

Упругие опорные элементы для подвижного состава

Оптимальный выбор упругих опорных элементов с учетом таких показателей, как плавность хода и низкий уровень излучаемого шума, имеет для подвижного состава большое значение. В связи с этим в его конструкции нашли широкое применение рессоры из эластомерных материалов. При разработке таких рессор необходимо знать их механические характеристики, а также поведение при длительном использовании в соответствующих условиях эксплуатации. Постоянное совершенствование компьютерных методов моделирования, расчета и прогнозирования создает необходимые условия для сокращения затрат времени на испытания и расходов на экспериментальные исследования рессор.

В процессе движения и ускорения тел возникают динамические силы и колебания, обусловленные действием реакций системы. Эти колебания могут оказаться причиной шума или вибраций, а также нежелательного динамического нагружения элементов конструкции. Используя гасители колебаний и рессоры, можно минимизировать амплитуды возникающих колебаний или изолировать их с целью выполнения требований относительно допустимых уровней шума и вибраций.

Общие требования

Для любой колебательной системы, какой является, например, двигатель с его опорными подшипниками или кузов вагона с системой вторичного рессорного подвешивания, можно дать математическое описание, основываясь на частоте собственных колебаний и возрастании амплитуд при резонансе. Так как изоляция колебаний, а также их гашение достигаются только при частоте, превышающей собственную в 1,41 раза, задачей конструктора является обеспечение наиболее низкой частоты собственных колебаний.

На рис. 1 показано, в какой мере за счет согласования частот собственных колебаний упругого опорного элемента с частотой возбуждения колебаний системы машины можно повлиять на усиление колебаний при резонансе. Изолирующее действие принимаемых мер считается эффективным, если функция усиления колебаний $V_\eta < 1$, что, в свою очередь, имеет место при соотношении частот воз-

буждения и собственной $f_{err}/f_0 > \sqrt{2}$. Сравнение приведенных на рисунке кривых убедительно показывает, какую роль в снижении резонансных перегрузок играет гашение колебаний.

При запуске и остановке машины, смонтированной на упругих опорах, в большинстве случаев кривая изменения частоты вращения проходит через область резонанса. При этом происходит увеличение амплитуды колебаний возбуждения, которое при низкой эффективности рессор может многократно превысить исходную амплитуду, а теоретически в предельном случае может стать бесконечно большим. Когда область резонанса преодолевается слишком медленно, это может привести к критическому нарастанию колебаний.

Величина резонансного пика функции V_η зависит только от степени гашения колебаний рессорами. Благодаря высокой демпфирующей способности рессоры из эластомерных материалов используются на подвижном составе в качестве упругих опорных элементов, где они конкурируют со стальными пружинами. Вопрос о том, какой тип рессор является лучшим, выясняется в каждом отдельном случае их применения. Эластомерные рессоры характеризуют следующие свойства:

- компактность конструкции и возможность совмещения гасителей и рессор в одном элементе благодаря высокой гасящей способности материала;
- свобода выбора формы упругих элементов, диктуемой особенностями конструкции;

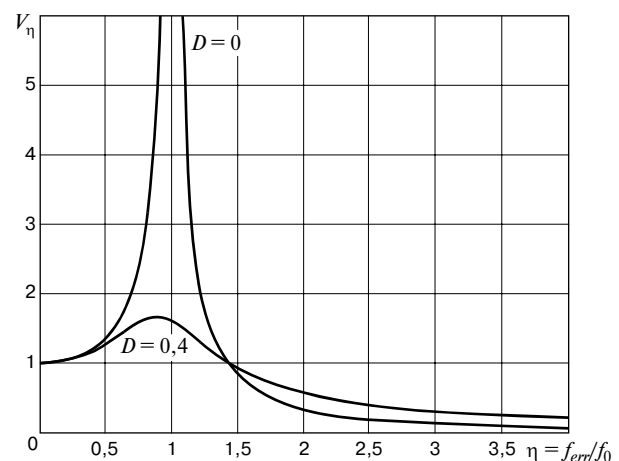


Рис. 1. Функция увеличения амплитуды V_η линейного одномассового колебательного элемента в зависимости от соотношения частот f_{err} (возбуждения) и f_0 (собственных колебаний) для коэффициентов демпфирования $D = 0,4$ и $D = 0$

