

Развитие НТИ: проект «Комплекс виртуального проектирования силовых каркасов транспортных средств»



М. В. Алешин,
директор проектного офиса,
Инжиниринговый центр «Центр
компьютерного инжиниринга»
СПб политехнического университета
Петра Великого
aleshin@compmechlab.com



А. Н. Леонтьев,
ведущий инженер
ООО «Центр технологического консалтинга»,
Санкт-Петербург
leontev@compmechlab.ru

В статье описываются этапы разработки инновационного проекта — комплекса виртуального проектирования (КВП) силового каркаса транспортных средств методом цифрового проектирования с использованием топологической и параметрической оптимизации. Основные результаты первого этапа НИОКР — формирование матрицы целей и ограничений верхнего уровня, а на ее основе — разработка концептуального силового каркаса кузова тестового автомобиля. Особым результатом стала подготовка шаблонов и методик, позволяющих сократить время на проектирование путем автоматизации процессов, а также минимизировать вероятность появления ошибок за счет снижения влияния человеческого фактора. Услуги, оказываемые разработчиком с использованием данного комплекса, позволяют компаниям-автопроизводителям выводить на рынок клиентоориентированную и глобально конкурентоспособную высокотехнологичную продукцию. Для отечественных компаний это даст возможность реализовать стратегическую программу по импортозамещению.

Ключевые слова: силовой каркас, топологическая/параметрическая оптимизация, конкурентоспособность, импортозамещение.

Проjekt «Комплекс виртуального проектирования силовых каркасов транспортных средств» был подан на грант Фонда содействия инновациям («Развитие НТИ», заявка №НТИ-34813 — проект №35917) ООО «Центр технологического консалтинга» (ЦТК) в качестве инициативной разработки. Целью этой НИОКР является разработка инструмента, который позволит проектировать автомобильные кузова мирового уровня в кратчайшие сроки.

Появление подобной проблемы-вызова обусловлено характером современных глобальных высокотехнологичных рынков и автомобильного рынка, в частности. В настоящее время проектирование нового автомобиля в России занимает в среднем 3 года. При этом на проектирование кузова автомобиля требуется порядка 20 месяцев, в то время как, например, в Японии — на фирме Toyota — на проектирование нового автомобиля уходит не более 6 месяцев, и из них примерно 4 месяца — на проектирование кузова.

Ввиду насущной необходимости сокращения подобного разрыва для повышения конкурентоспособ-

ности отечественных производителей на глобальных рынках были сформулированы принципиальные цели проекта:

- сокращение сроков разработки силовых каркасов транспортных средств;
 - снижение числа натурных испытаний при проектировании;
 - автоматизация процесса разработки;
 - отработка технологии по созданию цифровых фабрик в автомобилестроении.
- Соответственно, задачами проекта стали:
- разработка комплекса виртуального проектирования и многокритериальной оптимизации силовых каркасов транспортных средств с учетом требований по стандартам, сертификации и рейтинговым испытаниям;
 - разработка шаблонов моделей виртуальных испытательных стендов для оценки параметров в соответствии с матрицей целей и ограничений;
 - разработка методик создания, отладки и использования шаблонов моделей.

Проект был поддержан Фондом содействия инновациям, размер гранта составил 20 млн рублей, при этом объем самофинансирования проекта равен 6 млн рублей. Срок реализации проекта — 24 месяца.

Содержание проекта

Объект исследования и разработки — комплекс виртуального проектирования силового каркаса транспортных средств, состоящий из набора шаблонов и методик соответствующих процессов проектирования.

Форма кузова автомобиля в современном контексте — отражение существующего уровня развития техники, организации и уровня жизни, а также представлений о функции автомобиля. С течением времени эта форма существенно изменялась и развивалась с учетом изменения вкуса потребителей и назначения автомобиля. Обеспечению достаточной прочности и жесткости кузова как наиболее важному элементу автомобиля придается особое значение как при проектировании, так и при его изготовлении. Стоимость кузова современного легкового автомобиля составляет 45-50% от общей стоимости.

