

**Экспертный совет по технической политике в области проектирования,  
строительства и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных  
магистралей в Российской Федерации**

**ЭКСПЕРТИЗА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ  
ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ -  
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ.**

Услуги экспертно-консультационного сопровождения по научному обоснованию принятых в проектной документации основных технических и технологических решений с выводами о:

**I** - безопасности принятых в проектной документации технических решений.

Исполнитель по итогам обсуждения на Экспертном совете по ВСМ разрабатывает предложения и рекомендации по оптимизации основных технических и технологических решений, уточнению требований к ним; по проведению технико-экономического сравнения предлагаемых решений;

РГ «ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ» ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА ПОЛАГАЕТ, ЧТО ПРОЕКТНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ В ОСНОВНОМ МОЖЕТ БЫТЬ ОДОБРЕНА ПРИ УСТРАНЕНИИ ЗАМЕЧАНИЙ.

Отмеченные проблемы:

**1.Резонансы**

**2.Безопасность движения**

**3.Нормирование комфорта**

**4.Материалоемкость**

**5. НОРМЫ**

**ПОСЛЕ ДВУХ СОВЕЩАНИЙ И ОТВЕТА ПРОЕКТИРОВЩИКОВ  
ПРОБЛЕМЫ НЕ СНЯТЫ, НО МЫ ПРЕДЛАГАЕМ РЕШЕНИЯ**

# Требования п.6.3.14 СТУ4 **ведут к резонансу** пролетных строений (поезда Siemens Velaro или CRH380B)

↓ Нижний предел частот следует увеличить для рабочей документации

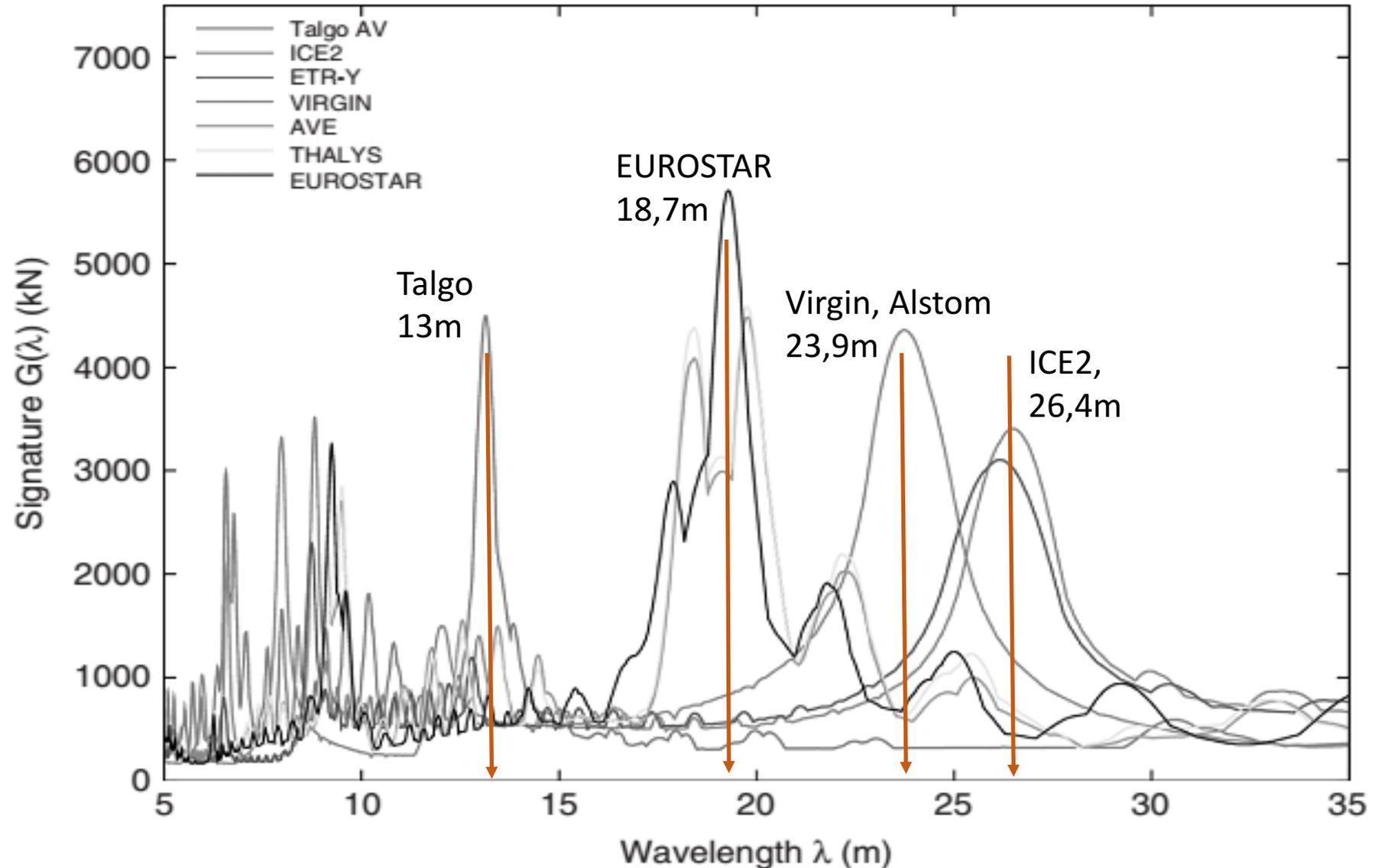
L, м	f1min, Гц	f1max, Гц	Vcr, min, км/ч	Vcr, max, км/ч
23.6	3.73	9.23	333	824
34.2*	3	7	268	625
34.2	2.97	6.91	265	617
50	2.35	5.16	210	461

СТУ, СП, прил.Е: нижний предел  $f1min$  – ограничивает частоты по признаку резонанса от периодического возбуждения, связанного с наездом тележек поезда на пролетное строение

**Эр Юань согласен с корректировкой СТУ**

# Динамическая сигнатура поездов

$$\lambda = \frac{v}{f_0},$$



# Критические скорости, вызывающие резонанс (электropоезд Сименс)

Пролетное строение, м	Частоты по EN, Гц	Изгибная частота, Гц	Крутильная частота, Гц	Соотношение частот (норма 1,2)	Соответствие СТУ по соотношению частот	Критическая скорость, км/ч
23,6		8,21/8,71	6,55/7,95	0,8/0,9	нет	585
34,2	3-7	4,28/4,68	5,25/6,48	1,23	да	381/391*
50	2,5-5	3,14/3,34	3,39/4,34	1,08	нет	280/288(295)

