

Анализ ровности пути высокоскоростного СТЮ и принципов создания подвески высокоскоростного юнибуса

1. Ровность высокоскоростной рельсо-струнной путевой структуры

На традиционных железных и автомобильных дорогах неровности пути определяются, преимущественно, строительными неровностями и пластическими деформациями основания. Кроме того, эти неровности практически не зависят от нагрузки на колесо и от температуры путевой структуры, т.е. от погодноклиматических факторов. Исходя из этих особенностей и проектируется традиционная подвеска традиционного подвижного состава.

Подъём путевой структуры на «второй уровень» добавил к строительным неровностям пути динамическую деформативность пролётного строения, которая значительно превышает прочие статические неровности пути. Например, при выполнении пролётного строения по нормативам капитального моста, с нормативной относительной жесткостью $1/800$, прогиб пролёта длиной 30 м под воздействием расчетной нагрузки составит 37,5 мм. Двигаться по такой дороге со скоростью порядка 100 м/с будет весьма проблематично. Поэтому, например, на эстакадах высокоскоростных железных дорог балку пролётного строения выполняют значительно более жёсткой, что приводит к очень высокой материалоемкости и, соответственно, стоимости такой дороги. Например, построенная по японской технологии высокоскоростная железная дорога в эстакадном исполнении на Тайване (январь 2007 г.) стоит около 50 млн. USD/км, а расход железобетона на ней составил более 50 тыс. т/км для пролётного строения (две мощные балки и сверху — плита) и более 20 тыс. т/км — на опоры и фундаменты опор (например, под каждой опорой — четыре буронабивные сваи диаметром по 2 м и длиной до 60 м).

В СТЮ, кроме указанных причин возникновения неровностей пути, будет еще существенным влияние и температуры, т.к. температурные усилия в криволинейном корпусе рельса и в криволинейной струне приведут к их совместным поперечным перемещениям относительно горизонтальной плоскости.

Оценим влияние каждого из значимых факторов появления неровностей пути на примере трассы СТЮ «Москва — Минск», для пролётов длиной 30 м, при весе модуля 3000 кгс, его колесной базе 4 м и максимальном перепаде температур 90 °С.

Жёсткость пролетного строения

Японцы продемонстрировали самый примитивный способ увеличения ровности пути — путем наращивания материалоемкости пролётного строения для увеличения его изгибной жёсткости. По этому же пути можно пойти и в СТЮ. Например, для обеспечения динамической неровности в 3 мм, струны в пути (два рельса) должны быть натянуты в этом случае до суммарного усилия 6,5 тыс. тонн. Но такой подход привел бы к удорожанию трассы СТЮ «Москва — Минск» минимум на 5 млрд. USD.

Однако такие же неровности пути (величиной до 3 мм) могут быть достигнуты, например, и при усилии натяжения в 600 тс, если выполнить рельсы со строительным подъемом около 30 мм в центре пролета. Это уменьшит стоимость путевой структуры примерно в 10 раз, поэтому в дальнейших расчетах базовым усилием предварительного натяжения струн в пути примем равным 600 тс, а в одном рельсе — 300 тс.

Длина пролёта

В процессе строительства тысяч опор некоторые из них могут быть установлены с отклонениями по длине пролёта до $\pm 0,5$ м. Это приведет к дополнительным случайным (разовым) динамическим неровностям пути в $\pm 0,62$ мм.

Изменение натяжения струн

При строительстве

Во время строительства струны будут натянуты с точностью до ± 2 %, или ± 12 тс на путь. Это приведет к появлению дополнительных регулярных (на длине 3—5 км, между соседними анкерными опорами) динамических неровностей до $\pm 0,64$ мм.

При изменении температуры

Изменение температуры рельса-струны (всего его объема, а не только освещенной солнцем поверхности) приведет к изменению усилий натяжения в пути, примерно равных 2 тс/°С (или 1 тс/°С для одного рельса). Это, в свою очередь, приведет к появлению динамических неровностей в $0,11$ мм/°С. Изменение температуры на 45 °С относительно температуры сборки $+10$ °С, т.е. до $+55$ °С на солнце летом, или до -35 °С зимой, приведет к появлению максимальных температурных неровностей, равных $\pm 4,95$ мм.

Изменение веса юнибуса

Изменение веса юнибуса на ± 100 кгс приведет к появлению динамических неровностей пути, равных $\pm 1,08$ мм. Максимально возможное изменение веса юнибуса на ± 325 кгс (от 4 пасс. до 0 пасс. или до 8 пасс. с багажом) даст неровности пути, равные $\pm 3,51$ мм.