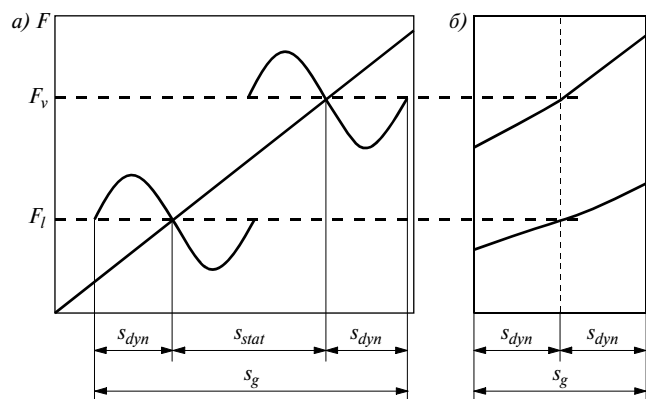


Рис. 2. Ход и характеристики стальных пружин (а) и пневморессор (б): s_g — общая величина хода; s_{dyn} — динамическая составляющая хода; s_{stat} — статическая составляющая; F — нагрузка; F_v — полностью загруженный вагон; F_l — порожний вагон

- возможность обеспечения минимальной собственной частоты $f_0 = 3$ Гц;
- реализуемость в пределах допустимых нагрузок минимальной собственной частоты, равной 1 Гц, в случае совместного использования эластомерных и воздушных рессор.

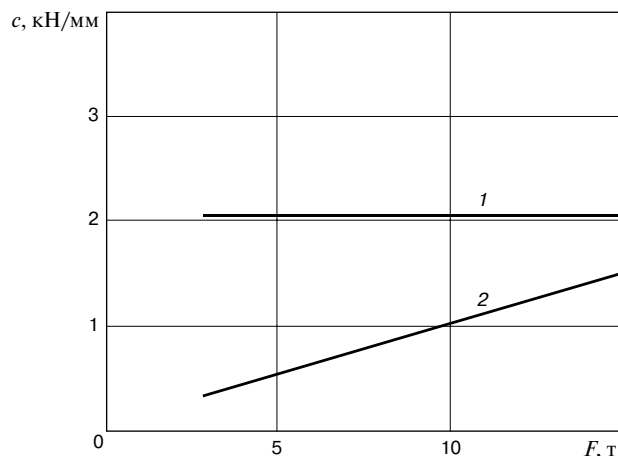


Рис. 3. Зависимость жесткости рессоры c от нагрузки F : 1 — стальная пружина; 2 — пневморессора

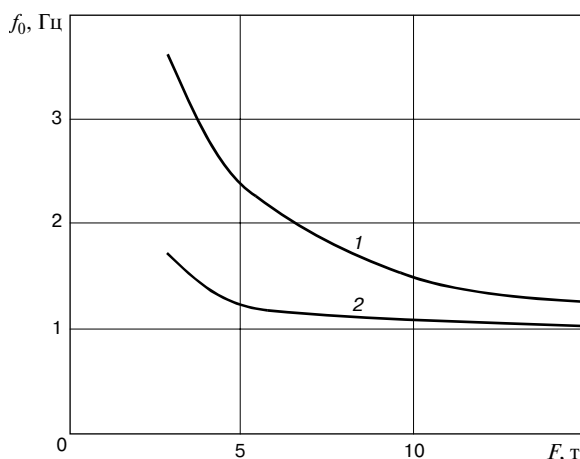


Рис. 4. Частота собственных колебаний f_0 в функции нагрузки: обозначение позиций, как на рис. 3

Стальные пружины, используемые в качестве рессор, имеют свои достоинства:

- хорошее гашение корпусного шума;
- высокая длительная прочность;
- возможность эксплуатации в широком температурном диапазоне;
- отсутствие просадок и ползучести;
- возможность обеспечения минимальной частоты собственных колебаний, равной 2 Гц;
- линейная характеристика.

