

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-138656>

Систематический обзор



Анализ перспектив совершенствования и развития конструкций подвесок легковых автомобилей

Е.Н. Мартынов¹, И.С. Поташов¹, А.И. Бокарев²¹ Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ), Москва, Российская Федерация;² Научно-образовательный центр «КАМАЗ-БАУМАН», Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост ожиданий потребителя от автопроизводителя побуждает инженеров разрабатывать и внедрять новые конструктивные, технические и электронные решения в различные системы автотранспортного средства для обеспечения стабильности потребительских свойств автомобиля на малых и больших скоростях в самых различных дорожных условиях. В направлении достижения требуемых потребительских свойств автомобиля определяющую роль играет конструкция направляющего аппарата подвески. Существует большое многообразие конструктивных и технических решений, поэтому становится актуальной задача проведения обзорного исследования для отражения тенденции развития архитектуры подвесок.

Цель исследования — определение тенденции развития передовых конструктивных и технических решений, применяемых в шасси автотранспортного средства, направленных на повышение эксплуатационных свойств автомобиля: устойчивости, управляемости, плавности хода и надёжности.

Методы. Методы статистического анализа.

Результаты. Результаты представлены в виде планомерного системного статистического исследования конструктивных и технических решений, применяемых в шасси автотранспортного средства, направленных на повышение эксплуатационных свойств автомобиля.

Практическая значимость. Полученный результат может быть применим для правильной постановки целей при разработке легковых автомобилей.

Ключевые слова: шасси автомобиля; потребительские свойства автомобиля; устойчивость; управляемость; плавность хода; тенденции развития; задняя подруливающая ось.

Как цитировать:

Мартынов Е.Н., Поташов И.С., Бокарев А.И. Анализ перспектив совершенствования и развития конструкций подвесок легковых автомобилей // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 3. С. 273–286. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-138656>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-138656>

Systematic Review

Analysis of prospects for improvement and development of vehicle suspension structures

Evgeniy N. Martynov¹, Ilya S. Potashov¹, Alexander I. Bokarev²

¹ Central Scientific and Research Institute of Automobiles and Automotive Engines NAMI, Moscow, Russian Federation;

² Scientific and Educational Center KAMAZ-BAUMAN, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The growth of consumer expectations from an automaker encourages engineers to develop and implement new design, technical and electronic solutions in various vehicle systems to ensure the stability of the vehicle's consumer attributes at low and high speeds in a variety of road conditions. In the direction of achieving the required consumer attributes of a vehicle, the design of the suspension links plays a decisive role. There is a wide variety of design and technical solutions, so the task of conducting a review study to reflect the trend in suspension architecture development becomes relevant.

AIMS: Determination of the trend in the development of design and technical solutions used in the vehicle chassis, aimed to improve the operational attributes of a vehicle such as stability, handling, ride smoothness and reliability.

METHODS: Methods of statistical analysis.

RESULTS: The results are presented in the form of a systematic statistical study of design and technical solutions used in the vehicle chassis, aimed to improve the operational attributes of a vehicle.

CONCLUSIONS: The result obtained can be applied for the correct goal setting in the development of passenger cars.

Keywords: vehicle chassis; consumer attributes of a vehicle, stability; handling, ride smoothness; development trends; rear steering axle.

To cite this article:

Martynov EN, Potashov IS, Bokarev AI. Analysis of prospects for improvement and development of vehicle suspension structures. *Izvestiya MG TU «MAMI»*. 2023;17(3):273–286. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-138656>

Received: 26.01.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 20.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция роста ожиданий потребителя от автопроизводителя, а также снижение уровня шума работы силовых агрегатов автомобиля за счёт использования новых источников энергии приводит к усложнению требований к автотранспортным средствам, что побуждает инженеров разрабатывать и внедрять новые конструктивные, технические и электронные решения в различные системы автотранспортного средства для обеспечения стабильности потребительских свойств автомобиля на малых и больших скоростях в самых различных дорожных условиях. Наиболее важными и приоритетными эксплуатационными свойствами автомобиля являются устойчивость, управляемость, плавность хода и надёжность, что в первую очередь определяется сбалансированностью оптимальных технических решений в шасси автотранспортного средства. Компромисс обеспечения оптимальных эксплуатационных свойств устойчивости и управляемости автомобиля в совокупности с превосходными свойствами плавности хода является актуальной задачей для автопроизводителей на фоне ярко выраженной конкуренции. Одной из наиболее важных и актуальных первичных инженерных задач в этом направлении является совершенствование конструкции направляющего аппарата подвески. Кинематическая схема подвески определяет траекторию перемещения колеса, а также оптимальность распределения передаваемых усилий от неподрессоренных частей автомобиля, что напрямую влияет на эксплуатационные свойства автомобиля и долговечность несущих элементов шасси. В настоящее время существует большое многообразие конструктивных, технических и электронных решений, которые определяют достижение оптимальных эксплуатационных свойств автомобиля и способствуют ему.

Целью данной работы является определение тенденции развития передовых конструктивных и технических решений, применяемых в шасси автотранспортного средства, направленных на повышение эксплуатационных свойств автомобиля: устойчивости, управляемости, плавности хода и надёжности. Для реализации цели исследования авторами статьи ставится следующий план исследования, отражаемый в данной работе:

- отобразить особенности классического процесса проектирования шасси автомобиля;
- определить статистику использования типовых кинематических схем на автомобилях разных классов;
- обзор конструктивных и технических особенностей наиболее перспективных и совершенных кинематических схем подвесок, а также отразить необычные решения.

Данная статья позволяет определить вектор научного знания и развития при разработке различного рода моделей и методик по проектированию направляющего аппарата подвески, которые могут иметь научную новизну. Приведённое в статье исследование выполняется в рамках большой работы по созданию методики проектирования и оптимизации подвесок, практическая значимость которой заключается в сокращении времени и ресурсов на выбор концепции разрабатываемого шасси в самом начале разработки.

ОСОБЕННОСТИ КЛАССИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШАССИ АВТОМОБИЛЯ

В соответствии с отечественными [1–8] и зарубежными [9–11] источниками существует большое многообразие требований, предъявляемых к автомобилю в целом, обеспечение которых фокусируется в том числе на соблюдении правил и целей при проектировании шасси автомобиля. Совокупно в источниках [3–11] упоминаются следующие требования: влияние на торможение, управляемость, устойчивость, предсказуемость, надёжность, массовая характеристика, стоимость, безопасность, комфорт, грузоподъёмность, унификация, ремонтпригодность, простота, компактность, адаптивность, прочность, долговечность, энергоёмкость, удобство управления, технологичность, проходимость, перерабатываемость, динамичность.

Из анализа списка требований, становится ясно, что градация требований является неочевидной, что вносит неясность в вопросе их эффективного учёта и соблюдения. В данном разделе статьи авторы не предлагают рекомендации по градации требований, а поясняют особенности их учёта при проектировании шасси автотранспортного средства автопроизводителями, поскольку в литературе данный вопрос освещён неочевидно. В настоящее время, при проектировании автомобиля, а в частности шасси автомобиля, автопроизводители пользуются внутренними нормативными документами и стандартами, определяющими процесс проектирования, где данные требования группируются и нормируются. На базе литературного источника [9] классический процесс проектирования шасси автомобиля можно представить в виде V-образной диаграммы (см. рис. 1). На рис. 1 отражены две основные ветви: ветвь проектирования, которая «развёртывает» требования верхнего уровня (голос потребителя) до требований нижнего уровня (свойства компонентов), и ветвь валидации, которая характеризует процесс удовлетворённости поставленных требований от нижнего уровня (подтверждение свойств компонентов) до верхнего уровня (удовлетворённость потребителя).