Эрюань:  
не опасно

# Критические скорости, вызывающие резонанс (электropоезд Сименс)

Пролетное строение, м	Частоты по EN, Гц	Изгибная частота, Гц	Крутильная частота, Гц	Соотношение частот (норма 1,2)	Соответствие СТУ по соотношению частот	Критическая скорость, км/ч
23,6		8,21/8,71	6,55/7,95	0,8/0,9	нет	585
 34,2	3-7	<u>4,28</u> /4,68	5,25/6,48	1,23	да	381/391*
50	2,5-5	3,14/3,34	3,39/4,34	1,08	нет	280/288*(295)

П.6.3.5  
СТУ4:  
+20%=420  
км/ч

25/15-2-17755П2-ТКР 7.2-РАС

Лист 41

Коэффициенты динамики			
учет резонансов	1+μ1	-	<u>3.31</u>

Лист 40, 52

\*результат проектировщика

Первая собственная вертикальная частота и допустимый диапазон:

Частота f1	раз-мер-ность	при весе		допустимый диапазон		выпол-нено	
		макс	мин	макс	мин		
при жесткости	макс	Гц	4.72	5.44	6.915	2.970	21%
	мин	Гц	<u>4.46</u>	5.14			

34м

# Критические скорости, вызывающие резонанс (электropоезд Сименс)

Пролетное строение, м	Частоты по EN, Гц	Изгибная частота, Гц	Крутильная частота, Гц	Соотношение частот (норма 1,2)	Соответствие СТУ по соотношению частот	Критическая скорость, км/ч
23,6		8,21/8,71	6,55/7,95	0,8/0,9	нет	585
34,2	3-7	4,28/4,68	5,25/6,48	1,23	да	381/391*
50	2,5-5	3,14/3,34	3,39/4,34	1,08	нет	280(295)/288

25/15-2-17755П2-ТКР 7.2-РАС

\*результат проектировщика

Лист 40, 52

Первая собственная вертикальная частота и допустимый диапазон:

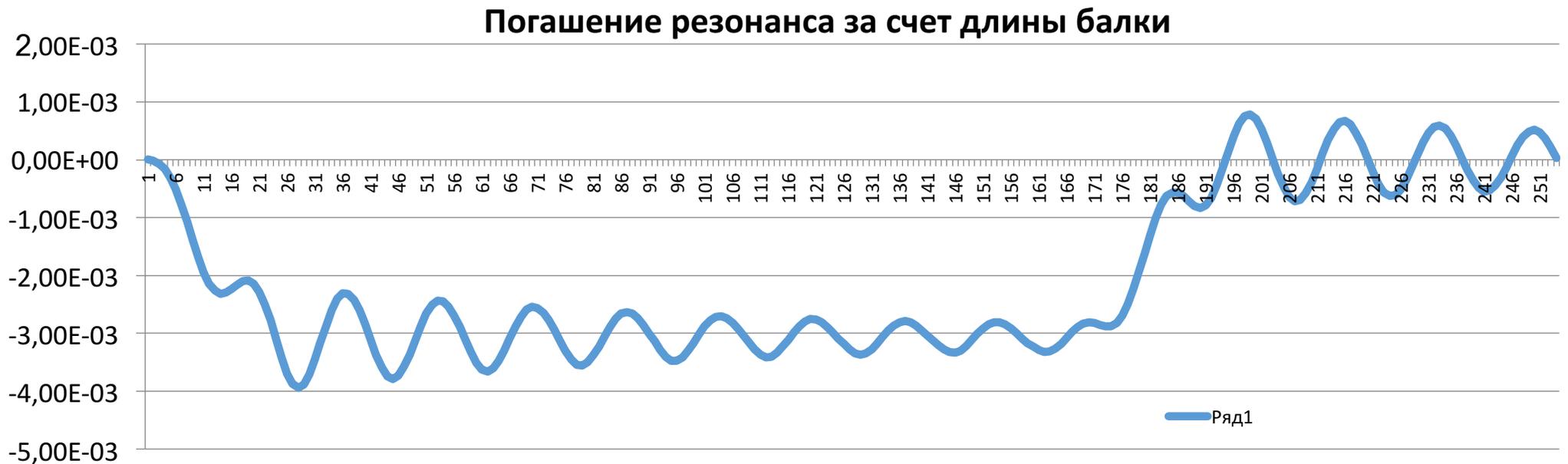
Частота $f_1$	раз-мер-ность	при весе		допустимый диапазон		выпол-нено	
		макс	мин	макс	мин		
при жесткости	макс	Гц	4.72	5.44	6.915	2.970	21%
	мин	Гц	4.46	5.14			
при жесткости	макс	Гц	3.48	3.95	5.164	2.358	23%
	мин	Гц	3.29	3.73			

34м

50м

СП, СТУ прил.Е: нижний предел  $f_{1min}$  ДОЛЖЕН ограничивать частоты по признаку резонанса от периодического возбуждения, связанного с наездом тележек поезда на пролетное строение

СТУ 6.3.15. (СП.6.3.14) Варьируя параметрами сооружения (длина пролета, жесткость, масса, схема работы), следует добиваться снижения влияния резонансных явлений (вывод резонанса за пределы расчетных скоростей)



# Резонанс

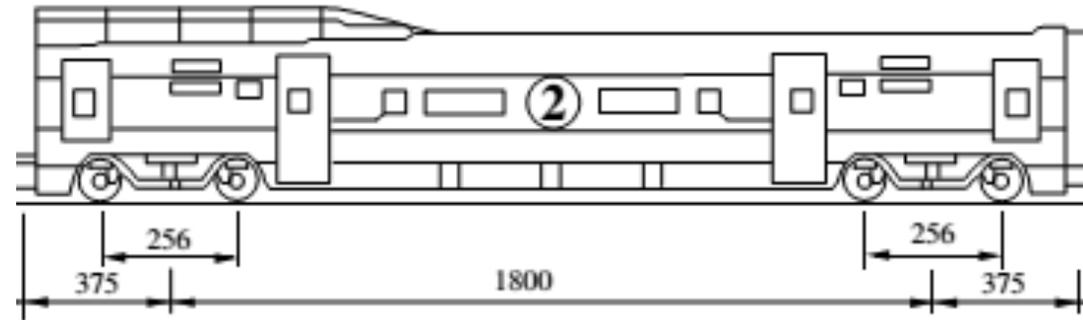
H. Xia, N. Zhang



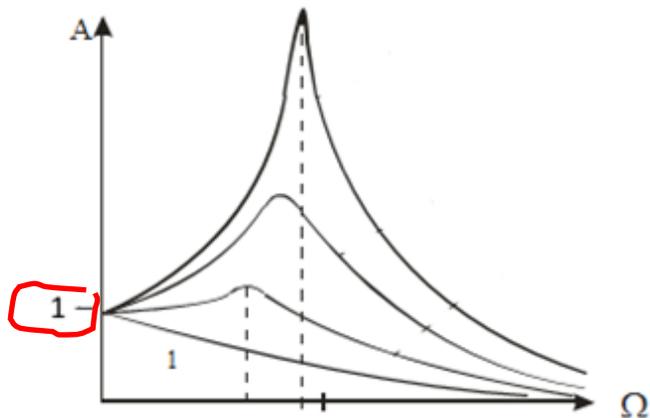
## Maximum responses of bridge girder

Bridge response	Calculation	Measurement	
		Max	Mean
<b>24m</b>			
<u>Dynamic factor <math>(1 + \mu)</math></u>	1.212	1.211	1.082