Описанные в п.п.1.1—1.4 неровности пути имеют заранее известный (а не произвольный) характер и могут как складываться между собой, так и вычитаться друг из друга. При сложении они дадут максимальные неровности пути, равные $\pm 9,7$ мм, а при вычитании — неровности будут в пределах $\pm (2—3)$ мм.

2. Принципы создания подвески высокоскоростного юнибуса

При создании подвески высокоскоростного пассажирского юнибуса возможны два подхода: 1) традиционный («автомобильный») подход, когда юнибус снабжается «автомобильной» мягкой подвеской со свободным ходом

300—400 мм, которая все равно не обеспечит комфортное движение пассажиров по недостаточно ровной путевой структуре; 2) нетрадиционный подход — жесткая подвеска юнибуса и регулируемые неровности пути: до ± 3 мм (из них синусоидального характера с длиной волны 30 м на всем протяжении трассы — $\pm 1,5$ мм).

С традиционным подходом все ясно, поэтому рассмотрим только альтернативный вариант.

Строительные неровности, обусловленные технологическими погрешностями (неровный рельс, неточная длина пролёта и неточное предварительное натяжение струн), будут в пределах $\pm 1,5$ мм. Они носят достаточно случайный характер и поэтому не могут быть компенсированы при движении юнибуса. Неровности же, обусловленные температурой путевой структуры и загрузкой юнибуса, заранее известны и достаточно значимы — суммарно до $\pm 8,5$ мм. Но при их взаимной компенсации такие суммарные неровности пути будут в пределах $\pm 1,5$ мм.

Таким образом, при максимальной температуре путевой структуры (а не воздуха, т.к. рельс-струна обладает тепловой инертностью) вес юнибуса должен быть минимален, потому что струна будет иметь минимальное натяжение, а при минимальной температуре — должен быть максимален. При этом отклонения в весе юнибуса на ± 100 кгс равносильны, по величине возникающих динамических неровностей пути, изменению температуры примерно на ± 10 °С (или разнице между максимальной и минимальной температурой в 20 °С). Такие изменения температуры бывают примерно в течение одного сезона (весна, лето, осень, зима), реже — в течение одного месяца, еще реже — в течении нескольких дней. Поэтому температурные неровности могут быть сnivelированы примерно один раз в месяц изменением веса юнибуса на 200 кгс. Максимально же вес юнибуса будет различаться на 800 кгс — зимой при минимальной температуре -35 °С он должен быть тяжелее, чем летом при $+45$ °С, на эту величину.

Из приведенного анализа следует, что высокоскоростной юнибус должен иметь балластную систему, вмещающую до 800 кгс балласта. В качестве балласта можно использовать: воду; специальные металлические грузы; грузы, имеющие отправителя и получателя (например, зимой юнибусы будут грузопассажирскими, перевозящими до 10 пасс. и до 0,6 тонн грузов, а летом — только пассажирскими; летом же грузы будут перевозиться только специальными грузовыми модулями); пассажиры (зимой можно брать в юнибус на 10 пасс. больше). Очевидно, что юнибус должен иметь комбинированную балластную систему, например, на 600 кгс — металлический балласт, на 200 кгс — емкости для воды. Первый балласт регулируется один раз в месяц, второй — ежедневно. Водой легко заправлять юнибус, а чистую воду экологически чисто можно сбросить, при острой необходимости, в процессе движения — она на скорости 100 м/с распылится в мельчайшие капли дождя.

Наличие водного балласта еще оправдано и потому, что в юнибусе есть туалет, умывальник и емкости для канализационных стоков, которые необходимо будет опорожнять по меньшей мере один раз в сутки. Наличие же большого количества воды на борту юнибуса позволит также, при необходимости (например, в VIP—салоне), принять душ или ванну.

Описанный подход к созданию комфортной подвески (при этом жёсткой, а не мягкой подвески) высокоскоростного юнибуса требует соответствующей

организации посадки-высадки пассажиров на станциях и движения по трассе, не требующих каких-либо дополнительных усилий при эксплуатации СТЮ (эта организация — просто другая, а не более сложная или дорогостоящая).