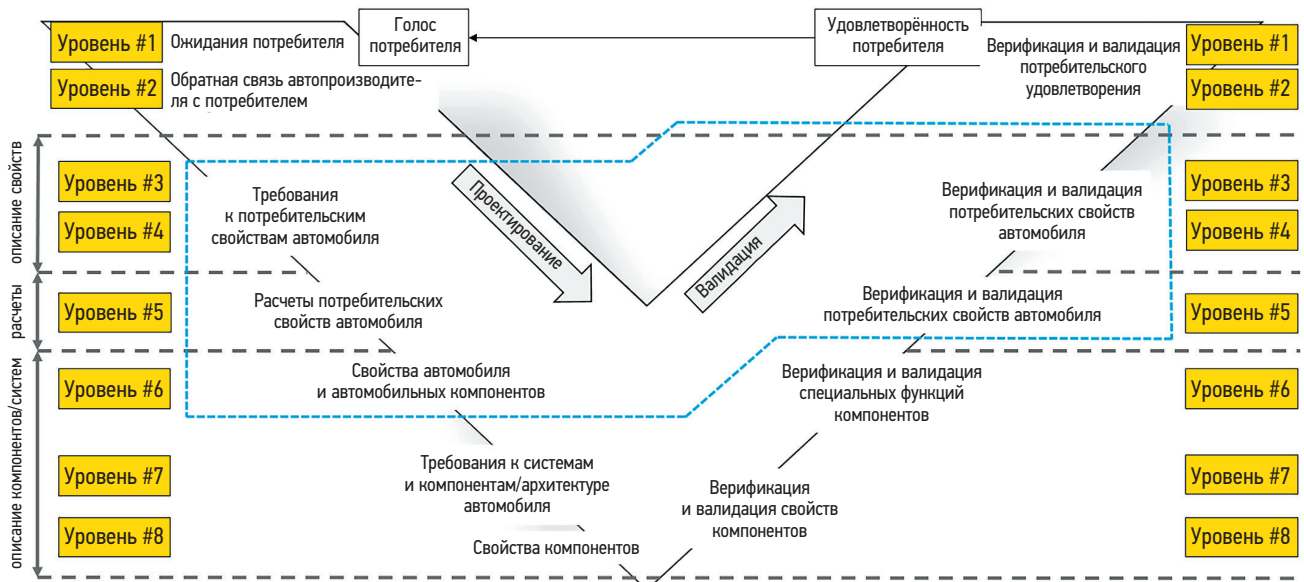


Рис. 1. V-образная развёртка классического процесса проектирования шасси автомобиля.

Fig. 1. A V-shaped diagram of conventional process of vehicle chassis development.

Описание уровней можно представить следующим образом.

Уровень 1 — это ожидания потребителя (например, вождение, внедорожные возможности, информация и коммуникация, качество, надёжность и другое), которые выражает потребитель. Уровень достижения характеризуется бальной шкалой (субъективная оценка).

Уровень 2 — это техническое описание ожиданий потребителя и классификация их на верхнем уровне (например, к категории вождения относится торможение, стабильность прямолинейного движения, поведение в повороте и другое). Уровень достижения характеризуется бальной шкалой (субъективная оценка).

Уровни 3 и 4 — это «развёртка» требований уровня 2 на более детальную классификацию (например, свойство поведения автомобиля в повороте содержит в себе такие показатели, как управляемость в повороте, чувствительность рулевого управления и другое). Уровень достижимости данных характеризуется бальной шкалой (субъективная оценка).

Уровни 5 и 6 — это объективные показатели поведения автомобиля и модулей подвесок (например, управляемость в повороте характеризуется градиентом недостаточной поворачиваемости, который имеет размерность $[\text{°}/\text{g}]$ и другие показатели).

Уровни 7 и 8 — это объективные показатели свойств отдельных систем и компонентов (например, конструкция сайлентблоков и опор подвески, а также их характеристики, которые совокупно влияют на комфорт, управляемость, устойчивость, плавность хода и надёжность автомобиля).

Следует отметить, что уровни 1 и 2 характеризуют автомобиль и все его системы в совокупности,

а дальнейшая детализация определяется группой описываемых потребительских свойств (например, отдельные книги целей формируются на ходовые свойства автомобиля, отдельные на пассивную безопасность и другое). В данной статье делается акцент именно на группе ходовых свойств автомобиля, поскольку данные свойства определяют конструктив и технические особенности шасси автомобиля. Немаловажную роль при проектировании шасси автомобиля играет процесс проведения расчётов, результаты которых наполняют уровни 5 и 6. Как правило, для учёта перечня требований и их классификации по уровням автопроизводители используют книгу целей проекта, где отражается цель, результат расчёта и результат валидации. Наполнение книги целей у каждого автопроизводителя может кардинально отличаться на уровнях 5–8, поскольку данный перечень зависит от качества «зеркала перехода» между уровнями требований и показателями (корреляция между параметрами уровней должна быть очевидной), характеризующими их, а также — от типа разрабатываемого автотранспортного средства. Целевые показатели, как правило, назначаются на базе анализа автомобилей-конкурентов и автомобилей-предшественников. Для характеристики уровней 1–4 проводятся программы субъективных испытаний автомобилей-конкурентов и автомобилей-предшественников, а для характеристики уровней 5–8 проводятся стендовые испытания компонентов и систем. Таким образом, требования верхнего уровня (уровни 1–4) предусматривают перечень отдельных показателей, частично характеризующих ту или иную категорию эксплуатационных свойств или требований. Кроме того, изменение одних показателей может коррелировать с изменением

других показателей, что вынуждает автопроизводителей искать оптимальные компромиссные показатели, удовлетворяющие целям проекта. Дополнительно, целевые показатели обязательно учитывают требования и нормируемые значения, регламентированные стандартами, директивами и международными правилами, например, правилами Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН. Как правило, для поддержания конкурентоспособности разрабатываемого автомобиля назначаемые целевые показатели часто оказываются более трудно достижимыми, чем в нормативных документах.

Поскольку целью данной работы является определение тенденции развития передовых конструктивных и технических решений, направленных на повышение эксплуатационных свойств автомобиля: устойчивости, управляемости, плавности хода и надёжности, то следует выделить основные показатели, относящихся к уровням 7 и 8, влияющим на указанные свойства. Следующий перечень различных показателей, параметров и компонентов совокупно влияет на каждую из перечисленных категорий эксплуатационных свойств автомобиля:

- тип кинематической схемы подвесок автомобиля (обычно кинематическую схему подвески проектируют из соображений обеспечения оптимальных кинематических и эластокинематических показателей, а также оптимального распределения усилий);
- собственные частоты поддресоренных и неподдресоренных частей автомобиля;
- упругие связи подвесок автомобиля, к ним относятся:
 - а) характеристики пружины/рессоры/пневмоэлементы автомобиля;
 - б) характеристики сайлентблоков подвесок автомобиля;
 - в) характеристики опор подвесок и силового агрегата автомобиля;
 - г) характеристики шарниров подвесок автомобиля;
 - д) элементы подвески характерных кинематических схем, которые реализуют необходимую кинематику подвески за счёт своей деформации (например, тип независимой задней подвески с деформируемым продольным рычагом);
 - демпфирующие связи подвесок автомобиля, к ним относятся:
 - а) амортизаторы подвесок автомобиля;
 - б) характеристики сайлентблоков подвесок автомобиля;
 - в) характеристики опор подвесок и силового агрегата автомобиля;
 - соблюдение оптимального разделения собственных частотных характеристик отдельных компонентов и систем автомобиля на всех режимах (под режимом понимается форма колебания, например, продольно-угловые

колебания автомобиля и т.д.) работы автомобиля (данные условия проверяются посредством разработки модальной карты автомобиля и анализа форм колебаний);

- согласованность упругих и демпфирующих характеристик подвесок автомобиля;
- наличие механизмов регулировки углов установки колёс;
- величины допусков, которые приводят к рассогласованности кинематических и эластокинематических показателей подвески;
- наличие систем активного управления усилием на рулевом колесе или систем, изменяющих параметры управляемости автомобиля.