The train speed range in calculation is 160–330 km/h, and that in the experiment is 160–307 km/h



25,5m



<b>23,6m</b>	Коэффициенты динамики учет резонансов	$1 + \mu$	-	2.10
<b>34,2m</b>	Коэффициенты динамики учет резонансов	$1 + \mu$	-	3.31

п.6.4.4

использование эмпирических коэффициентов опасно

$$n_0 = 94,76L^{-0,748} \quad (6.1)$$

$$n_0 = 80/L \quad \text{for } 4\text{m} \leq L \leq 20\text{m}$$

$$n_0 = 23,58L^{-0,592} \quad (6.2)$$

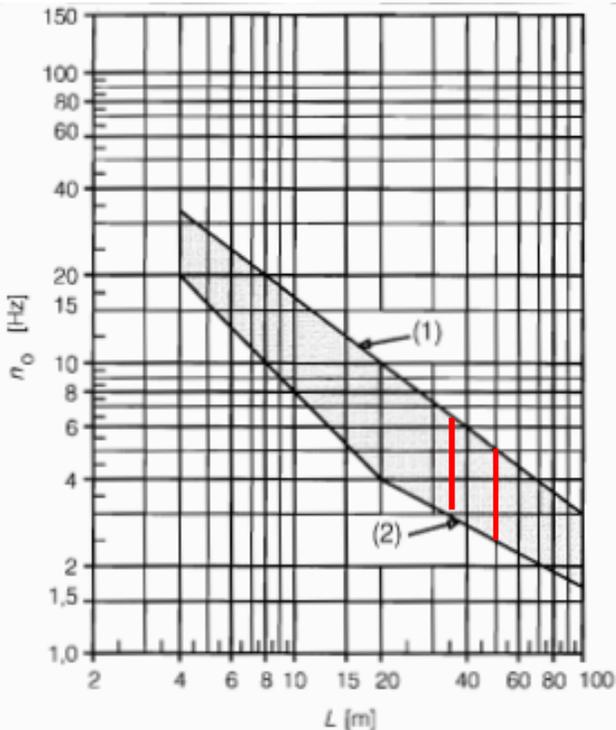
for  $20\text{m} < L \leq 100\text{m}$

$$f l_{max} = 94.76 \cdot L^{-0.748} \text{ (Гц);}$$

$$f l_{min} = \frac{80}{L} \text{ (Гц) при } 4 \leq L \leq 20 \text{ м}$$

$$f l_{min} = 23.58 \cdot L^{-0.592} \text{ (Гц) при } L > 20 \text{ м,}$$

где  $L$  м – расчетная длина пролетного строения.



6.4.4. NOTE 3 A dynamic analysis is required where the Frequent Operating Speed of a Real Train equals a Resonant Speed of the structure

6.4.6.1.1 Loading

(t)P The dynamic analysis shall be undertaken using characteristic values of the loading from the Real Trains specified. The selection of Real Trains shall take into account each permitted or envisaged train formation for every type of high speed train permitted or envisaged to use the structure at speeds over 200km/h

**6.3.10 (СП 6.3.13)** В зависимости от длины пролета и сложности динамического поведения системы поезд-пролет возможно использование двух методик и двух динамических моделей (см. таблицу 6.4):

Таблица 6.4 - Методики расчета, динамические модели и критерии их применимости

Методика	Критерии применимости	Динамическая модель <sup>3)</sup>	Учет динамики при проверках надежности	
			Учет взаимодействия поезда и пролета	Учет дефектов пути и колес
А	При отсутствии под плитой проезда мест локального изменения жесткости, удовлетворяющих критериям:	модель II	↓	
	А.1 изгибающие моменты в сплошностенчатых (плитных, коробчатых и ребристых) разрезных балках с расчетными пролетами $\leq 60$ м		$S_{din} = S_{stat} \cdot (1 + \mu_1 + \mu_2)$ умножением статических значений:	на динамический коэффициент $\mu_2$ 6.3.20
			на динамический коэффициент $\mu_1$ 6.3.18	на динамический коэффициент $\mu_2$ 6.3.20

**Эр Юань: «Резонанс допускается. При резонансе проверяется ускорение пути и прочность балки •»**

# Допускаемые соотношения скорости и частоты колебаний для обеспечения ускорения $5\text{ м/с}^2$ EN 1991-2:2003

Table F.2 - Maximum value of  $(v/n_0)_{\text{lim}}$  for a simply supported beam or slab and a maximum permitted acceleration of  $a_{\text{max}} < 5.0 \text{ м/с}^2$

Mass $m$ $10^3 \text{ kg/m}$		$\geq 5,0$ $< 7,0$	$\geq 7,0$ $< 9,0$	$\geq 9,0$ $< 10,0$	$\geq 10,0$ $< 13,0$	$\geq 13,0$ $< 15,0$	$\geq 15,0$ $< 18,0$	$\geq 18,0$ $< 20,0$	$\geq 20,0$ $< 25,0$	$\geq 25,0$ $< 30,0$	$\geq 30,0$ $< 40,0$	$\geq 40,0$ $< 50,0$	$\geq 50,0$ -
Span $L \in$ $\text{м}^a$	$\zeta$ %	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м	$v/n_0$ м
$[30,0,40,0)$	1				18,33	18,61	18,89	18,89	19,17	19,17	19,17	19,17	19,17
$\geq 40,0$	1				15,00	15,56	15,83	18,33	18,33	18,33	18,33	18,33	18,33