Широкое распространение получили пневморессоры, без которых уже нельзя представить пассажирский подвижной состав. Для достижения высокой плавности хода отношение жесткости рессоры c к нагрузке F должно быть по возможности постоянным при минимальном значении жесткости. Это условие обеспечивается при использовании пневморессор.

В подвижном составе с традиционными стальными рессорами, имеющими постоянную (и низкую) жесткость, статический ход s_{stat} пружины (рис. 2) должен быть достаточно большим. В связи с этим под вагоном необходимо свободное пространство, достаточное для относительных перемещений рамы тележки и кузова. Из-за этого стальные рессоры с низкой жесткостью не используют в вагонах, к которым предъявляются высокие требования в отношении плавности хода.

Требуемый для стальной рессоры общий ход s_g образуют статическая часть s_{stat} и обусловленные колебаниями вагона динамические составляющие порожнего и полностью загруженного вагона s_{dyn} .

При использовании пневморессор с регулированием уровня монтажное пространство определяется только динамическими колебаниями. Эти рессоры могут иметь пониженную жесткость и низкую частоту собственных колебаний. Такие рессоры значительно улучшают плавность хода. Отсутствие статической составляющей хода рессоры обеспечивает, кроме того, постоянную высоту над УГР пола в тамбуре, не зависящую от населенности вагона.

Пневматические и стальные рессоры отличаются не только отсутствием или наличием статической составляющей хода, но и частотой собственных колебаний. Благодаря неизменной (при меняющихся внутреннем давлении и нагрузке) жесткости пневморессор частота собственных колебаний во всем нагрузочном диапазоне остается практически постоянной. В стальных рессорах с линейной жесткостью при изменении нагрузки меняется частота собственных колебаний.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости жесткости рессоры c и частоты собственных колебаний f_0 от нагрузки F для пневматической и стальной рессоры (пружины с линейной характеристикой). Результаты исследований показали, что в случае стальных рессор

постоянной жесткости частота собственных колебаний кузова вагона при уменьшении нагрузки возрастает, а при использовании пневморессор она значительно ниже и остается постоянной во всем диапазоне нагрузок.

Свойства эластомерных материалов

Свойства эластомеров зависят от рецептуры смеси, которая может иметь индивидуальный состав в зависимости от различных требований, предъявляемых условиями эксплуатации. Тем не менее нельзя в одной смеси достичь оптимальных значений для всех свойств, так как между отдельными характеристиками существуют определенные зависимости.

Большинство смесей, используемых для эластомерных опорных элементов, базируется на натуральном каучуке (NR). Такие смеси отличаются высокими механическими показателями, большим сроком службы и незначительным динамическим повышением жесткости (отношением динамической жесткости к статической). При этом имеются различия, обусловленные твердостью по Шору. Так, смеси с большей твердостью имеют несколько повышенную динамическую жесткость.

При необходимости в более высокой степени демпфирования колебаний применяют синтетические каучуки, например бутилкаучук, или изобутиленовый изопреновый каучук (IIR). По сравнению с NR он имеет примерно в 5 раз более высокую демпфирующую способность, а его динамическая жесткость составляет 1,8 (у NR — около 1,2).

Гашение колебаний эластомерными элементами оценивается с помощью угла потерь, который представляет собой фазовый сдвиг между сигналами усилия и деформации при воздействии гармонических циклов нагружения.