Приведённый перечень характеризует эффективность работы шасси автомобиля как электромеханической системы. Первичным при проектировании шасси автомобиля является выбор типа кинематической схемы подвески, поскольку тип направляющего аппарата и его кинематическая схема определяют траекторию перемещения колеса, изменение пятна контакта с опорной поверхностью, а также оптимальность распределения передаваемых усилий от неподрессоренных частей автомобиля, что совокупно напрямую влияет на устойчивость, управляемость, плавность хода и надёжность разрабатываемого автомобиля. Таким образом, следующим этапом обзорного исследования требуется определить статистику использования типовых кинематических схем на автомобилях разных классов.

СТАТИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИПОВЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ПОДВЕСОК НА АВТОМОБИЛЯХ РАЗНЫХ КЛАССОВ

В погоне за наиболее эффективными совокупными показателями эксплуатационных свойств автомобиля инженеры пытаются разрабатывать новые схемы подвесок, как правило, разбивая их на отдельные части и дорабатывая каждый элемент более детально, оптимизируя его свойства как отдельно, так и при его работе в составе подвески и автомобиля. В табл. 1 представлена обобщённая статистика использования типовых кинематических схем подвесок на автомобилях разных классов в соответствии с общепринятой европейской классификацией легковых автомобилей. Из табл. 1 [12] можно заключить, что чем выше класс автомобиля, тем более сложные типы кинематических схем подвесок применяются, при этом с течением времени данная тенденция также соблюдается, поскольку от вновь разрабатываемых автомобилей потребитель ожидает больше, чем от автомобилей предшественников на фоне конкуренции. Наиболее перспективными на сегодняшний день являются подвески многорычажного типа, которые

Таблица 1. Статистика использования типовых кинематических схем подвесок на автомобилях разных классов**Table 1.** Statistics of using typical kinematic layouts of suspension in vehicle of different classes

Класс автомобиля	Тип подвески					
	Передняя	Задняя	Передняя	Задняя	Передняя	Задняя
А-класс Honda civic (1972–н.в.), Ford Fiesta (1976–н.в.), Fiat 500 (1957–1975, пауза 2007– н.в.), Volkswagen Käfer (Жук) (1946–2003) и др.	Независимая (преимущественно Макферсон и торсионные с продольными или поперечными рычагами)	Независимая (преимущественно на косых рычагах) или зависимая	Независимая (преимущественно Макферсон и торсионные с продольными или поперечными рычагами)	Независимая (на косых рычагах и многорычажная) или зависимая	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно многорычажная) или полузависимая (преимущественно торсионная балка)
В-класс Volkswagen Polo (1975–н.в.), Renault Logan (2004–н.в.), Kia Rio (1999–н.в.), Opel Corsa (1982–н.в.), AMC Gremlin (1970–1978), SEAT Ibiza (1984–н.в.), Renault Clio (1990–н.в.)	Независимая (преимущественно Макферсон и на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно многорычажная) или зависимая (преимущественно торсионная балка)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно торсионная балка)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно торсионная балка)
С-класс Ford Focus (1998–н.в.), Mazda 3 (2003–н.в.), Toyota Corolla (1966–н.в.), Volkswagen Golf (1974–н.в.), Hyundai Elantra (1990–н.в.), Skoda Octavia (1996–н.в.), Volvo S40 (1995–2013)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Зависимая (преимущественно торсионная балка и ведущий мост)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно многорычажная) или зависимая (преимущественно торсионная балка и ведущий мост)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно Макферсон) или полузависимая (преимущественно торсионная балка)
Д-класс Nissan Primera (1990–2007), Toyota Camry (1982–н.в.), Peugeot 406 (1995–2004), Mazda 6 (2002–н.в.), Toyota Avenis (1997–2018), Ford Mondeo (1993–н.в.), Volkswagen Passat (1973–н.в.)	Независимая (преимущественно Макферсон или многорычажная)	Независимая (преимущественно многорычажная)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно Макферсон или многорычажная) или зависимая (преимущественно торсионная балка)	Независимая (преимущественно Макферсон)	Независимая (преимущественно многорычажная или на двойных поперечных рычагах)
Е-класс Mercedes-Benz (1993–н.в.), BMW 5 (1972–н.в.), Lincoln Continental (1939–н.в.), Chrysler 300C (2004–н.в.), Honda Legend (1984–н.в.), Hyundai Sonata (1985–н.в.)	Независимая (преимущественно Макферсон или на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно многорычажная)	Независимая (преимущественно Макферсон или многорычажная)	Независимая (преимущественно многорычажная)	Независимая (преимущественно Макферсон, многорычажная или на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно многорычажная)
Ф-класс Mercedes-Benz (1954–н.в.), Jaguar XJ (1968–2019), Rolls-Royce Phantom (1925–н.в.), BMW 7 Series (1977–н.в.), Audi A8 (1994–н.в.), Toyota Century (1967–н.в.), Bentley Mulsanne (2010–н.в.)	Независимая (преимущественно Макферсон или на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно на косых рычагах) или зависимая	Независимая (преимущественно многорычажная или на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно многорычажная)	Независимая (преимущественно многорычажная или на двойных поперечных рычагах)	Независимая (преимущественно многорычажная)
Класс автомобиля	1980-е годы		2000-е годы		2022-й год	
	Время					

совокупно аккумулируют самые передовые технические и конструктивные решения, в особенности на автомобилях высших классов.

В табл. 2 приводится обобщающая матрица оценок различных типов кинематических схем подвесок по основным критериям и показателям, характеризующим эффективность схемы. Подобного рода обобщённые таблицы представляют особую ценность для автопроизводителей, позволяя более эффективно подходить к вопросу выбора кинематических схем подвесок.

Совокупно из представленных таблиц 1 и 2 субъективно прослеживается влияние класса автомобиля

на уровень, внедрённых в него технических решений и инноваций. Значимые наработки должны очевидно прослеживаться для классов автотранспортных средств *F* (с англ. *luxury cars* — автомобили класса люкс) и класса *E* (с англ. *executive cars* — автомобили представительского класса), где достижение требуемых технических характеристик является приоритетнее ценового вопроса. Таким образом, следующим разделом статьи является обзор конструктивных и технических особенностей наиболее перспективных и совершенных кинематических схем подвесок, активно применяемых в настоящее время.