<sup>a</sup>  $L \in [a,b)$  means  $a \leq L < b$

для 34м и 32т/м  $V/n_1=24,7$

для 50м и 37т/м  $V/n_1=24,8$

**Балки 34,2м и 50м не соответствуют EN 1991-2:2003 по ускорению до  $5 \text{ м/с}^2$**

50м:  $V/n_0 = 78/3.14=24.8$  34м:  $V/n_0 = 106/4.28 = 24,7$

# ВОПРОСЫ ПО П.1?

## **ПРОБЛЕМЫ:**

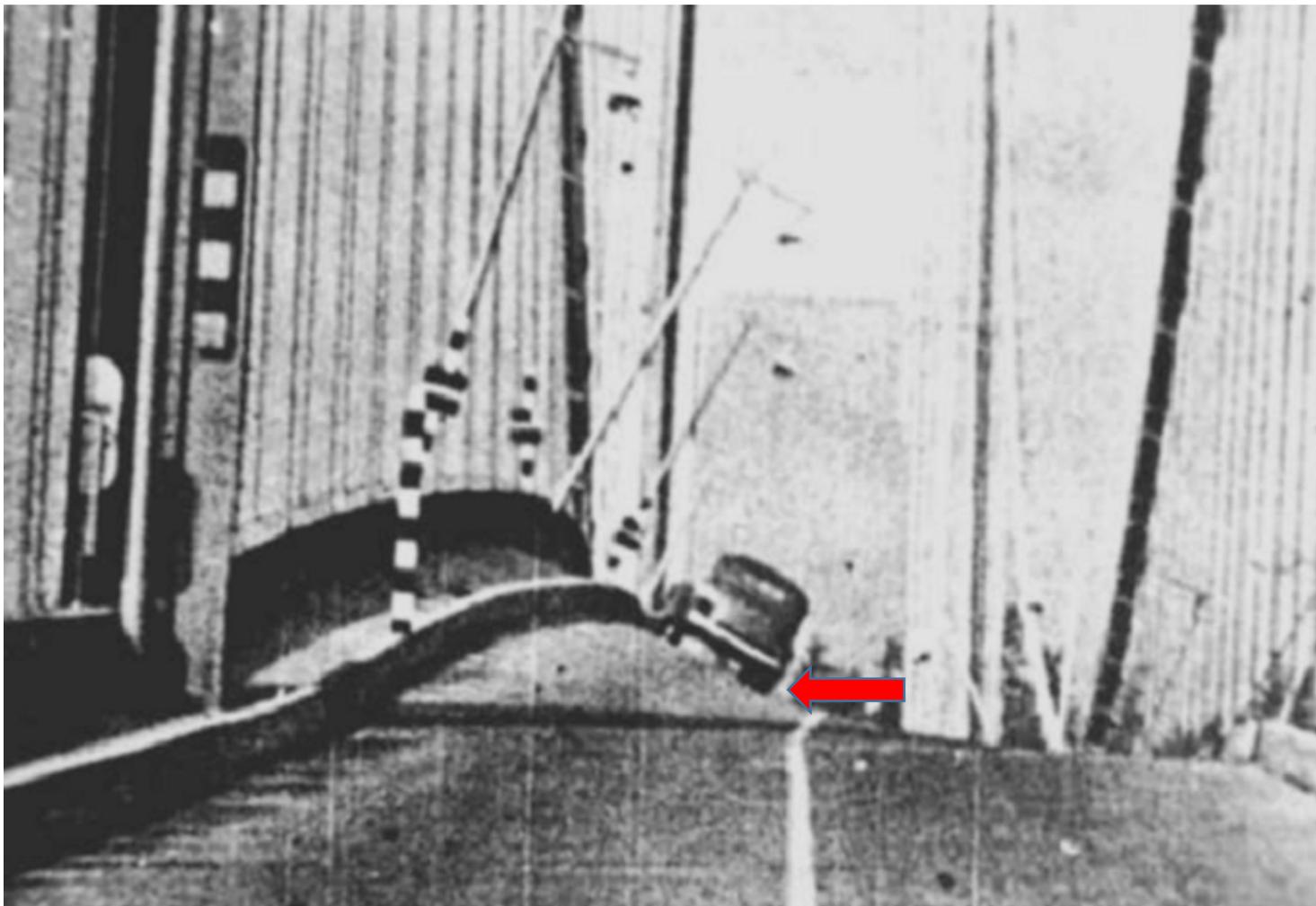
**1.Резонанс**

2.Безопасность движения

3.Нормирование комфорта

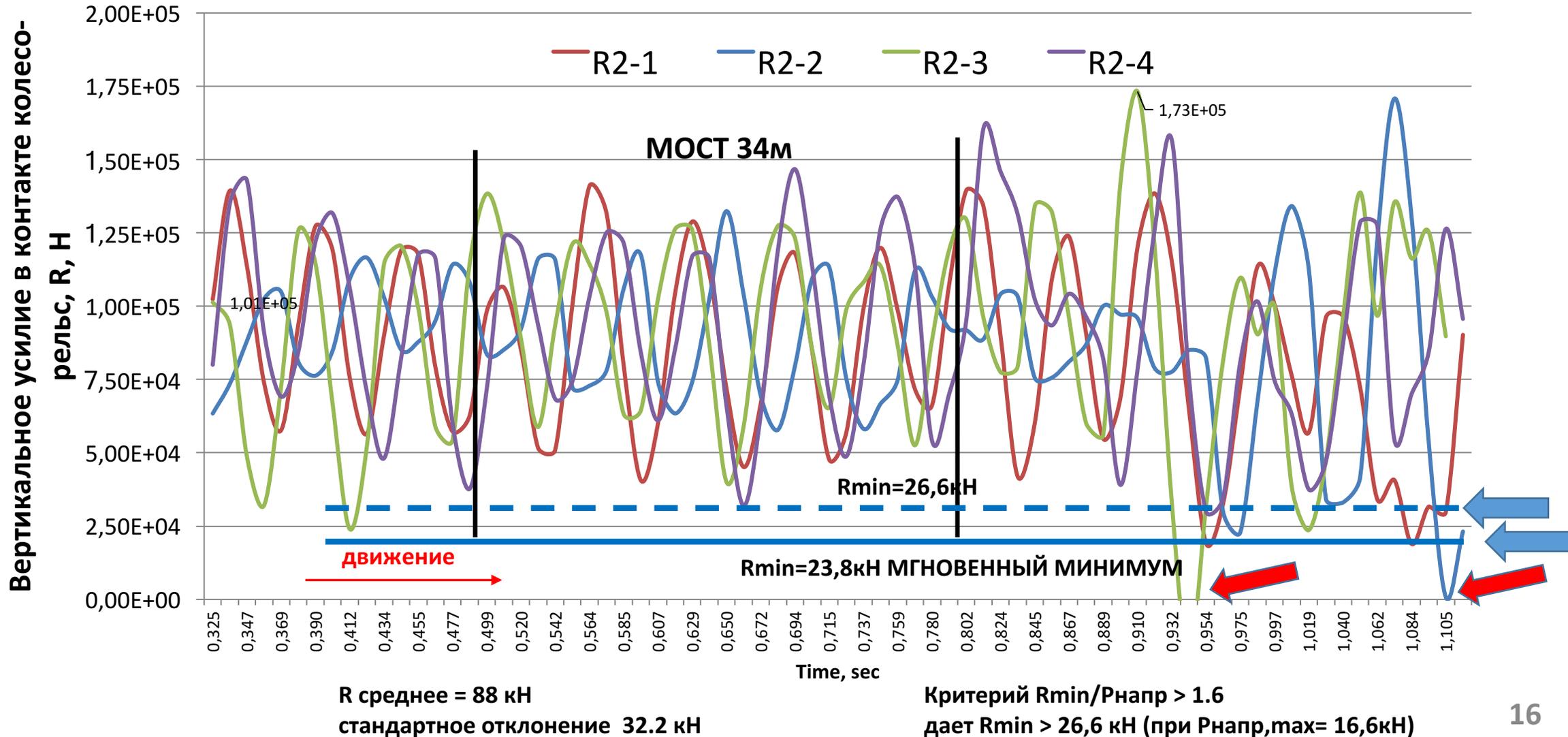
4.Материалоемкость

# Подвижной состав на мосту с резонансными колебаниями



Для удержания колеса на Рельсе при кручении необходимы достаточные силы прижатия колеса к рельсу. Горизонтальные силы возникают и по другим причинам

# Усилие в контакте 4 колес и рельса до оптимизации (поезд Сименс, 2-й вагон, 400 км/ч)



# Возможно ли падение усилия R до 0?

N. Matsumoto & K. Asanuma. Some experiences on track-bridge interaction in Japan

*Railway Technical Research Institute, Tokyo, Japan*

Figure 20 shows an example of experiment and analysis response results when the vehicle model was oscillated transversely by 5 cycles of sinusoidal displacement of 0.5 Hz. It shows threshold displacement curves to produce 3 mm uplift of wheel