Уровень повышения динамической жесткости зависит от предварительной нагрузки (статической), амплитуды и частоты нагружения элементов. В общем считается, что частотная зависимость начинается только с диапазона $f > 50$ Гц, а амплитудная — с малых амплитуд в высокочастотной области. В большинстве случаев рассматривается лишь важный для динамики движения частотный диапазон до 20 Гц. Соответствующие амплитуды перемещений превышают 1 мм.

Для расчета колебаний и определения параметров систем обычно достаточным является оценка постоянных значений при повышении динамической жесткости для каждого типа эластомера. Однако для более подробного анализа необходимо экспериментальное определение динамической жесткости.

Другим параметром эластомерных опорных элементов, которому при их выборе придается большое значение, является осадка. В ходе процесса осадки имеет место пластическая деформация, зависящая

от нагрузки и изменяющаяся во времени. Наряду со средней статической нагрузкой на параметры осадки оказывают влияние прежде всего температурные условия. При этом на процесс воздействует не только нагревание элемента во время эксплуатации, но и температура окружающей среды.

Осадка уменьшает высоту упругого опорного элемента, повышает статическую (а значит, и динамическую) жесткость. В результате изменения этой высоты изменяется уровень расположения над УГР элементов конструкции вагона, например пола тамбура. Несовпадение его уровня с высотой платформы ухудшает условия посадки и высадки пассажиров. В ряде случаев это уменьшение высоты рессоры можно компенсировать за счет подкладных шайб.

Проблемы возникают в том случае, когда в результате необратимой осадки опорного элемента изменяется его жесткость, что ведет к рассогласованию параметров первоначально спроектированной колебательной системы. Выходом здесь является проектирование, заранее учитывающее ожидаемую осадку при выборе эластомерного упругого элемента. Для этого необходимо иметь подробную информацию о постоянных эксплуатационных нагрузках и условиях окружающей среды. Указанные проблемы возникают в первую очередь при проектировании подвижного состава, информация о нагрузках и характере эксплуатации которых бывает недостаточно полной.

Проведенные в этой области исследования показывают, что ожидаемую осадку в большинстве случаев можно определить достаточно точно. Однако качество результатов в значительной степени зависит от точности и достоверности исходных данных.

Зависимость осадки упругого элемента от нагрузки и, следовательно, от статического хода для стационарных машин незначительна, так как их опоры обычно имеют довольно высокую жесткость. Зато в системах с большим ходом упругих элементов, например в первичном рессорном подвешивании подвижного состава, отрицательное воздействие необратимой осадки эластомерной опоры значительно ухудшает плавность хода.

В общем машиностроении эластомерные упругие элементы используются широко. Области использования являются, например, виброизоляция приводного оборудования, снижение корпусного шума печатных станков и кузнечно-прессовых машин, изоляция от вибраций и ударов измерительных устройств и систем управления, чувствительных к сотрясениям.

Для простого расчета опоры, например для машины на отдельном фундаменте, необходимы по меньшей мере такие параметры как масса, распределение нагрузки, положение центра тяжести, частота возбуждения, а также желаемое число опорных точек. С помощью расчетных формул или диаграмм