Таблица 2. Матрица выбора кинематической схемы подвески [9, 13]: L — продольное расположение; Q — поперечное расположение; D — диагональное расположение; F — передняя ось; R — задняя ось; 1 — неудовлетворительно; 5 — отлично
Table 2. Matrix for choosing the suspension kinematic layout: L — longitudinal displacement; Q — transversal displacement; D — diagonal displacement; F — front axle; R — rear axle; 1 — unsatisfactorily; 5 — excellent

Графа классификации								Наименование подвески	Раздел оценки																													
									Основное					Кинематика				Управляемость			Комфортбельность				Экономика													
									Новизна подвески	Использование на ведущей оси	Использование на ведомой оси	Применение на внедорожниках	Масса компонентов	Плечо обката	Плечо скоростной стабилизации	Плечо весовой стабилизации	Угол расположения тормозного суппорта	Передающее число пружины/амортизатора	Параметры расположения колеса	Изменение кинематики при работе подвески	Эластокинематические параметры подвески	Неподдресоренная масса	Жесткость/сопротивление смещению	Параметры вибронагруженности	Продольно-угловые ускорения	Поведение при ускорении/торможении	Усилие на рулевом колесе	Неподдресоренные массы	Акустические характеристики	Несущая способность	Модульность	Компактность	Стоимость сборки	Стоимость компонентов	Стоимость производства			
Передняя	Зависимая	К кузову	1	L	-	-	-	1	1	Мост/балка	1	3	3	5	1	3	2	2	1	5	2	2	2	1	4	1	2	3	3	1	1	4	4	2	3	4	3	
			3	Q	-	1	-	1	-	1	«Макферсон»	5	5	5	3	4	4	3	3	3	5	4	5	4	5	3	3	4	3	3	5	5	3	4	4	3	5	5
	Независимая	К подрамнику	2	Q/D	-	-	-	-	1	1	«Макферсон» с виртуальной осью поворота	3	5	5	3	4	5	4	4	3	5	5	4	4	5	2	4	4	4	4	5	5	3	4	4	2	4	4
			3	Q	-	2	-	-	-	1	1	С поперечной рессорой	1	2	5	4	3	3	3	4	2	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	4	4	5	2	4	5
			4	Q/D	2	1	-	-	-	1	1	Двухрычажная	3	5	3	4	2	4	4	4	5	3	4	5	5	5	2	5	5	5	3	4	5	2	1	1	2	1
Задняя	Зависимая	К кузову	1	L	-	-	-	1	-	Рессорная	1	4	4	5	2	-	-	-	3	5	1	2	1	1	4	1	1	1	-	1	1	4	4	3	3	4	4	
			2	L/D	2	-	-	-	-	-	Пружинная	3	4	4	5	3	-	-	-	3	5	2	2	2	2	3	1	1	1	-	1	1	4	4	3	2	4	4
			3	D	2	-	-	-	1	-	«Де-дион»	1	4	2	2	2	-	-	-	3	5	2	2	3	2	3	1	1	2	-	2	2	4	3	3	2	3	3
	Полузависимая	К подрамнику	1	L	-	-	-	1	-	Балка	5	1	5	1	5	-	-	-	3	5	4	4	1	4	2	2	1	4	-	4	2	5	1	4	4	5	5	
			-	-	-	-	1	-	Скручивающаяся балка	2	1	4	1	4	-	-	-	3	5	4	3	1	3	2	2	1	3	-	3	2	4	3	3	4	4	4	4	
Независимая	К кузову	1	L	-	-	-	-	-	-	Подвеска с качающимися полуосями	2	1	3	2	3	-	-	-	3	5	1	1	1	4	2	4	1	4	-	4	1	2	4	4	4	1	3	
		Q	-	-	-	-	-	-	-	На косых рычагах	2	3	3	3	3	-	-	-	5	5	2	2	1	4	2	4	1	3	-	4	2	4	4	2	4	4		
		2	Q	-	1	-	1	-	-	-	«Макферсон»	2	3	3	2	3	-	-	-	4	5	5	4	4	5	2	3	4	3	-	5	3	3	4	4	1	5	4
	3	Q/D	2	-	-	1	-	-	-	«Макферсон» с виртуальной осью поворота	3	3	3	2	3	-	-	-	5	5	5	5	4	5	2	4	4	3	-	5	3	3	4	4	1	4	4	
	Q	1	2	-	-	-	-	-	-	Двухрычажная	4	5	3	4	3	-	-	-	5	3	4	5	5	5	2	5	5	5	-	5	2	1	1	2	1	2		
К подрамнику	3	Q/D	3	1	-	-	-	-	-	На продольных рычагах	3	4	3	3	3	-	-	-	5	4	5	5	5	5	2	5	5	5	-	4	5	2	1	2	2	1	2	
	4	L/D	3	-	1	-	-	-	-	Многорычажная с трапецевидным рычагом	2	5	1	2	1	-	-	-	5	3	4	4	4	4	3	4	4	5	-	4	4	2	1	2	1	1	1	
5	Q/D	3	-	-	-	-	-	-	-	Многорычажная с косым рычагом	4	3	3	2	3	-	-	-	4	4	4	4	5	4	3	4	5	5	-	4	4	2	1	2	1	2	2	
5	Q/D	3	-	-	-	-	-	-	-	Пятирычажная	4	5	2	1	1	-	-	-	5	3	5	5	5	5	2	5	5	5	-	5	5	2	1	1	1	2	2	

ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ И СОВЕРШЕННЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ПОДВЕСОК

Подвеска автомобиля предназначена для смягчения и гашения колебаний, передаваемых от неровностей дороги на кузов автомобиля. Благодаря подвеске колёс кузов совершает вертикальные, продольные, угловые и поперечно-угловые колебания. [14]

Наиболее перспективными и распространёнными схемами подвесок на сегодняшний день являются независимые типы подвесок — подвеска типа «Макферсон», двухрычажная подвеска и многорычажная подвеска — представленных на рис. 2.

Подвеска типа «Макферсон» (см. рис. 2, а). Применяется на более бюджетных автомобилях, так как в её конструкцию входит наименьшее количество элементов по сравнению с вышеперечисленными типами направляющего аппарата. Главная особенность данной

подвески — это закреплённая на кузове верхняя опора, являющаяся также шарниром подвески, на который приходит большое количество вибраций от дорожного полотна. Поэтому она должна быть также хорошим демпфером и фильтровать колебания в требуемом диапазоне частот, что достаточно сложно реализуется и является значительным недостатком данной конструкции с точки зрения комфорта и потребительских свойств автомобиля. Ось поворота колеса совпадает с осью амортизаторной стойки. Стойка спроектирована с необходимым смещением пружины относительно оси амортизатора, чтобы вектор силы упругости пружины был направлен в пятно контакта колеса с дорогой, что способствует снижению изламывающего момента на амортизаторе, тем не менее ресурс амортизаторной стойки при подобной конструкции всё равно достаточно ограничен. Важным преимуществом данного типа подвески является возможность оптимального разнесения точек крепления элементов направляющего аппарата к кузову, поэтому распределение усилий по элементам является сбалансированным, что позволяет проектировать локальные зоны кузова из более тонкого металла и для такого типа подвески не всегда необходим подрамник в качестве силовой структуры.