Конструкция кузова достаточно сложна как с точки зрения конструкторской разработки, так и с точки зрения его производства. Так, при относительно малом объеме подкапотного пространства в нем должны размещаться несколько узлов и агрегатов: двигатель с коробкой передач, передний мост с рулевым и тормозным управлением, подвеска передних колес и другие детали. Все они должны быть размещены так, чтобы обеспечить свободный доступ к каждому из них для возможности снятия или установки при сборке и ремонте автомобиля. Крышка капота, переднее оперение должны при этом обеспечить необходимый дизайн передней части автомобиля, а каркас, который поддерживает все перечисленные детали и узлы, должен обеспечивать необходимую прочность и жесткость. Кроме того, вся конструкция передней части автомобиля должна принять на себя основную долю энергии удара при столкновении автомобиля с препятствием в условиях ДТП.

Аналогом подхода к проектированию, примененного в данном проекте, в России является классический метод, при котором расположение силовых путей, толщины деталей, расположение усилителей и т. д. определяется на основе многолетнего опыта и интуиции главного инженера. Как следствие, конструкция кузова при таком проектировании далека от оптимального с точки зрения жесткости, массы, собственных частот и т. д. За рубежом существуют аналоги данного подхода, близкие по содержанию, однако имеющие меньшую степень автоматизации входящих в него процессов. Так, немецкая фирма EDAG, проектирующая автомобильные кузова для автомобильного концерна BMW, использует аналогичную систему проектирования, что позволяет фирме BMW производить автомобильные кузова мирового уровня.

Цель первого этапа НИОКР «Комплекс виртуального проектирования силовых каркасов транспортных средств» — разработка шаблона и методики формирования матрицы целей и ограничений верхнего

уровня, разработка шаблонов и методик процессов проектирования концептуальной модели силового каркаса кузова транспортного средства, а также проектирование концептуального силового каркаса кузова тестового автомобиля.

Проектирование силового каркаса тестового автомобиля в рамках проекта произведено с использованием топологической оптимизации основных силовых путей каркаса кузова, параметрической оптимизации поперечных сечений силовых путей кузова, а также параметрической оптимизации толщин деталей кузова.

Для реализации поставленных целей в работе использованы современные подходы компьютерного моделирования и проектирования, основанные на передовых методах конечно-элементного анализа, а также топологической, параметрической и мультидисциплинарной оптимизации. Комплекс виртуального проектирования будет отработан при проектировании силового каркаса тестового автомобиля.

Главным разработчиком проекта является ООО «Центр технологического консалтинга» и особая роль в данной НИОКР принадлежит соисполнителю — Санкт-Петербургскому политехническому университету Петра Великого (СПбПУ). Всего в разработке принимает участие более 50 специалистов, в числе которых — лучшие инженеры Инжинирингового центра СПбПУ — национального лидера в сфере разработок оригинальных технологий, конструкций, оборудования и продуктов на основе передовых производственных технологий (в первую очередь, цифрового проектирования и моделирования, компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга, компьютерных технологий оптимизации и аддитивных технологий).

Ход первого этапа проекта, инструменты и методология

Вновь проектируемый автомобиль, чтобы иметь возможность быть конкурентоспособным на мировом рынке, должен соответствовать не только современным тенденциям в области внешнего и внутреннего экстерьера, но и современным запросам и пожеланиям целевой аудитории. По этой причине процессу проектирования автомобиля предшествует этап разработки перечня целевых показателей, которым данный автомобиль должен соответствовать, на основе анализа пожеланий и мнений потребителей, а также по итогам исследования автомобилей-аналогов.

В качестве конечного объекта разработки взят электромобиль. Для упорядочивания работы по исследованию силовых каркасов аналогов, а также для определения требований к результатам данного исследования и способам их достижения была разработана методика проведения исследования силовых каркасов.

Данная методика определяет критерии выбора автомобилей-аналогов и порядок анализа основных функциональных характеристик автомобильных силовых каркасов и кузовов в целом, описывает исследование силовых каркасов аналогов по информации, располагаемой в свободном доступе (в сети Интернет,



Рис. 1. Схема V-образного процесса проектирования

книгах, журналах и т. д.) и не распространяется на исследование силовых каркасов аналогов путем проведения натурных экспериментов.

Разработчики проводили исследования силовых каркасов автомобилей аналогов в несколько этапов, учитывая конфигурацию, основные функциональные характеристики проектируемой модели, и далее по составленной сравнительной таблице результатов предыдущих этапов проводится детальный сравнительный анализ параметров силовых каркасов автомобилей-аналогов. Затем осуществляется анализ реалистичности и выполнимости поставленных ранее целей для проектируемого автомобиля и, при необходимости, их корректировка.