**Эр Юань: «по результатам расчетов даже при скорости 420 км/ч нулевые значения вертикального усилия невозможны.»**

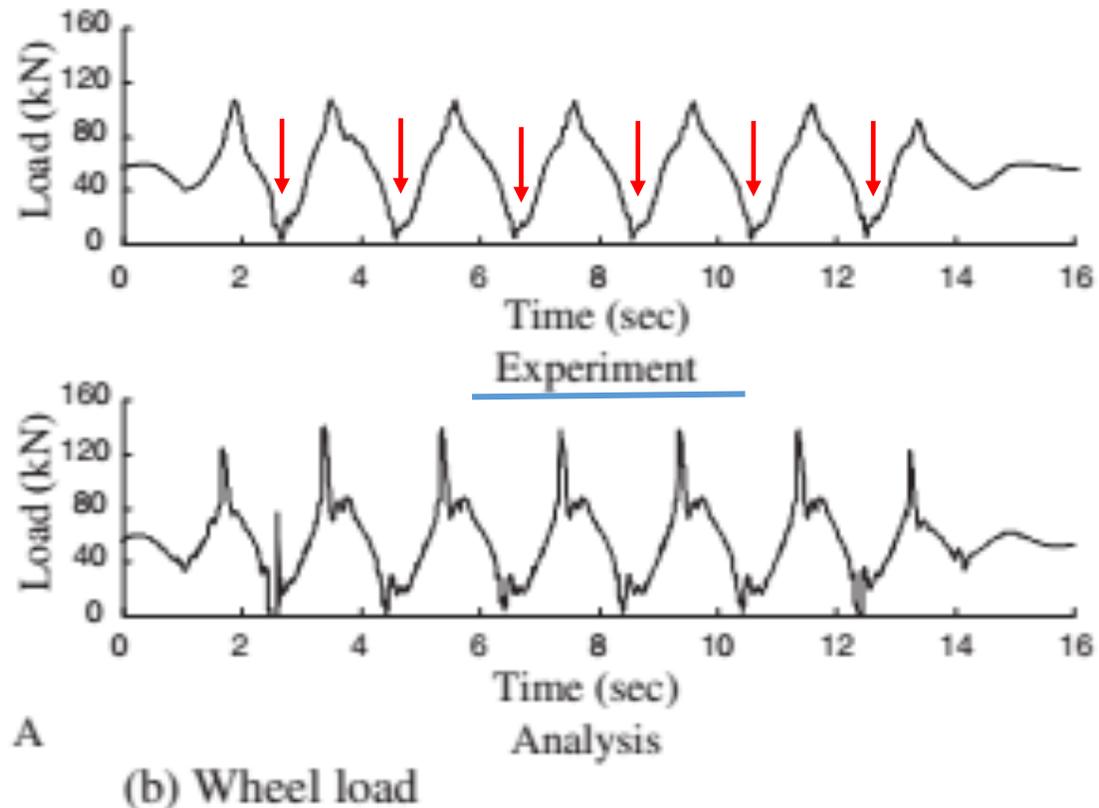