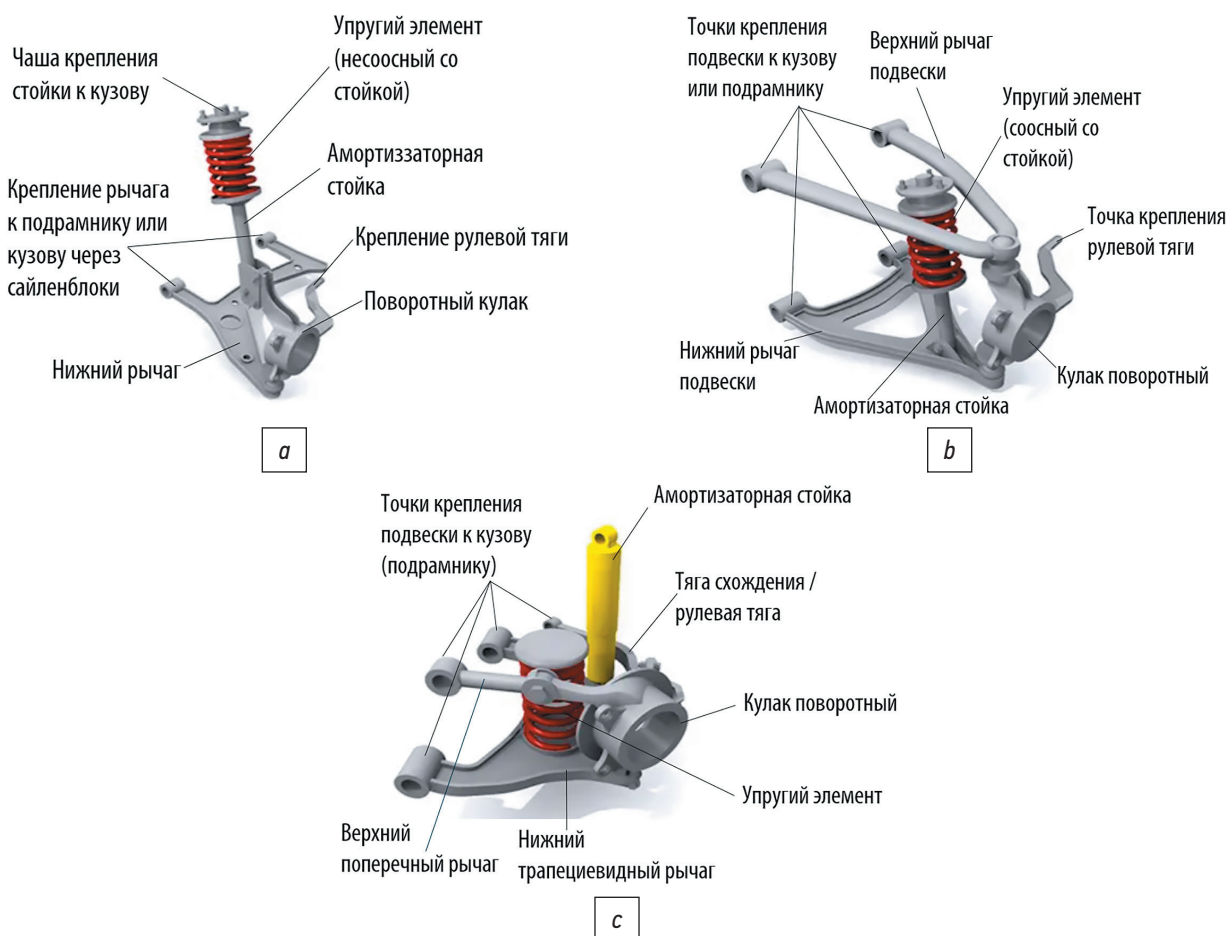


Рис. 2. Перспективные схемы подвесок: а — подвеска типа «Макферсон»; б — двухрычажная подвеска; с — многорычажная подвеска.

Fig. 2. Advanced suspension layouts: a — the McFerson suspension; b — double wishbone suspension; c — multilink suspension.

Двухрычажная подвеска (см. рис. 2, b). Является предшественником более простой подвески типа «Макферсон» и более сложной многорычажной подвески. В первом случае усовершенствование было в сторону удешевления конструкции, а во втором — в сторону улучшения потребительских свойств автомобиля. Данный тип подвески является компромиссом, когда нужно повысить устойчивость и управляемость автомобиля в ограниченном бюджете. Недостатком конструкции является занимаемое большое компоновочное пространство, поэтому данный тип подвески редко применяют для автомобилей с поперечным расположением двигателя. Как правило, пружина и амортизатор устанавливаются на нижний рычаг, поэтому он обычно значительно большего размера по сравнению с верхним. В последнее время данные подвески делают с большим разнесением шарниров на кулаке, располагая верхний шарнир над колесом, что позволяет применять небольшие по типоразмеру шарниры и продлевает их срок службы. Однако в этом случае достаточно массивным получается поворотный кулак, что может в значительной мере увеличить неподрессоренную массу, поэтому приходится применять лёгкие сплавы металла и удорожать конструкцию. В данной конструкции ось поворота колеса «виртуальная» пересекает продолжения линий, образуемых путём соединения внешних точек рычагов с внутренними, поэтому ось поворота может располагаться в любом удобном для конструктора месте и не быть

препятствием, с точки зрения компоновочного пространства для других габаритных элементов, как, например, крупных шарниров равных угловых скоростей для передачи большого крутящего момента. Также амортизатор расположен таким образом, что на него не действует изламывающий момент и его ресурс повышается.

Многорычажная подвеска (см. рис. 2, c). Это значительно усовершенствованная подвеска на двойных рычагах путём разбиения каждого рычага на два отдельных элемента для оптимизации кинематических параметров и расположения их таким образом, чтобы силы, приходящие от поворотного кулака, были направлены вдоль оси элемента, что позволяет значительно уменьшить размеры и массу этого элемента. «Виртуальная» ось поворота колеса для данного типа подвески определяется графическим способом, существуют различные подходы, в зависимости от разновидности многорычажной подвески. На рис. 3 представлен пример, когда ось поворота колеса проходит через центр сферы шарнира верхнего треугольного рычага, а продолжения осей нижних рычагов (продольный и поперечный рычаги) образуют пересечение с осью поворота колеса.

Как правило, «виртуальная» ось поворота колеса будет перемещаться в зависимости от положения колеса в нужном направлении и изменять такие важные параметры, как плечо кинематической стабилизации, плечо обката, продольный и поперечный наклон оси поворота. При правильной настройке кинематических точек

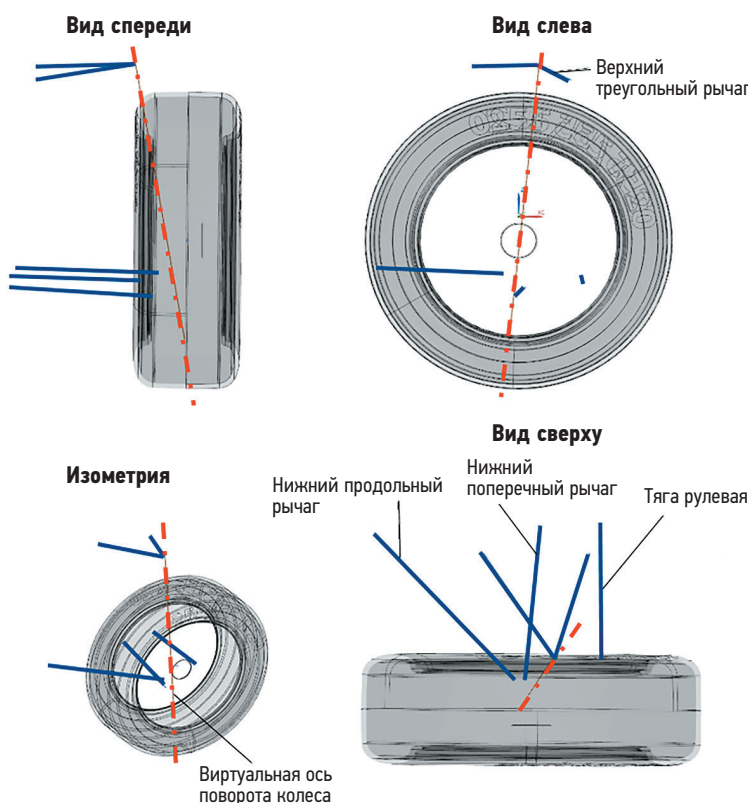


Рис. 3. Принципиальная кинематическая схема многорычажной подвески с виртуальной осью поворота колеса.
Fig. 3. Structural scheme of a multilink suspension with a virtual steering axis of a wheel.

