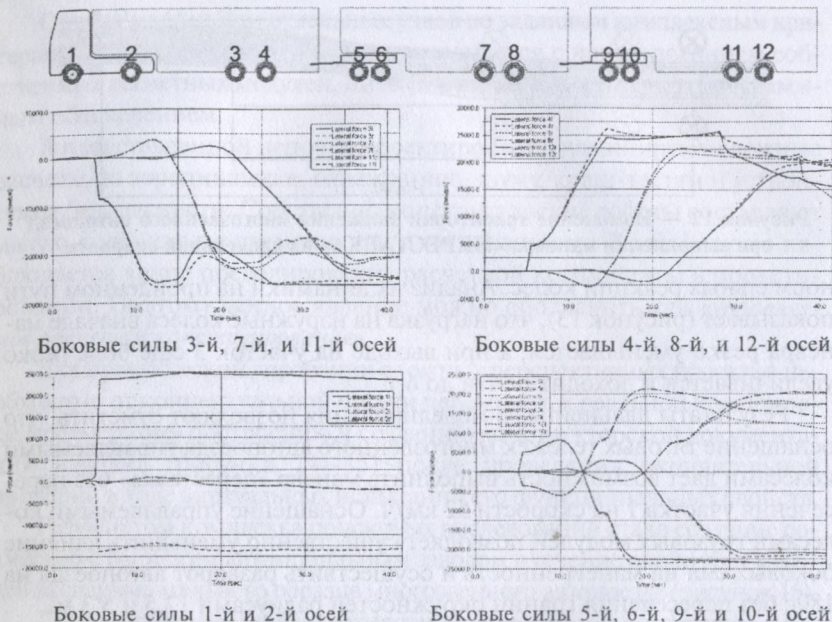


Рисунок 11 — Изменение боковых сил на колесах многозвенного автопоезда при исследовании маневренности

ты показывают (рисунок 11), что отсутствие управляемых колес в грузовых модулях приводит к большей силовой нагруженности ходовой системы многозвенного автопоезда, созданию дополнительных моментов сопротивления повороту и соответствующей потере мощности.

Разные значения боковых сил на колесах левого и правого бортов многозвенного автопоезда возникают еще и в связи с перераспределением масс при движении по криволинейной траектории. Это становится наиболее заметным при увеличении скорости движения, в частности, при выполнении маневра «переставка».

Выполнение маневра «переставка» начинается при пересечении передними колесами автопоезда границы между участками 1 и 2 размеченного коридора (рисунок 12). Наличие управляемых колес только на тягаче головного звена приводит к тому, что второе и третье звенья автопоезда пересекают слева разметку на участке 1, а после прохождения головным звеном участка 2 размеченного коридора второе и третье звенья автопоезда пересекают справа разметку на участке 3 (рисунок 12). Вместе с тем автопоезд остается устойчивым вплоть до скорости 50 км/ч. Повышение границы устойчивости возможно при управлении значениями

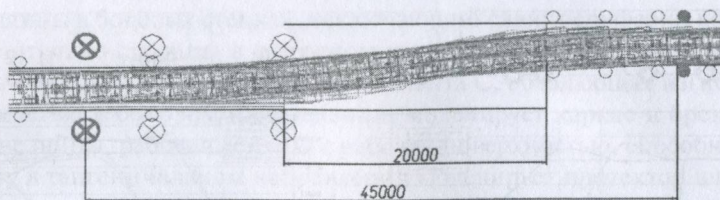


Рисунок 12 — Изменение траектории движения многозвенного автопоезд при выполнении маневра «ПЕРЕСТАВКА» на предельной скорости

нормальных реакций колес. Анализ их динамики на пройденном пути показывает (рисунок 13), что нагрузка на наружные колеса вначале маневра резко уменьшается, а при выходе на участок 3 еще более резко увеличивается и доходит почти до 6 т.

Результаты дальнейшего моделирования позволяют отметить, что оснащение тяговых тележек многозвенного автопоезда управляемыми колесами дает возможность выполнить маневр «переставка» без пересечения участка 1 на скорости 52 км/ч. Оснащение управляемыми колесами грузовых модулей позволяет существенно уменьшить влияние боковых сил на маневренность и осуществить разворот автопоезда на 180° без пересечения границ окружностей радиусами 12,5 и 5,3 м.