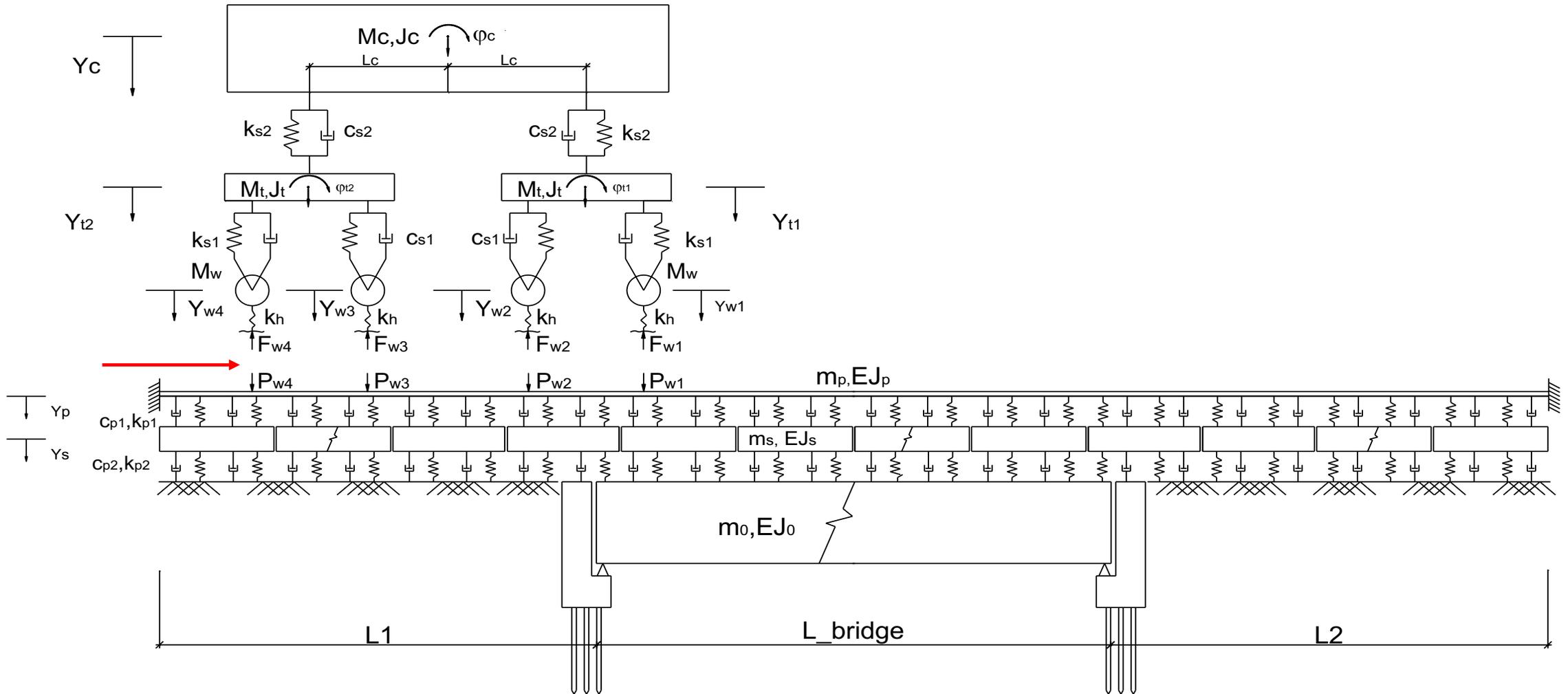
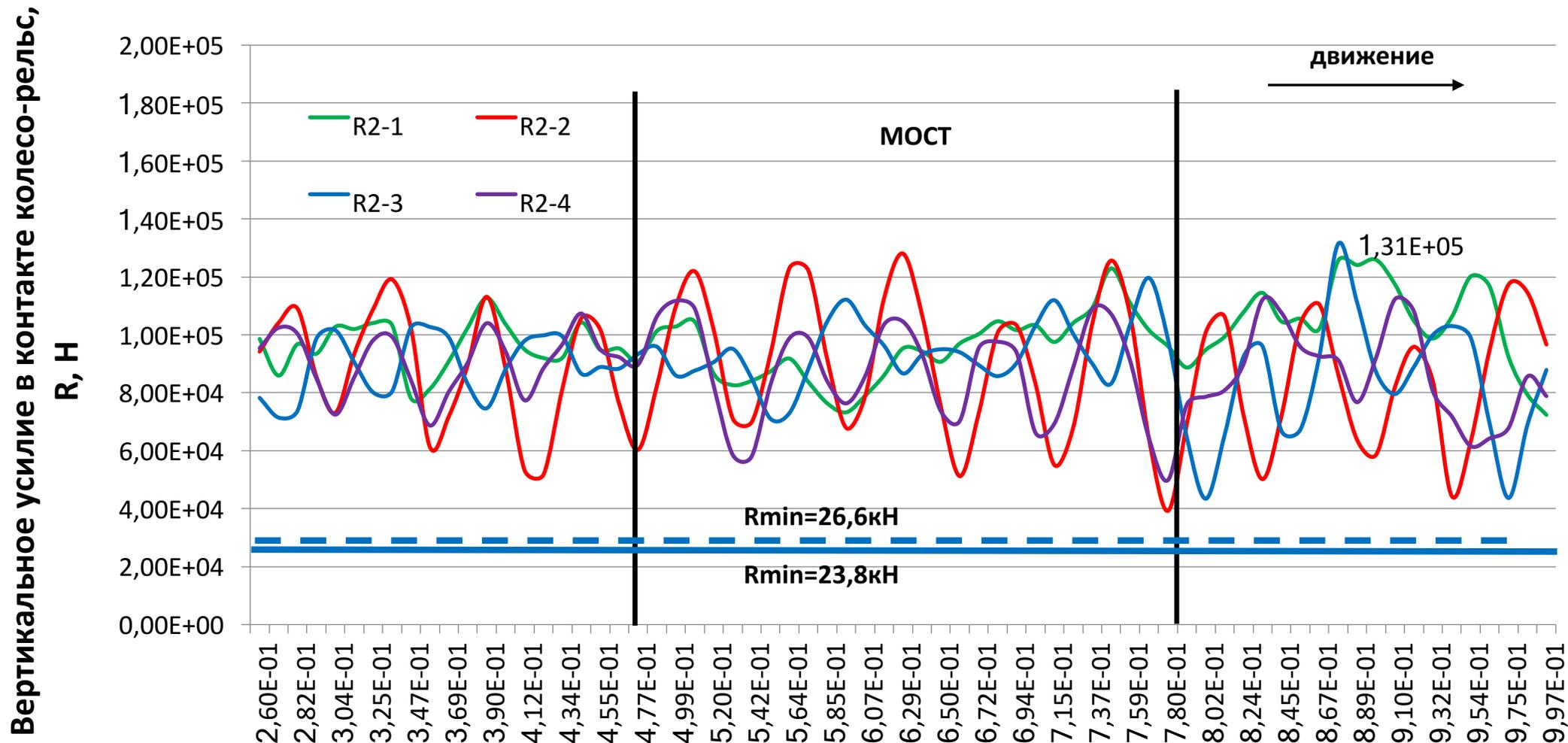


Figure 20. Comparison of wheel responses.