подвески можно обеспечить оптимальное положение колеса относительно дорожного полотна на всех режимах работы подвески. Оптимальная работа данного типа подвески завязана также на правильно подобранные характеристики сайлентблоков и опор: под действием усилий деформируются изоляторы подвески (сайлентблоки и опоры) и происходит изменение кинематики, как правило, в сторону улучшения потребительских свойств управляемости и устойчивости. Учёт упруго-демпфирующих компонентов, оказывающих влияние на первично заложенную кинематику подвески (жёсткая кинематическая схема), относится к понятию эластокинематика (с англ. *elastokinematic*). Таким образом, помимо правильно подобранных кинематических точек подвески на характеристики многорычажных подвесок очень значительное влияние оказывают характеристики изоляторов (сайлентблоки и опоры рычагов), которые одновременно выполняют роль фильтрующего элемента для снижения вибронегативности и повышают безопасность управления автомобилем за счёт повышения свойств устойчивости и управляемости (правильное изменение положение колеса под действием сил в пятне контакта шины с дорожным полотном). Многорычажные подвески проектируются таким образом, чтобы обеспечить изменение эластокинематики в сторону недостаточной поворачиваемости при действии боковых усилий в пятне контакта шины с дорожным полотном, а также обеспечить устойчивость при торможении или ускорении, когда возникают продольные силы, меняющие положение колеса. Многорычажный тип подвески благодаря своим преимуществам широко используют как на передней оси автомобиля, так и на задней.

Стремление автопроизводителей получить больший положительный эффект на малых и больших скоростях привёл к дальнейшему техническому прогрессу: следующей стадией усовершенствования конструктива многорычажных подвесок является внедрение возможности подруливания в конструкцию подвесок задних колёс,

что, безусловно, вносит свои особенности в проектирование. Например, возникает необходимость уменьшения усилия на тяге схождения для минимизации нагрузки рулевого исполнительного механизма, требуется учёт изменения кинематических параметров не только при вертикальном перемещении колеса, но и при повороте, что является причиной учёта дополнительных расчётных случаев нагружения. К тому же разные производители используют разные типы исполнительных рулевых механизмов (см. рис. 4).

На рис. 4, а отражено техническое решение в виде реализации активного подруливания колёс задней подвески с электронно-управляемыми механизмами подруливания. Электронно-управляемый механизм подруливания каждого из колёс расположен вместо тяги схождения и является частью неподрессоренных масс подвески. На рис. 4, б отражено техническое решение в виде реализации активного подруливания посредством установки единого рулевого механизма с электронным управлением. На понятийном уровне принцип работы активного подруливания колёс задней подвески заключается в том, чтобы при повороте на малых скоростях доворачивать колёса на 1–10 градусов во внешнюю сторону поворота автомобиля, что значительно увеличивает манёвренность за счёт смещения полюса поворота ближе к передней оси автомобиля, в то же время при маневрировании на скоростях, как правило, более 40–60 км/ч рулевой механизм поворачивает задние колёса во внутреннюю часть поворота, повышая тем самым управляемость и устойчивость автомобиля за счёт смещения полюса поворота за заднюю ось автомобиля (значительно повышается чувствительность рулевого управления). Существенные недостатки подобного типа подвесок — занимаемое большое компоновочное пространство, сравнительно более трудоёмкий процесс проектирования, необходимость в подрамнике в качестве силовой структуры и значительная стоимость внедрения технических решений. Данные подвески из-за вышеуказанных недостатков практически не применяются



Рис. 4. Варианты реализации механизма подруливания колёс задней подвески: а — задняя многорычажная активная подруливающая подвеска автомобиля Porsche 911; б — задняя подвеска автомобиля Porsche Panamera.

Fig. 4. Different designs of rear wheels steering mechanism: а — rear active multilink suspension of the Porsche 911; б — rear suspension of the Porsche Panamera.

на автомобилях класса ниже E, но набирают популярность для применения на автомобилях высшего класса (классы E и F).

Для установления тенденции роста применяемости задних многорычажных подвесок с активным подруливанием на рис. 5 представлен график количественной оценки применяемости различных конструкций задних подвесок на автомобилях представительского класса передовых автопроизводителей, таких как *Mercedes-Benz*, *BMW*, *Rolls-Royce*, *Bentley*, *Toyota* и другие.

По графику можно проследить, что до середины 90-х годов прошлого века происходил поиск наиболее интересных и оптимальных схем подвесок, о чем говорит тенденция использования всеми автопроизводителями различных конструкций в относительно равных долях. К 2000-му году большинство производителей перешли к многорычажной задней подвеске, о чем свидетельствует падение применимости других схем на том же модельном ряде автомобилей и тенденция к увеличению частоты использования данного типа подвески на вновь появляющихся моделях. Также по графику видно, что примерно с 1985 г. на международном рынке стали появляться конструкции задних подвесок с адаптивным управлением задними колёсами. Благодаря бурному развитию микроэлектроники в последние 10 лет автопроизводители стали всё чаще применять подруливание задними колёсами на базе уже имеющейся

многорычажной подвески с незначительными доработками и установкой электронно-управляемых актуаторов или рейки, что обуславливает в последние несколько лет убывающую тенденцию обычных многорычажных подвесок и рост их же, но с возможностью управления задними колёсами.

Необходимо сделать акцент на том, что среди общих тенденций с 80-х годов прошлого века присутствуют некоторые исключения, с точки зрения опыта применения подруливающих задних подвесок в автомобилях других классов (рассматриваются классы ниже E и F). В качестве примера, следует отметить первый автомобиль класса S, который внедрил в массовое производство механическое всеколёсное рулевое управление (4WS) — *Honda Prelude 3* поколения (рис. 6), а также автомобиль *Mazda 626* 4-го поколения D класса (рис. 7).

На обоих автомобилях применяются независимые задние подвески [15]. Если в первом случае система полностью механическая, то во втором — электромеханическая система, работающая по созданным алгоритмам.

Еще одним примером использования нестандартной конструкции управления поворотом задних колёс является система *Nissan HICAS (High Capacity Active Steering)*, идея которой заключается в повороте всем задним подрамником (рис. 8) [16].

Исключением из общих тенденций является также применение заднего рулевого управления на автомобиле