Вместе с тем, управляемые колеса тяговых и грузовых модулей необходимо фиксировать в положении прямолинейного движения при выполнении маневров на погрузочно-разгрузочных площадках грузовых терминалов с целью выполнения фигур типа «треугольник» для обеспечения наибольшего удобства и оперативности работ по разгрузке и загрузке автопоезда (рисунок 13).

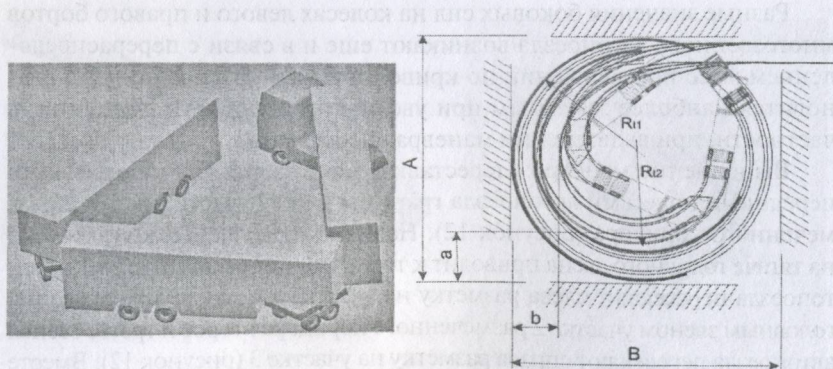


Рисунок 13 — Моделирование складывания автопоезда в «треугольник» для погрузки/разгрузки на грузовом терминале

Оценка машин или отдельных узлов по заданным комплексным критериям, включая оценку ресурса, выполняется с использованием собственных расчетных модулей, интегрируемых с зарубежным программным обеспечением.

В представленной цепочке проектирования доминируют сложные расчеты по аэродинамике, охлаждению, шуму, краш-тестам и устройствам безопасности. Собственно конструкторские работы составляют малую долю как по времени, так и по сложности. В этом случае наблюдается явное превалирование расчетной компоненты в проектировании. Поэтому данное явление можно обозначить как *«управляемое расчетом конструирование»*.

Для практической апробации сложных перспективных проектов необходимо от концептуальной стадии переходить к реальной компоновке, трехмерному построению и созданию конструкторской документации изделия (рисунки 14—15) после проведения окончательной проверки в ходе виртуальных испытаний его функциональных свойств.

Результатом комплекса поисковых исследований стало создание совместно с Минским автомобильным заводом в течение около трех месяцев экспериментального образца многозвенного автопоезда (рисунок 16).

Для подтверждения адекватности предложенной концепции в условиях испытательного полигона были проведены предварительные испытания многозвенного автопоезда (рисунок 17). Их результаты позволили также уточнить теоретические методы, компьютерные модели и дать рекомендации по улучшению и оптимизации его конструкции.

В ходе движения по окружности радиусом 50 м и более установлено, что все звенья многозвенного автопоезда повторяют траекторию, задаваемую движением головного звена. При этом не установлено «сползания»

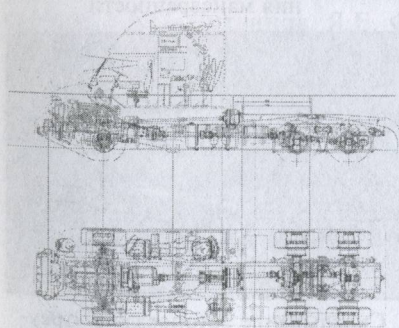


Рисунок 14 — Компоновка головного тягача

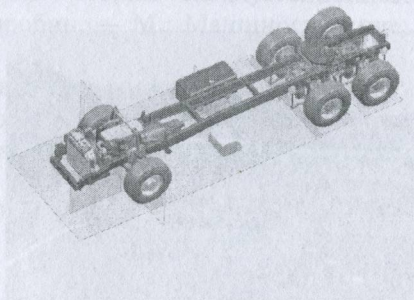
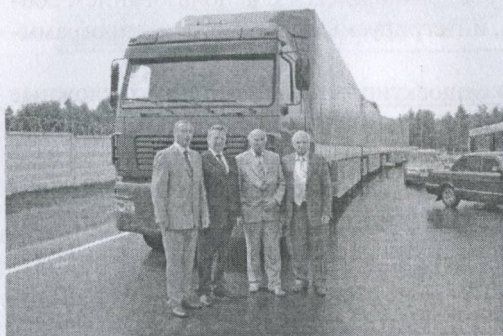
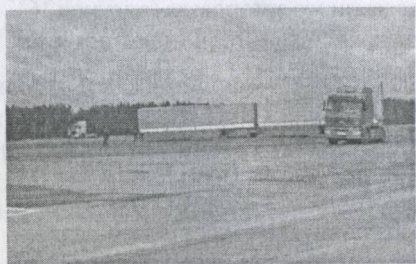