# Модель несущей системы («Мост-путь-экипаж»)



## Усилие в контакте колеса и рельса после оптимизации (ВТОРОЙ ВАГОН Сименс)

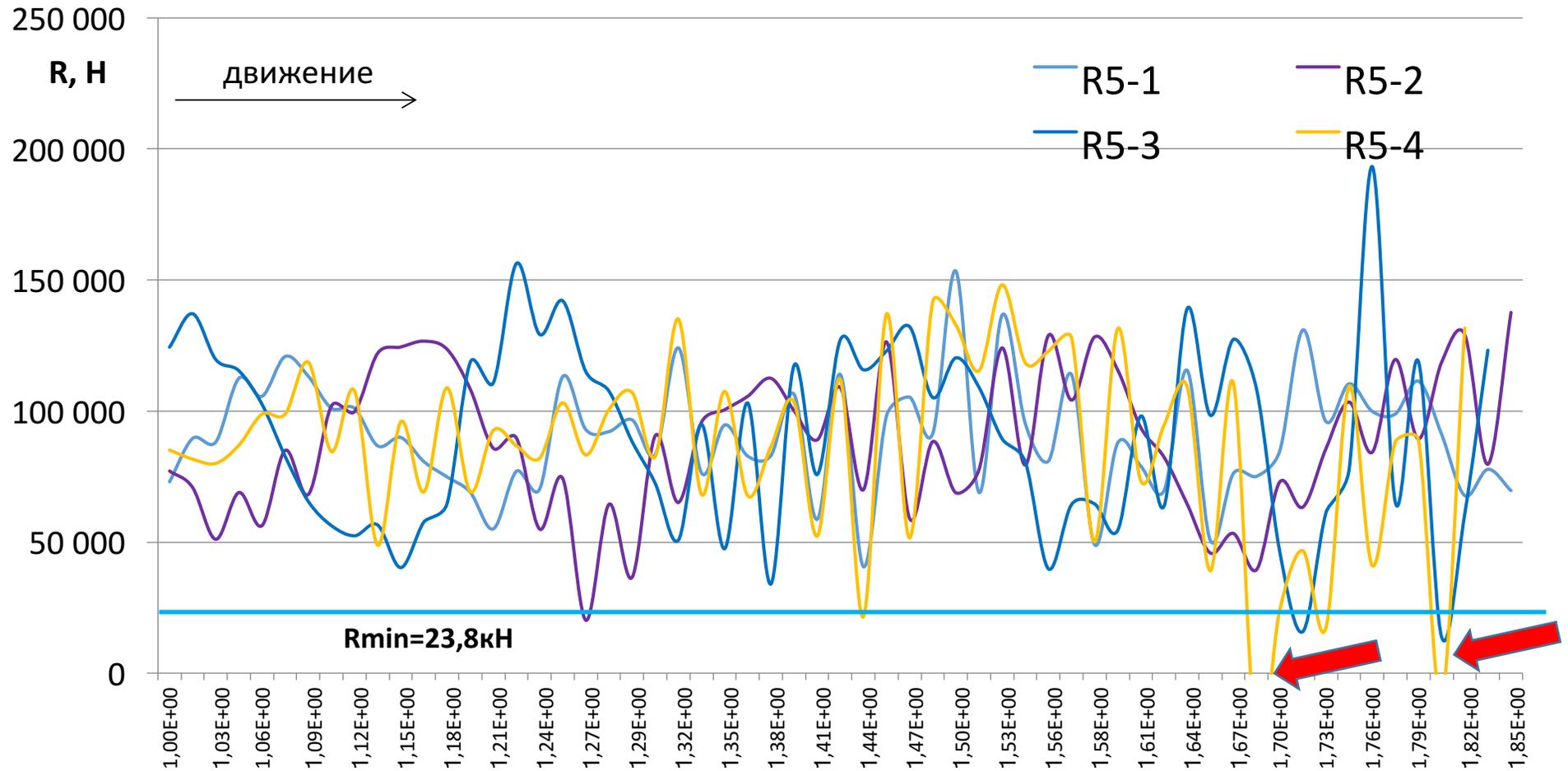


**R среднее = 91 кН**  
**СКО 16.3 кН**  
**Max 131 кН**

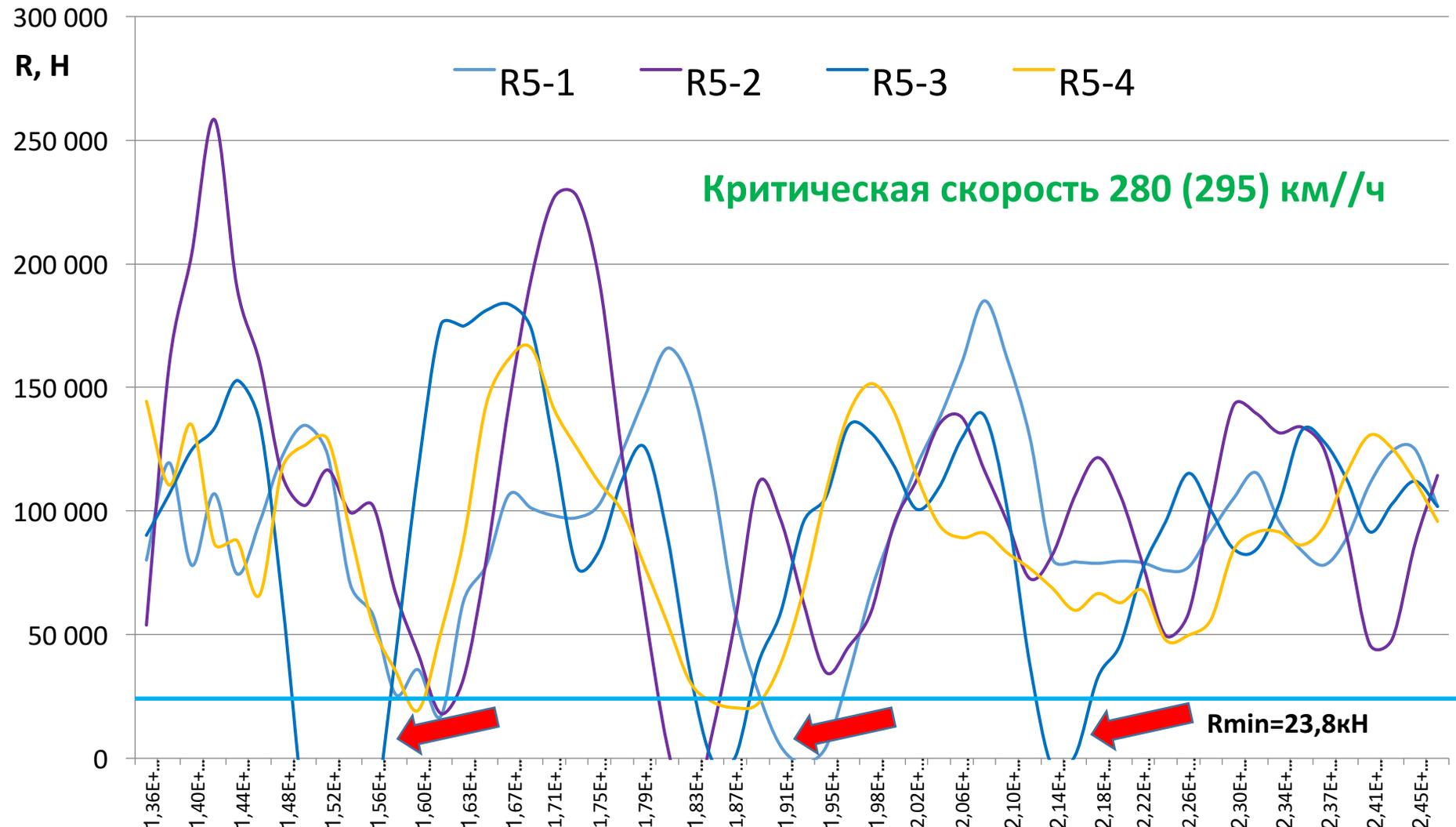
**85 кН**  
**16,6 кН**  
**127 кН**

Расчеты взаимодействия для ВСМ ББВСП  
**25.15-4-ТКР 2.5.1.**

# Усилие в контакте колеса и рельса после оптимизации (**пятый** вагон Сименс, балка 50м) при скорости **400 км/ч**



# Усилие в контакте колеса и рельса (пятый вагон ЭВС-2 балка 50м) при скорости 300 км/ч. Ухудшение при снижении скорости до критической