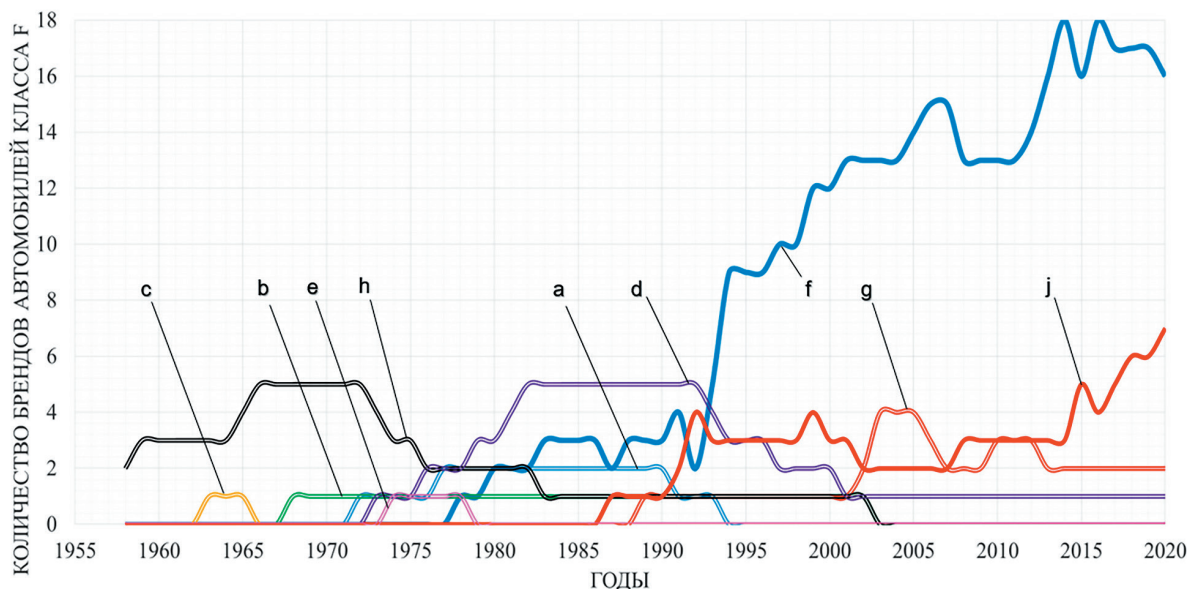


Рис. 5. Тенденция применения различных кинематических схем подвесок для высшего класса автомобилей: *a* — независимая подвеска на косых рычагах; *b* — независимая подвеска с качающимися полуосями; *c* — подвеска типа Де-дион; *d* — зависимая пружинная подвеска; *e* — независимая гидропневматическая подвеска; *f* — независимая многорычажная подвеска; *g* — независимая подвеска на двойных поперечных рычагах; *h* — зависимая рессорная подвеска; *j* — независимая многорычажная подвеска с активным подруливанием.

Fig. 5. Trend of using different kinematic schemes of suspension in the F-class vehicles: The trend is to use various kinematic suspension schemes for high-class cars: *a* — independent suspension on oblique wishbones; *b* — independent suspension with swing axles; *c* — De Dion type suspension; *d* — dependent spring suspension; *e* — independent hydro-pneumatic suspension; *f* — independent multi-link suspension; *g* — independent suspension on double wishbones; *h* — dependent spring suspension; *j* — independent multi-link suspension with active steering.

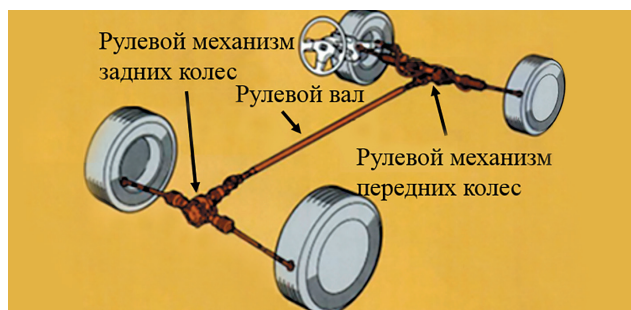


Рис. 6. Рулевое управление Honda Prelude [13].
Fig. 6. The Honda Prelude's steering system [13].

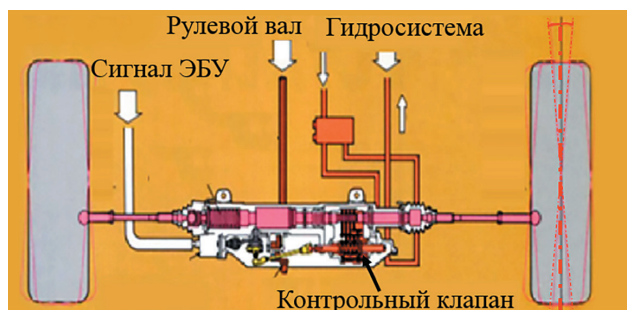


Рис. 7. Рулевое управление Mazda 626: ЭБУ — электронный блок управления [13].

Fig. 7. The Mazda 626's steering system: ЭБУ — an electronic control unit [13].

типа пикап, называемое *Quadrasteer* (рис. 9). В данном случае рулевой механизм подруливания задних колёс сочетается с зависимой подвеской на полуэллиптических рессорах [17].

Первые наработки 80-х годов не увенчались должным успехом и не были популярными, положительный и экономические эффекты не оправдывали конструкции того времени. Однако на сегодняшний день автопроизводители достигли необходимого технического уровня и уровня микроэлектроники, что позволяет разрабатывать и внедрять действительно эффективные решения.

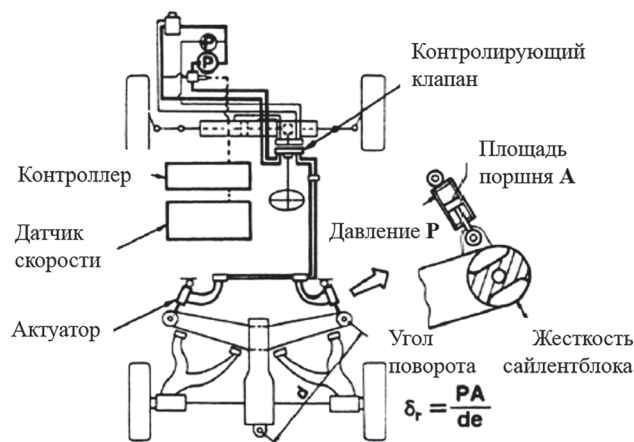


Рис. 8. Задняя подвеска с активной системой подруливания HICAS [14].

Fig. 8. Rear suspension with the HICAS active steering system [14].

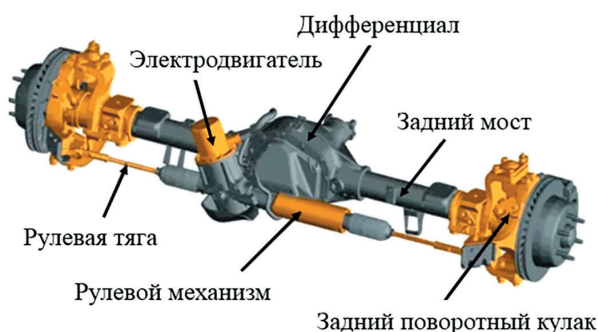


Рис. 9. Задняя подвеска Quadrasteer.
Fig. 9. The Quadrasteer rear suspension.

В настоящее время наиболее сложные и передовые конструкторские решения концентрируются автопроизводителями на достижении высоких характеристик задней подвески, поскольку большое внимание уделяется обеспечению комфорта задних пассажиров, что делает многорычажные подвески с активным подруливанием наиболее эффективными в вопросе компромисса потребительских свойств.

Следует выделить нижеприведённые технические особенности подобного рода:

1. Сложная кинематика направляющего аппарата подвески (требуется для обеспечения стабильности характеристик на полных рабочих ходах колеса при одновременном соблюдении условия оптимального распределения усилий по отдельным компонентам направляющего аппарата и силовой структуры для снижения виброн нагруженности и возможности снижения массы).
2. Система двухступенчатой фильтрации нагрузок, передаваемых от неподдресоренных частей к поддресоренным частям (сайлентблоки подвески являются первой ступенью фильтрации, а опоры подрамника — второй).
3. Гидравлические опоры подвески, которые настраиваются на проблемную частоту колебаний неподдресоренных частей, решают локальные проблемы вибрации (локальное улучшение комфорта и плавности хода автомобиля).
4. Сложная конструкция изоляторов подвески — резинометаллических шарниров и опор (требуется для одновременного обеспечения требуемых эластокинематических показателей подвески, приемлемых динамических характеристик и долговечности).
5. Наличие системы активного подруливания колёс (обеспечивает огромный положительный эффект на свойства плавности хода при сохранении оптимальных свойств устойчивости и управляемости — улучшается манёвренность на малых скоростях и безопасность автотранспортного средства на высоких скоростях, а также обеспечивается более эффективная работа систем интеллектуальной помощи водителю).