Рисунок 15 — Трехмерная компоновка узлов и агрегатов головного звена

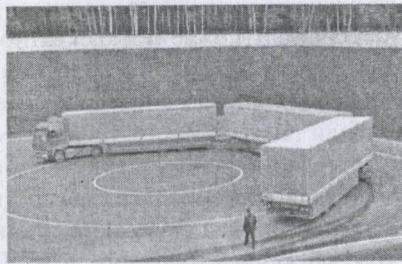


**Рисунок 16 —
Экспериментальный образец
многозвенного автопоезда**

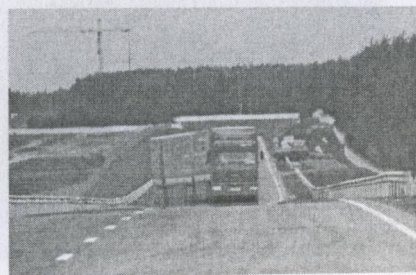
второго и третьего звеньев к центру окружности. Выполнение маневра «переставка» показало устойчивое без отрыва колес движение многозвенного автопоезда в снаряженном состоянии на различных скоростях вплоть до максимально заданной 85 км/ч. Устойчивое движение в снаряженном состоянии автопоезд показал и при движении одновремен-



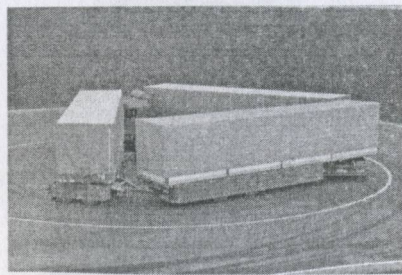
Испытание «поворот $R_p=35$ м»



**Экспериментальные исследования
маневренности**



Испытание «переставка»



Складывание автопоезда в «треугольник»

Рисунок 17 — Экспериментальные исследования многозвенного автопоезда

но по двум окружностям одинаковых радиусов диаметром 40 м. Экспериментальные исследования также подтвердили возможность образования многозвенным автопоездом фигур типа «треугольник».

Таким образом, для создания и разработки перспективной наукоемкой автотракторной техники необходимо изменить традиционные подходы к проектированию. Схематизация процесса проектирования машин и выделение отдельных наукоемких этапов позволили предложить структуру системы виртуального проектирования автотракторной техники в виде алгоритма последовательно-параллельных действий. Начиная со стадии концептуального проектирования, требования по совместному использованию данных проектирования для всех участников проекта должны поддерживаться соответствующей информационной инфраструктурой. Интеллектуальный интерфейс между инженерами, расчетчиками, дизайнерами, испытателями и другими специалистами должен обеспечивать быструю и корректную передачу данных.

Использование данной наукоемкой среды позволило предложить концепцию, выполнить разработку стилевых решений, проведение комплекса виртуальных испытаний и создание в кратчайшие сроки экспериментального образца перспективного транспортного средства — многозвенного автопоезда для трансконтинентальных перевозок грузов.

Список литературы:

1. Preliminary optimization of general-arrangement decisions of multilink trucks for virtual design / M. Vysotski [et al.] // FISITA-2008: World Automotive Congress, 14—19 sept. 2008, Munich, Germany.
2. Литвинов, А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
3. Динамика криволинейного движения многозвенного грузового магистрального автопоезда: компьютерное и физическое моделирование / М.С. Высоцкий // Механика машин, механизмов и материалов. — Минск: 2009. — № 3. — С. 5—8.
4. Masato, A. Vehicle Handling Dynamics / A. Masato // Theory and Application. — Elsevier, 2009.