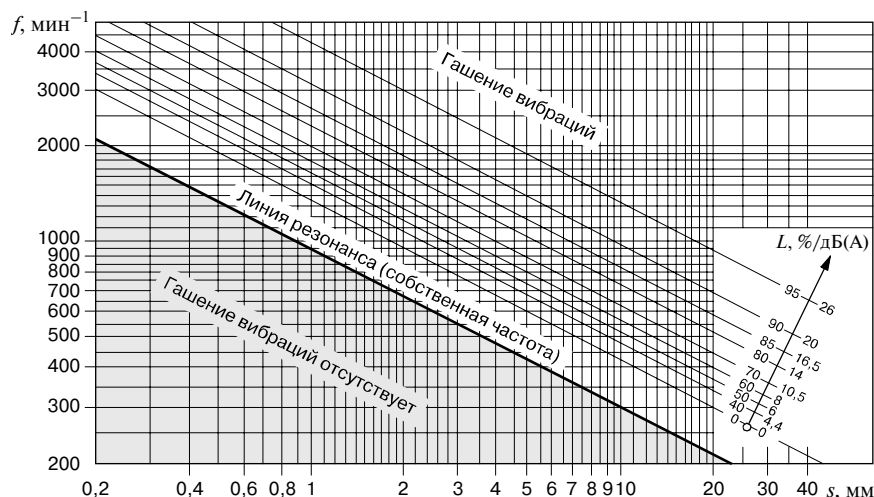


Рис. 5. Зависимость степени изоляции вибраций L от статического хода рессоры s и частоты возбуждения f (частоты вращения)

(рис. 5) конструктор может определить степень изоляции, обеспечиваемую выбранным упругим опорным элементом и указывающую процентную долю гасящихся возбуждающих воздействий.

Использование эластомерных опор в конструкции подвижного состава

В подвижном составе упругие опорные элементы в первую очередь используются в ходовой части. Для выбора типа рессор имеется несколько возможностей. Выбирают обычно ту, которая соответствует концепции компании-разработчика. Выбор материала и типа рессор (стальные пружины или резинометаллические блоки в первичном подвешивании или пневморессоры во вторичном) во многих случаях ориентирован на внедрение предлагаемых компанией новых разработок. Значительную роль при выборе рессор играют требования в отношении срока службы, ожидаемая величина осадки, а также увеличение жесткости эластомерных рессор в условиях эксплуатации.

Областями использования упругих опорных элементов в тележках являются:

- системы первичного и вторичного рессорного подвешивания;
- упругие упоры;
- упругие опоры поводков для передачи усилий;
- элементы, изолирующие тракт передачи высокочастотных вибраций.

Первичное рессорное подвешивание

Система первичного рессорного подвешивания играет особо важную роль. Она в большой степени определяет ходовые качества экипажа и, таким образом, оказывает непосредственное влияние на устойчивость движения, характер вписывания в кривые и безопасность в отношении схода с рельсов, а также на износ и уровень плавности хода. Первичное рессорное подвешивание может быть выполнено с раз-

ными типами рессор: стальными, резинометаллическими или с их комбинацией.

При использовании стальных рессор в первичном рессорном подвешивании в любом случае необходимы дополнительные гасители колебаний. В случае применения резинометаллических рессор от гасителей колебаний в большинстве случаев можно отказаться. Резинометаллические рессоры могут иметь разные варианты исполнения.

Вторичное рессорное подвешивание

Система вторичного рессорного подвешивания прежде всего обеспечивает плавность хода и в значительной мере определяет общий уровень комфортности поездки. Здесь требуются мягкие рессоры, допускающие частоту вертикальных колебаний кузова вагона до 0,5 Гц. Дополнительно вторичное рессорное подвешивание должно обеспечивать возможность горизонтальных смещений кузова вагона относительно тележки до 120 мм. В этой системе могут быть использованы как стальные пружины, так и пневморессоры в сочетании с резинометаллическими блоками. Низкая горизонтальная жесткость пневморессор делает необходимым применение резинометаллических элементов в качестве поперечных амортизаторов для восприятия квазистатических поперечных сил при прохождении кривых. Устанавливаемые последовательно с пневморессорами дополнительные резинометаллические блоки, кроме того, служат в качестве резервных рессор при выходе из строя пневматических.

Упругие боковые упоры

Для ограничения перемещений кузова вагона или компонентов ходовой части применяются упоры. Они могут быть жесткими, упругими или комбинированными. Преимуществом упругих упоров является то, что они мягко ограничивают поперечные перемещения кузова, исключая возможность возникновения больших ударных ускорений.