Во-первых, на линию со станции выпускаются только полностью загруженные юнибусы. Поскольку на трассе нет расписания движения, то это требование легко регулируется интервалом движения юнибусов: в часы пик — 0,5—1 мин. и менее, ночью — 5—10 мин. и более. В случае выхода более 2-х пассажиров на промежуточных станциях и при отсутствии входящих пассажиров, их весовая разница компенсируется водным балластом. При этом большая часть юнибусов будет следовать из конца в конец трассы без остановок, и только меньшая их часть, с более дешевой стоимостью проезда, будет останавливаться на промежуточных станциях, с выведением их с линии (такие юнибусы вместо 2 часов будут находиться в пути 2,5—3 часа). На такие юнибусы, которые имеют соответствующие табло, посадка пассажиров осуществляется отдельно.

Во-вторых, раз в сутки (можно чаще) юнибус заправляется необходимым количеством воды и освобождается от канализационных отходов. Летом целесообразнее это делать два раза в сутки: перед дневным повышением температуры и перед ночным ее понижением.

В-третьих, раз в месяц (или один раз в сезон) устанавливается металлический сезонный балласт.

В-четвертых, по трассе могут перегоняться и порожние юнибусы (без пассажиров), но тогда они будут двигаться по более крупным неровностям пути, что на конструкции юнибуса и его жёсткой подвеске никак не скажется.

Необходимо отметить, что приведенные рассуждения справедливы лишь для «тупо» спроектированного СТЮ, где нет саморегуляции. На самом же деле в грамотно спроектированном рельсе-струне строительный подъем — не константа, а имеет саморегуляцию. Например, при температуре сборки (+10 °C) этот подъем будет равен 32,5 мм, при -35 °C (когда усилие в одном рельсе будет равно 345 тс) — 28,2 мм, а при +55 °C (усилие 255 тс) — 38,2 мм. По такому пути, без всякой балластной системы, юнибус средним весом 3000 кгс, в любую погоду и в любое время суток будет двигаться при максимальных неровностях на пролетах ± 3 мм (из них — 1,5 мм строительные неровности и 1,5 мм — динамические), если, конечно же, вес юнибуса будет находиться в пределах от 2900 до 3100 кгс (или ± 100 кгс относительно 3000 кгс).

3. Дополнительные способы улучшения плавности хода

Воздушная подушка

В юнибусе 4-го поколения можно достаточно легко, в дополнение к механической подвеске, создать мягкую подвеску в виде воздушной подушки — ведь горизонтальная площадь воздушного зазора между его нижней и верхней частями составляет около 10 м². Поэтому для поддержания верхней части весом около 2000 кгс, потребуется избыточное давление всего в 0,02 атм. Такое давление легко создать. Чтобы оно сильно не «прыгало» при изменении зазора (например, при вертикальном относительном перемещении в 2 мм — не более, чем на $\Delta P = 0,04$ атм., что даст вертикальные ускорения салона до 0,4 м/с²), то высота такого зазора должна быть в центральной части не менее 50 мм. А чтобы воздух быстро не

«уходил», щель по краям должна быть «мягкой» (должна быть уплотнена) и иметь высоту 2—3 мм. При необходимости воздушная полость может быть выполнена вообще герметичной, но тогда забор воздуха в юнибус и его сброс должны осуществляться через специальные воздухоборники, что увеличит стоимость юнибуса и ухудшит его аэродинамику. Такая воздушная подвеска может быть как активной (с компрессором), так и пассивной, и будет работать в двух направлениях — на «выдох» и на «вдох».

Аэродинамический подвес

Для регулирования величины вертикальной динамической нагрузки на путь, можно использовать также аэродинамические силы, например, изменяемую геометрию юнибуса. Наиболее простой способ — установить над юнибусом небольшое поворотное крыло, позволяющее прижимать юнибус с усилием до 400 кгс, либо приподнимать с таким же усилием. Однако это увеличит стоимость юнибуса минимум на 50 тыс. USD и увеличит мощность его привода на 50—100 % и более, т.е. при высокоскоростном движении — на 150—200 кВт и более. Такой способ достаточно экзотичен и весьма затратен, поэтому нецелесообразен.

4. Заключение

В табл. 1 представлены все основные типы подвесок различных масс друг относительно друга, имеющихся в высокоскоростном юнибусе: от упругой деформации обода колеса и головки рельса в пятне контакта, до физиологической упругой «подвески» головы человека, сидящего в кресле (или стоящего), т.к. именно вестибулярный аппарат, находящийся в голове пассажира, а не что иное, и будет определять комфортность высокоскоростного движения в СТЮ. Поскольку комфортность — это не только плавность хода, но и низкий уровень шумов (от инфразвука до ультразвука) и вибраций, то в табл. 1 также приведены характеристики их источников (кроме привода юнибуса). Кроме того, необходимо отметить, что, помимо подвесок различных масс в юнибусе, сам юнибус будет подвешен к путевой структуре, т.к. он движется по плоской рессоре (пружине), каковой является рельс-струна, со свободным ходом около 30 мм, при этом сам рельс подпружинен — он установлен на каждой опоре на упругой прокладке со свободным ходом 1 мм.