Для исследования выбирались автомобили, соответствующие текущим требованиям рынка и современным тенденциям. Для более полной оценки во внимание принимались автомобили разных типов и ценовых категорий: электромобили, спорткары, автомобили низкой, средней и высокой ценовой категории, а также «автомобили будущего».

На основе проведенного исследования силовых каркасов аналогов был разработан полный перечень целевых показателей, которым проектируемый автомобиль должен соответствовать. Такой перечень называется матрицей целей и ограничений и включает в себя требования по различным потребительским свойствам. Каскадирование целевых показателей позволяет

выводить на рынок конкурентоспособную продукцию, поскольку является неотъемлемой и важной частью так называемого V-образного процесса проектирования. Данный процесс получил широкое применение во многих автомобильных компаниях — как российских, так и зарубежных (Lada, Renault, Nissan, BMW и т. д.), поскольку является клиентоориентированным и позволяет выводить на рынок продукцию, отвечающую текущим запросам потребителей. Процесс каскадирования целевых показателей заключается в декомпозиции пожеланий потребителя на требования, предъявляемые к конкретным узлам и агрегатам автомобиля (рис. 1).

Для обеспечения стандартизации процесса формирования перечня целевых показателей на проектирование был разработан шаблон формирования матрицы целей и ограничений и подготовлена методика формирования матрицы целей и ограничений верхнего уровня, которая описывает процесс каскадирования целевых значений и ограничений верхнего уровня для пассивной безопасности, виброакустического комфорта, технологичности, прочности и массы.

В результате бенчмаркинга были выделены шесть автомобилей, представленных на рынке (условно обозначенные в табл. 1 как X1, X2 и т. д.), а также заданы желаемые показатели конкурентоспособного прототипа автомобиля (ПА), для которого будет разработан силовой каркас.

Таблица 1

Бенчмаркинг основных параметров автомобиля

Параметры	ПА	X1	X2	X3	X4	X5	X6
Длина, мм	3800-4000	4976	4360	4435	4041	4794	4638
Ширина, мм	1740-1900	1963	1934	1930	1764	1892	1939
Высота, мм	1360	1435	1423	1252	1346	1322	1262
Колесная база, мм	2500	2959	2660	2650	2429	2752	2680
Колея, мм	1526	1662	1474	1638	1505	1560	1653
Клиренс, мм	130	144	147	120	130	99	125
Масса, кг	1100	2108	1375	1560	1395	1753	1620
Шины	225/40R18	245/45 R19	205/55R16	225/55R17	225/45R17	245/40R19	265/35R19

Таблица 2

Основными параметрами матрицы целей для проектируемого автомобиля стали следующие:

- соответствие современным европейским нормам по пассивной безопасности: безопасность взрослого пассажира по независимому рейтингу Еуро NCAP должна быть не менее 80%;
- виброакустический комфорт: внутренний шум в салоне автомобиля в районе уха водителя и пассажира должен быть не более 70 дБ;
- технологичность: конструкция кузова и технология изготовления должны обеспечивать отсутствие дефектов при штамповке, максимальный коэффициент использования материала для штампованных деталей, отсутствие прогаров и неспаров при сварке;
- прочность силового каркаса (для автомобиля в сборе с навесными агрегатами): крутильная жесткость должна быть не менее 50000 Н·мм/град, изгибная жесткость должна быть не менее 40 000 Н/мм;
- масса автомобиля в сборе с навесными агрегатами должна быть не более 1100 кг.

Отправной точкой конструирования стала разработка методики построения математической и конечноэлементной (КЭ) модели доступного объема для построения силового каркаса. В качестве исходных данных была выбрана стилиевая поверхность, необходимая для дальнейшего создания математической модели доступного объема.

Для того чтобы проектируемый кузов соответствовал требованиям по управляемости, безопасности, долговечности и прочности, были введены расчетные случаи с соответствующими целями и ограничениями (табл. 2).

Был разработан шаблон расчетной модели для проведения топологической оптимизации на базе тестового автомобиля. В целях уменьшения времени создания шаблона и исключения влияния человеческого фактора было разработано программное обеспечение для автоматического формирования шаблона. В качестве исходных данных используется КЭ-модель доступного объема кузова тестового автомобиля с заложенным стилем и компоновкой.

Разработанная программа позволяет ускорить формирование шаблона топологической оптимизации, исключить использование сторонних программ при формировании шаблона. Уровень инженерной подготовки для составления шаблона может быть гораздо ниже, чем при составлении шаблона в сложных инженерных программах.