ВЫВОДЫ

1. Определена тенденция развития передовых конструктивных и технических решений, применяемых в шасси автотранспортного средства, направленных на повышение эксплуатационных свойств автомобиля: в настоящее время автопроизводители делают акцент на достижении высоких характеристик задней подвески, поскольку большое внимание уделяется обеспечению комфорта задних пассажиров, что позволяет считать многорычажные подвески с активным подруливанием наиболее эффективными в вопросе компромисса потребительских свойств.
2. Для выполнения цели исследования в статье проведена следующая обзорная работа:
 - отображены особенности классического процесса проектирования шасси автомобиля;
 - определена статистика использования типовых кинематических схем на автомобилях разных классов;
 - проведён обзор конструктивных и технических особенностей наиболее перспективных и совершенных кинематических схем подвесок, а также отображены необычные решения.
3. Проведённые исследования показали, что независимая многорычажная подвеска задней оси — достаточно сложный узел, который постоянно видоизменяется и совершенствуется для получения наилучших параметров шасси на фоне конкурентоспособности автопроизводителей, а методики проектирования данных подвесок остаются за рубежом, что вносит неясности в вопросы проектирования и валидации данного рода конструкций. В источнике [11] приведена концепция совершенно новой универсальной методики для проектирования подобного рода подвесок, однако, сам автор указывает, что это ещё только концепция с достаточным количеством неизвестных и, что актуальность доработки этой методики, либо создание подобных более совершенных достаточно высока. Таким образом, перед авторами данной статьи в перспективе

ставится глобальная задача разработки отечественных методических комплексов по проектированию и валидации многорычажных подвесок с учётом конструктивных решений, обеспечивающих подруливание колёс.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Е.Н. Мартынов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; И.С. Поташов — редактирование текста рукописи, создание изображений; А.И. Бокарев — экспертная оценка, написание текста рукописи, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. E.N. Martynov — search for publications, writing the text of the manuscript, creating images; I.S. Potashov — editing the text of the manuscript, creating images; A.I. Bokarev — expert opinion, writing the text of the manuscript, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Певзнер Я.М. Теория устойчивости автомобиля. М.: ГНТИ Машгиз, 1947.
2. Гинцбург Л.Л. Устойчивость управляемого движения автомобиля относительно траектории. М.: Автомобильная промышленность. 1977. № 9. С. 27.
3. Карунин А.Л. Конструкция автомобиля. Шасси. М.: МАМИ, 2000.
4. Острецов А.В. Автомобильные подвески. М.: МАМИ, 2011.
5. Раймпель Й. Шасси автомобиля. М.: Машиностроение, 1983.
6. Антонов А.С. Армейские автомобили. Конструирование и расчет. Часть 1. М.: Воениздат, 1970.
7. Вахламов В.К. Автомобили. Конструкция и элементы расчета. М.: Академия, 2006.
8. Полунгян А.А. Проектирование полноприводных колесных машин. Том 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
9. Ersoy M. Chassis Handbook. Fachmedien, Wiesbaden: Springer, 2011.
10. Reimpell J. The Automotive Chassis: Engineering Principles. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc., 2002. PA 15096–0001.
11. Buechner S. Enhanced Characterization of Suspension Systems for Virtual Chassis Development. Munich: BMW Group, Institute of Automotive Technology, Technical University of Munich, 2020.

12. Порватов И.Н., Кристальный С.Р. Классификация и маркировка автомобилей. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Основы конструкции автомобилей». М.: МАДИ, 2010.
13. *Advancements in electric and hybrid electric vehicle technology* SAE SP-1023. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1994.
14. Зеленин С.Ф., Молоков В.М. Учебник по устройству автомобиля. М.: РусьАвтокнига, 2000.

15. Honda vs. Mazda 4-wheel-steering // *Popular science*. 1987.
16. Operational and Design Features of the Steer Angle Dependent Four-Wheel Steering System, Eleventh International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, p. 404–415, May 12–15, 1987.
17. Improved Handling and Stability Using Four-Wheel Steering, Eleventh International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, p. 415–425, May 12–15, 1987.

REFERENCES

1. Pevzner YaM. *Vehicle stability theory*. Moscow: GNTI Mashgiz; 1947. (In Russ).
2. Gintsburg LL. *Stability of the controlled movement of the car relative to the trajectory*. Moscow: Avtomobilnaya promyshlennost. 1977. № 9. С. 27. (In Russ).
3. Karunin AL. *Vehicle design. Chassis*. Moscow: MAMI; 2000. (In Russ).
4. Ostretsov AV. *Car pendants*. Moscow: MAMI; 2011. (In Russ).
5. Reimpel J. *Car chassis*. Moscow: Mashinostroenie; 1983. (In Russ).
6. Antonov AS. *Army vehicles. Design and calculation. Part 1*. Moscow: Voenizdat; 1970. (In Russ).
7. Vakhlamov VK. *Cars. Design and calculation elements*. Moscow: Akademiya; 2006. (In Russ).
8. Polungyan AA. *Design of all-wheel drive wheeled vehicles. Vol. 1*. Moscow: MG TU im NE Bauman; 1999. (In Russ).
9. Ersoy M. *Chassis Handbook*. Fachmedien, Wiesbaden: Springer; 2011.
10. Reimpell J. *The Automotive Chassis: Engineering Principles*. Warrendale: Society of Automotive Engineers Inc.; 2002. PA 15096-0001.
11. Buechner S. *Enhanced Characterization of Suspension Systems for Virtual Chassis Development*. Munich: BMW Group, Institute of Automotive Technology, Technical University of Munich, 2020.
12. Porvatov I.N., Kristalny S.R. *Classification and marking of cars. Methodical instructions for practical exercises in the discipline "Fundamentals of car design"*. Moscow: MADI; 2010. (In Russ).
13. *Advancements in electric and hybrid electric vehicle technology* SAE SP-1023. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1994.
14. Zelenin SF, Molokov VM. *Car Tutorial*. Moscow: RusAvtokniga; 2000. (In Russ).
15. Honda vs. Mazda 4-wheel-steering // *Popular science*. 1987.
16. Operational and Design Features of the Steer Angle Dependent Four-Wheel Steering System, Eleventh International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, p. 404–415, May 12–15, 1987.
17. Improved Handling and Stability Using Four-Wheel Steering, Eleventh International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, p. 415–425, May 12–15, 1987.

ОБ АВТОРАХ

* **Мартынов Евгений Николаевич**,
аспирант,
ведущий инженер-конструктор;
адрес: Российская Федерация, 125438, Москва,
ул. Автомоторная, д. 2;
e-mail: martynoff.evgeny2015@yandex.ru

Поташов Илья Сергеевич,
ведущий инженер-конструктор;
eLibrary SPIN: 8741-2992;
e-mail: ilya.potashov@nami.ru

Бокарев Александр Игоревич,
канд. техн. наук,
старший научный сотрудник;
ORCID: 0000-0003-3617-2747;
eLibrary SPIN: 8178-5744;
e-mail: bokarev@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* **Evgeniy N. Martynov**,
Postgraduate,
Design Engineer of the 2nd Category;
address: 2 Avtomotornaya street, 125438 Moscow,
Russian Federation;
e-mail: martynoff.evgeny2015@yandex.ru

Ilya S. Potashov,
Design Engineer of the 1st Category;
eLibrary SPIN: 8741-2992;
e-mail: ilya.potashov@nami.ru

Alexander I. Bokarev,
Cand. Sci. (Tech.),
Lead Design Engineer;
ORCID: 0000-0003-3617-2747;
eLibrary SPIN: 8178-5744;
e-mail: bokarev@bmstu.ru