Поскольку, в отличие от автомобильных и железных дорог, характер неровностей пути в СТЮ задается еще на стадиях проектирования и строительства, то необходимо, при проектировании высокоскоростного юнибуса с жёсткой подвеской, определить комфортную зону неровностей: их максимальную амплитуду, а также рекомендуемую длину волны. При шаге опор в 30 м длина волны регулярных неровностей может быть как 30 м, так и в 2 раза большей — 60 м. Последнее легко осуществить, если строительный подъем через каждый пролет выполнить иным, чтобы, например, на нечетных пролетах при проезде юнибуса была бы нисходящая ветвь синусоиды («ямка»), а на четных — восходящая ветвь («бугор»). При этом, поскольку длина волны возрастет до 60 м, то на скорости 100 м/с частота колебаний юнибуса будет в более комфортной зоне 1,7 Гц, а допустимая амплитуда колебаний может быть увеличена в 4 раза.

Таблица 1

Характеристики основных типов подвесок в высокоскоростном юнибусе

Схема подвешивания массы, перемещаемой в вертикальном направлении	Характерная длина участка пути, мм	Условная недепрессоренная масса (на одно колесо), кг	Величина вертикального перемещения, мм	Свободный ход условной подвески, мм	Максимальное вертикальное ускорение перемещаемой массы, м/с ²	Характерная частота колебаний, Гц	Примечание
1. Упругая деформация обода колеса и головки рельса в пятне контакта длиной 1 мм и шириной 80 мм	1	0,001	0,001	0,001	1000	10 ⁵	Демпфирует шероховатости рабочих поверхностей обода колеса и головки рельса. Генерирует высокочастотные колебания, не воспринимаемые ухом человека (на ж.д., где длина пятна контакта около 10 мм, эти колебания, но уже с частотой 10 ⁴ Гц, человек слышит; при этом мощность такого звучания будет на два порядка выше, чем в СТЮ, как из-за увеличенной на порядок длины контакта и объема демпфируемого материала, так и из-за на порядок более высоких контактных напряжений)
2. Упругая изгибная деформация участка обода колеса в зоне контакта (обод становится не круглым, а эллиптическим)	10	1	0,01	0,1	100	10 ⁴	Демпфирует микронеровности пути высотой до 0,01 мм на длине пути порядка 10 мм. Генерирует звуки высокой частоты, воспринимаемые ухом человека
3. Упругая деформация резиновой прокладки между ободом и ступицей колеса	100	10	0,1	0,1	10	10 ³	Сглаживает микронеровности пути высотой до 0,1 мм на участке длиной порядка 100 мм. Порождает звуки средней частоты, слышимые человеком
4. Упругая деформация подвески колеса относительно рамы (нижней части юнибуса)	1000	50	1	10	1	10 ²	Сглаживает микронеровности пути высотой до 1 мм на участке длиной порядка 1 м. Порождает низкочастотные звуки,

							слышимые человеком
5. Дополнительная* упругая подвеска: изгибная деформативность каркаса и корпуса юнибуса в продольном и поперечном направлениях (работают как рессоры с относительной жёсткостью 1/400)	60000	200	0,2	10 мм в центре салона	0,2	1,7	Демпфирует вертикальные колебания салона
6. Дополнительная* воздушная подвеска (воздушный зазор между нижней и верхней частями юнибуса)	60000	200	1	50 мм	0,2	1,7	Демпфирует вертикальные колебания салона
7. Упругая деформация подвески салона (верхней части юнибуса относительно рамы)	60000	200	1	50	0,2	1,7	Сглаживает микронеровности пути на пролете. Порождает низкочастотные колебания, не воспринимаемые человеком
8. Упругая деформация подвески пассажирских кресел	60000	250	0,3	20	0,15	1,7	Демпфирует вертикальные колебания салона юнибуса, не воспринимаемые вестибулярным аппаратом человека
9. Физиологическая упругая «подвеска» головы человека, сидящего в кресле (упругое сжатие ягодиц и позвоночного столба)	60000	150	0,1	10	0,1	1,7	Демпфирует вертикальные колебания кресла, воспринимаемые вестибулярным аппаратом человека**