С использованием подготовленного шаблона по имеющимся данным — КЭ доступного объема и граничным условиям, а также целевым показателям — была проведена топологическая оптимизация в целях определения оптимального расположения силовых путей, которые в дальнейшем будут интерпретированы в детали силового каркаса. На основе проделанной работы была написана методика, в которой подробно описаны шаги от определения целей и ограничений, расчетных случаев и граничных условий до конечного результата оптимизации с последующей обработкой полученных результатов.

Параметр	Цель
Крутильная жесткость	50000 Н·мм/град
Изгибная жесткость	40000 Н/мм
Крутильная частота	45 Гц
Изгибная частота	48 Гц
Разница между крутильной и изгибной частотой	3 Гц
Масса	250 кг

Следующим шагом НИОКР стала разработка шаблона и методики построения балочной модели на базе результатов топологической оптимизации. Результаты топологической оптимизации могут быть применены различными способами. Наиболее быстрым и эффективным способом является построение в два этапа: по путям нагружения строятся кривые геометрии, которые позволяют гладко описывать геометрию будущих балок; затем кривые дискретно разбиваются на конечное число балочных элементов. Последующую работу необходимо производить со свойствами балок, формируя конструкцию из балок с разными параметрами. Элементы, принадлежащие одному логическому компоненту конструкции, подразумевающему одинаковые характеристики сечений внутри себя, объединяются одним свойством. Важно учитывать компоновку примыкающих к кузову компонентов и дополнять модель необходимыми соединениями. В методике была описана последовательность действий для реализации задач по построению балочной модели на базе результатов топологической оптимизации.

Также в рамках проекта был проведен анализ стандартных сечений балочных элементов конструкции кузова (лонжеронов, стоек, поперечных балок и т. п.) и определен универсальный вид сечения, который описывает большинство используемых в автомобилестроении типов сечений.

Среди стандартных программ, применяемых инженерами, нет таких, которые используют «универсальное» сечение при моделировании балочных элементов. Использование стороннего ПО в процессе оптимизации требует дополнительных трудозатрат на программирование ПО и машинные мощности для его работы, так как сложные программы более требовательны к компьютерному оснащению. Ввиду сказанного необходимо было либо сформировать базу данных, содержащую параметры всех возможных модификаций универсального сечения, либо разработать ПО, способное вычислить необходимые параметры. Для достижения целей работы была разработана программа, которая способна определить параметры универсального сечения (рис. 2).

На основе полученной функции программы (мультивариантный расчет сечений) стало возможным применение ее в цикле расчетов параметрической оптимизации.

В целях сокращения времени разработки шаблона параметрической оптимизации и исключения влияния человеческого фактора также было разработано про-

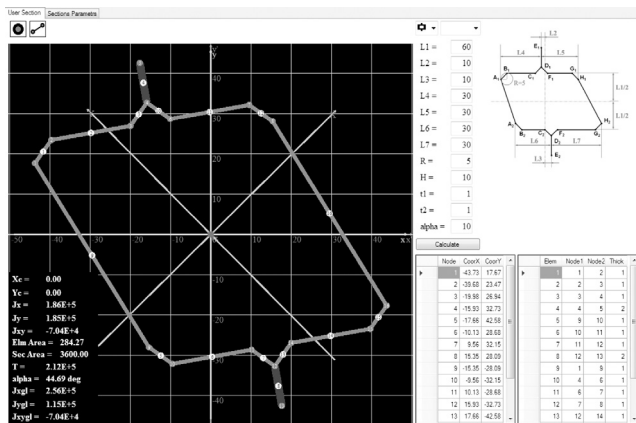


Рис. 2. Общий вид программы определения параметров универсального сечения

граммное обеспечение для автоматического формирования шаблона, не требующее от инженеров получения дополнительных специальных компетенций.

В ходе работы над проектом была проведена серия оптимизационных расчетов балочных моделей, параметризованных по геометрическим характеристикам сечений балок. Результаты наиболее эффективных расчетов легли в основу разрабатываемой концептуальной конструкции.

Проведено два типа расчетов с различными целевыми объектами: минимизация массы и минимизация податливости. В зависимости от цели получено два варианта распределения параметров балочной модели с массами 200 и 227 кг.

Для верификации полученных результатов проведения расчетных проверок, которые подтверждают выводы оптимизации. Для дальнейшей работы принят вариант 227 кг. Последовательность действий для реализации задач по проведению параметрической оптимизации сечений балочной модели описана в методике.