Упругие опоры поводков

Передача тяговых и тормозных усилий между кузовом вагона и тележкой или между колесной парой и тележкой по законам кинематики и динамики движения должна быть упругой. Требования к упругим элементам в этом тракте очень высокие. Наряду с передачей продольных и поперечных сил должна осуществляться также передача моментов кручения вокруг продольной и поперечной осей детали. Традиционная конструкция в виде цилиндрических втулок является для этой цели уже недостаточной, поскольку она в значительной мере ограничивает движение относительно ее поперечной оси. В этом случае используют упругие элементы, внутренняя часть которых имеет сферическую форму. Благодаря такой конструкции обеспечивается достаточная подвижность сочленения во всех направлениях.

Системный подход и использование вычислительной техники при разработке эластомерных опор

В компаниях, изготавливающих подвижной состав, намечается тенденция к заказу на стороне не только отдельных узлов и агрегатов, но и целых систем, например первичного рессорного подвешивания, включая стальные пружины, литые поводки и резинометаллические опоры. При этом от поставщика нередко требуется частичное освоение новых технологий и способов проектирования.

Благодаря использованию имеющихся технологий моделирования и методов расчета стало возможным выполнение «с первого предъявления» указанных заказчиком требований и сокращение вдвое времени на разработку. Проведение испытаний упругих деталей на усталостную прочность позволяет дать гарантию их пригодности к использованию в заданных условиях еще до сдачи подвижного состава в эксплуатацию.

Подход к разработке резинометаллических элементов в последние годы заметно изменился. Если раньше параметры этих элементов в большинстве случаев выбирались с запасом, то современные технические условия принуждают к созданию конструкций, оптимальных со всех точек зрения.

Эти конструктивные элементы должны выполнять все больше задач, при этом монтажное пространство для них постоянно уменьшается. При этом уменьшается и время, отводимое на разработку. Для успешного проектирования требуются не только специальные знания об эластомерах как материале, но и понимание специфики общей системы, в которую должны быть интегрированы создаваемые упругие элементы.

Сокращение времени на разработку и повышение общей надежности конструкции возможны только при условии использования самых совре-

менных вспомогательных средств, таких, как трехмерные программы автоматизированного проектирования (3D-CAD) и расчеты на высокопроизводительных ЭВМ, основанные на методе конечных элементов (FE). При компьютерном расчете элементов конструкции результат в первую очередь зависит от качества исходных данных. Чем точнее исходные данные отображают нагрузки конструкции в предстоящих условиях эксплуатации, тем выше гарантия, что разрабатываемый элемент будет отвечать всем поставленным требованиям.

Большим преимуществом компьютерных расчетов, выполняемых на базе исчерпывающих данных об эксплуатационных нагрузках, является возможность прогнозирования срока службы эластомерных элементов еще до создания первого опытного образца. Современные вспомогательные средства позволяют контролировать каждый отдельный участок упругого элемента за все время смоделированного срока службы. Критические зоны, подвергающиеся высоким нагрузкам, быстро обнаруживаются и оптимизируются таким образом, что нагрузки уменьшаются до допустимого уровня. Тем самым обеспечивается возможность создания модели упругого элемента, которая на последующих стадиях разработки не потребует никаких изменений или ограничит их до минимума.

Выводы

Современные программы для моделирования и расчета подвижного состава, подвергающегося эксплуатационным нагрузкам, способствовали созданию более точной и обширной спецификации требований к системам рессорного подвешивания и гашения колебаний. Благодаря определенным свойствам материала и широким конструктивным возможностям, а также простоте изготовления эластомерные рессоры заняли прочное место в качестве опорных элементов для промышленной и транспортной техники.

Создание специальных моделирующих систем и новые методы исследования свойств материалов позволяют сегодня достаточно точно оценить срок службы эластомерных рессор в условиях эксплуатации. Благодаря этому имеется возможность реализации современной высокотехнологичной продукции и ее модернизации.

Важным положительным моментом в разработках подвижного состава является тенденция к заказам и поставкам комплексных систем. В данном случае от изготовителей упругих элементов требуется знание всех особенностей систем рессорного подвешивания и расширение объемов поставок при высоком качестве.