Например, амплитуда ± 2 мм для длины волны 30 м даст такие же вертикальные ускорения в салоне, что и амплитуда ± 8 мм для длины волны 60 м (дополнительную деформативность пролета, равную ± 8 мм, при этом создадут отклонения веса юнибуса в ± 740 кгс, поэтому массу юнибуса в таком случае не будет необходимости регулировать, т.к. отклонения масс порожнего и заполненного пассажирами юнибуса составят ± 325 кг от среднего значения, что создаст дополнительную деформативность пути в $\pm 3,2$ мм; еще $\pm 4,2$ мм создаст перепад температур в 90 °С, поэтому в такой трассе особенно и не нужна будет температурная регулировка). Такой вариант реализации СТЮ более целесообразен, т.к. будут снижены в 4 раза требования к точности строительства, а движение пассажиров станет более комфортным. В этой связи может быть снижена длина пролетов с 30 м до 25 м (тогда частота колебаний станет 2 Гц при скорости 360 км/ч)? Такая трасса была бы дешевле, т.к. можно было бы снизить величину натяжения струн на 17% (путевая структура в СТЮ дорожке опор примерно в 10 раз). Или, наоборот, увеличить пролет до 35 м, чтобы уменьшить частоту опор?

Такого же результата можно достичь и при одинаковом строительном подъеме на всех пролетах, но с разной длиной соседних пролетов, например, ...30 м—35 м—30 м—35 м... Могут быть и более сложные зависимости ...30 м—33 м—

* Дополнительные подвески работают совместно с подвеской верхней части юнибуса относительно нижней части (см. п.7)

** В высокоскоростном юнибусе необходимо добиться того, чтобы голова человека, с её вестибулярным аппаратом, при скорости 100 м/с двигалась по синусоидальной траектории с амплитудой до 1,5—2 мм и с частотой 1,5—2 Гц

36 м—30 м—33 м—36 м... Это, к тому же, снизит вероятность возникновения резонансов.

Комфортные характеристики регулярных неровностей в СТЮ (амплитуда неровностей относительно горизонтальной линии) необходимо определить для следующих условий:

- 1) длина волны неровностей 70 м, 60 м и 50 м;
- 2) основные подвески в юнибусе:
 - подвеска колеса относительно рамы: свободный ход подвески 10 мм;
 - подвеска верхней части юнибуса относительно нижней: свободный ход подвески 50 мм;
- 3) средняя масса юнибуса:
 - общая масса — 3000 кг;
 - сухая масса — 1900 кг;
 - масса пассажиров (8 пассажиров с багажом) — 650 кг;
 - топливо (заправка после каждых двух поездок) — 200 кг;
 - балласт — 250 кг.
- 4) Точность поддержания веса юнибуса — ± 200 кгс, из них ± 100 кгс даст топливо, ± 100 кгс — отличие в суммарном весе пассажиров.

Вариант загрузки юнибуса балластом приведен в табл. 2.

Таблица 2

Загрузка балластом высокоскоростного юнибуса

Диапазон температур рельса-струны, °С	Вес балласта, кгс		
	Сезонный (металл)	Внесезонный (вода)	Суммарный вес
от -25 до -35	700	100—0	700—800
от -5 до -25	500	200—0	500—700
от -5 до +15	300	200—0	300—500
от +15 до +35	100	200—0	100—300
от +35 до +55	0	100—0	0—100

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что вес юнибуса будет меняться от 2550 кгс (летом в сильную жару, с пустыми топливными баками) до 3550 кгс (зимой, в сильные морозы, с полными топливными баками).

Балласт необходимо крепить к раме (к нижней части юнибуса, в зоне передних и задних колес, например, в виде набора из стальных пластин (плит), или частично — в салоне к полу в виде стальных плит, оформленных как элементы пола, как в промежутке между сидениями, так, и в проходе.

При создании саморегулируемого (температурой) строительного подъема рельса-струны, можно будет обойтись и без балласта. Но необходимость в балласте может потребоваться в будущем из-за того, что при высокой скорости движения, из-за инерционности рельса-струны под колесом юнибуса, величина его динамического прогиба будет значительно, например, на 10 мм, отличаться от статического прогиба. Эту разницу придется компенсировать разовой установкой необходимого количества балласта. В будущем, когда будет чёткая теория динамики высокоскоростного СТЮ, проверенная практикой, такая перестраховка не потребуется.