Следующим этапом НИОКР стала разработка оболочечной КЭ-модели на основе полученных результатов параметрической оптимизации сечений балочной модели силового каркаса кузова проектируемого автомобиля для проведения дальнейшей оптимизации как по виброакустическим параметрам, так и по пассивной безопасности. Исследование проводилось с использованием закупленного в рамках проекта программного обеспечения SFE Concept, которое позволяет в короткие сроки «с нуля» разрабатывать CAD и КЭ-модели, вносить в них конструктивные изменения в любых объемах и проводить оптимизацию конструкции за счет полной автоматической параметризации разрабатываемой модели.

По завершении комплекса работ по переводу балочной модели в оболочечную был проведен анализ времени, затраченного на разработку модели. Определено, что основное время затрачено на построение геометрии в SFE Concept. В целях сокращения времени на построение модели в SFE Concept разработана программа автоматизированного построения геометрии силовых элементов каркаса кузова в формате скрипта SFE Concept.

Программа реализует следующие пункты разработки модели в SFE Concept: создание узловых точек,

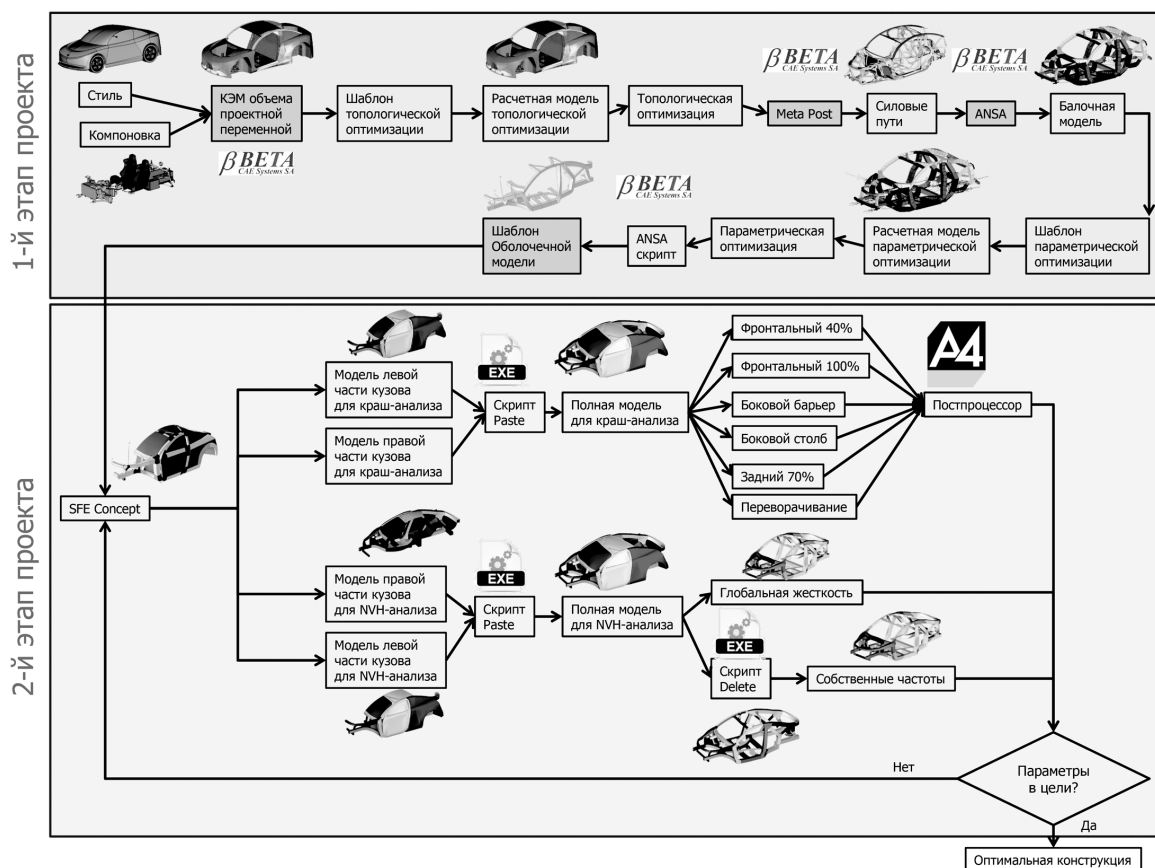


Рис. 3. Стадия разработки концептуального решения

Создаваемый продукт	Стоимость, тыс. руб.	Объем реализации, тыс. руб.					
		2018	2019	2020	2021	2022	2023
Проектирование с комплексной многокритериальной оптимизации силового каркаса транспортного средства в составе инжиниринговых услуг	6100	0	5400	8300	12100	14100	15000

соединение отфильтрованных узлов модели линиями, задание сечения построенной кривой в начальной и конечной точках, создание балочных элементов. Ввиду сложности создания Joint-элементов дальнейшее построение модели в SFE Concept проводится в ручном режиме.

Несмотря на неполный цикл автоматизации процесса, программа позволяет сократить время генерации геометрии с нескольких дней до нескольких секунд.

В результате выполненной работы был разработан метод проектирования концептуальной модели силового каркаса кузова (рис. 3). Данный метод позволяет снизить время проектирования концептуальной модели кузова за счет высокой степени автоматизации процессов, снизить риск возникновения ошибки за счет снижения влияния человеческого фактора в процессе разработки, снизить требуемый уровень квалификации инженеров, занятых в процессе проектирования.

Также в процессе проведенной работы был разработан концептуальный кузов тестового автомобиля на основе стиливой поверхности и внутренней схемы вместимости (компоновки). Разработанная модель будет являться основой для проведения мультидисциплинарной оптимизации кузова на втором этапе проекта.

Финансовые показатели и промышленные перспективы проекта

Разрабатываемый комплекс виртуального проектирования силовых каркасов транспортных средств будет отличаться высокой степенью автоматизации входящих в него процессов, что позволит в кратчайшие сроки выполнять проектировочные работы высокого уровня, снизить количество высококвалифицированных сотрудников, участвующих в проектировании, снизить риск возникновения ошибки при проектировании за счет снижения влияния человеческого фактора.

Услуги, оказываемые ООО «ЦТК» с использованием данного комплекса, позволят компаниям-автопроизводителям выводить на рынок клиентоориентированную и конкурентоспособную продукцию. Для отечественных компаний это даст возможность реализовать президентскую программу по импортозамещению. В данной разработке могут быть заинтересованы такие автопроизводители, как ОАО «АвтоВАЗ», ПАО «КамАЗ», Группа «ГАЗ». В числе зарубежных автопроизводителей — вероятных потребителей услуг можно назвать китайские организации CATARC, BYD, Cherry, BAIC и др.

Предлагаемый комплекс виртуального проектирования (КВП) является составной частью комплексной

инжиниринговой услуги по разработке проекта силового каркаса транспортного средства. При этом исполнитель действует как аутсорсер для проектных центров крупных автопроизводителей и инжиниринговых интеграторов. Таким образом, основным рынком для предлагаемого продукта является рынок аутсорсинга инженерного НИР и НИОКР (Engineering R&D) в области автомобилестроения. В перспективе рынок может быть расширен за счет применения метода в самолето- и кораблестроении.

Разрабатываемая по проекту услуга уникальна, что затрудняет финансовый прогноз рыночной реализации его результатов. Поскольку использование КВП станет для исполнителя значимым конкурентным преимуществом, распространение КВП отдельно (в форме лицензирования или продажи ПО) не предусматривается.

Производственный план и план продаж с использованием КВП (табл. 3).

Средства, полученные по гранту Фонда, будут расходоваться в дальнейшем на разработку тестового автомобиля. Это особо важная часть проекта, поскольку на основе опыта этой разработки будет создан в окончательном виде Комплекс виртуального проектирования.

The National Technology Initiative (NTI) development: «Virtual design complex of vehicle bodywork basic structure» project

M. V. Aleshin, head of project management office St. Petersburg polytechnic university Computer-aided engineering centre.

A. N. Leontiev, senior engineer, Technology consulting center.

In this article the author describes the development stages of an innovation project – the virtual design complex of vehicles power frame using a digital design with topology and parametric optimization.

The main results of the first stage of RTD (Research & Technological Development) are target matrix and upper level limitations creating. Based on this data the conceptual power frame of a pilot vehicle is designed.

The special result is the preparation of templates and techniques that reduce design time by automating processes and minimize the probability of errors by reducing the human factor.

The services provided by the developer using this complex will allow automotive companies to bring to the market customer-oriented and globally competitive high-tech products.

For domestic companies, it will provide an opportunity to implement a strategic program for import substitution.

Keywords: bodywork basic structure, topological optimization, parametric optimization, competitiveness, import substitution.