# Критические скорости, вызывающие резонанс (электropоезд Сименс)

Пролетное строение, м	Частоты по EN, Гц	Изгибная частота, Гц	Крутильная частота, Гц	Соотношение частот (норма 1,2)	Соответствие СТУ по соотношению частот	Критическая скорость, км/ч
23,6		8,21/8,71	6,55/7,95	0,8/0,9	нет	585
34,2	3-7	4,28/4,68	5,25/6,48	1,23	да	381/391*
50	2,5-5	3,14/3,34	3,39/4,34	1,08	нет	280/288(295)

25/15-2-17755П2-ТКР 7.2-РАС

\*результат проектировщика

Лист 40, 52

Первая собственная вертикальная частота и допустимый диапазон:

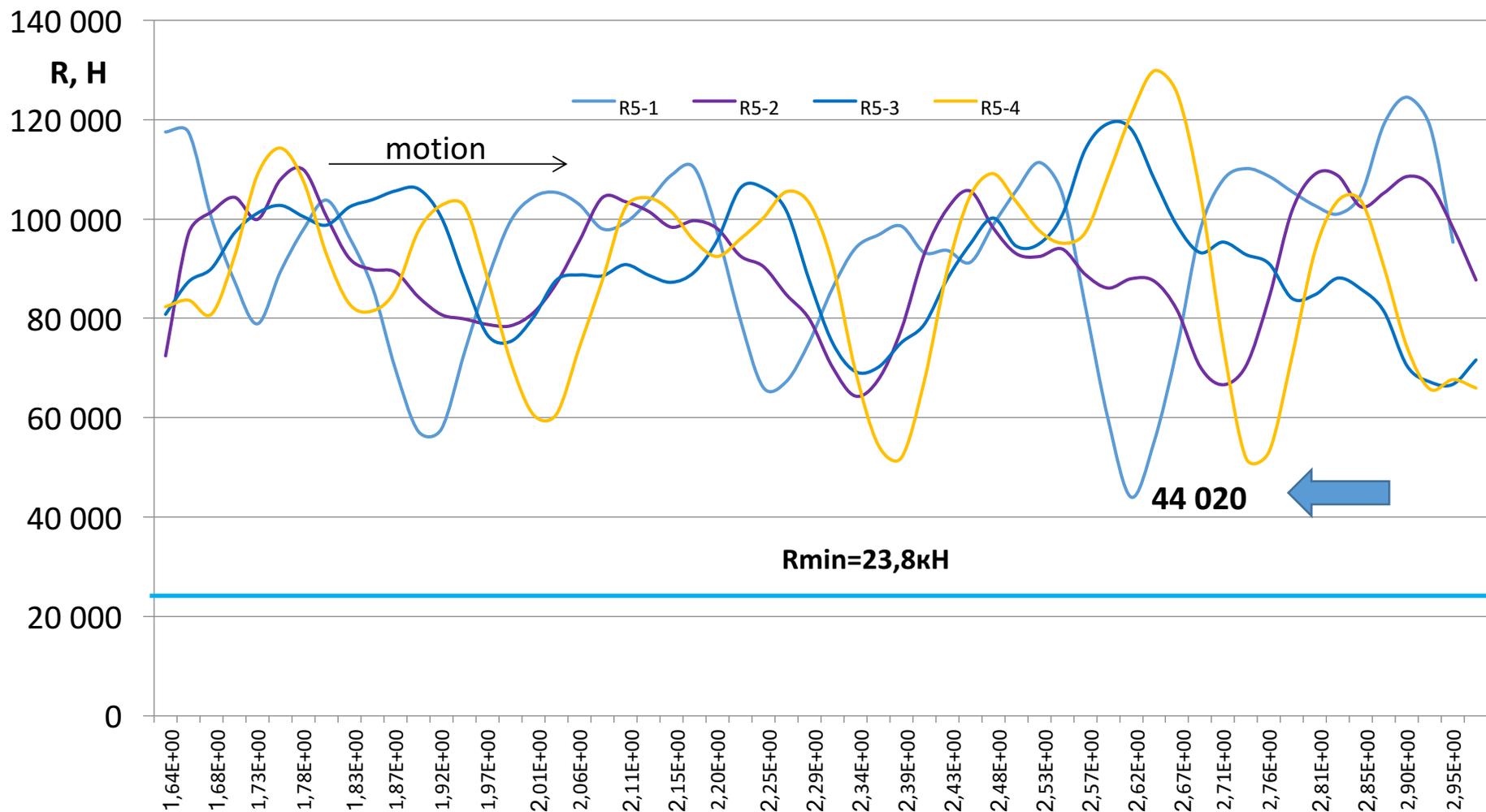
Частота $f_1$	раз-мер-ность	при весе		допустимый диапазон		выпол-нено	
		макс	мин	макс	мин		
при жесткости	макс	Гц	4.72	5.44	6.915	2.970	21%
	мин	Гц	4.46	5.14			
при жесткости	макс	Гц	3.48	3.95	5.164	2.358	23%
	мин	Гц	3.29	3.73			

34м

50м

**6.3.15.** Варьируя параметрами сооружения (длина пролета, жесткость, масса, схема работы), следует добиваться снижения влияния резонансных явлений (вывод резонанса за пределы расчетных скоростей)

# Усилие в контакте колеса и рельса (пятый вагон ЭВС-2 балка 50м) при скорости **250 км/ч**



# КОНТАКТНЫЕ УСИЛИЯ КОЛЕСО-РЕЛЬС ПРИ ОДИНАКОВОЙ ЖЕСТКОСТИ И РАЗНОМ ДЕМПФИРОВАНИИ В СКРЕПЛЕНИИ

Демпфирование  
в подрельсовых  
прокладках не  
нормируется !

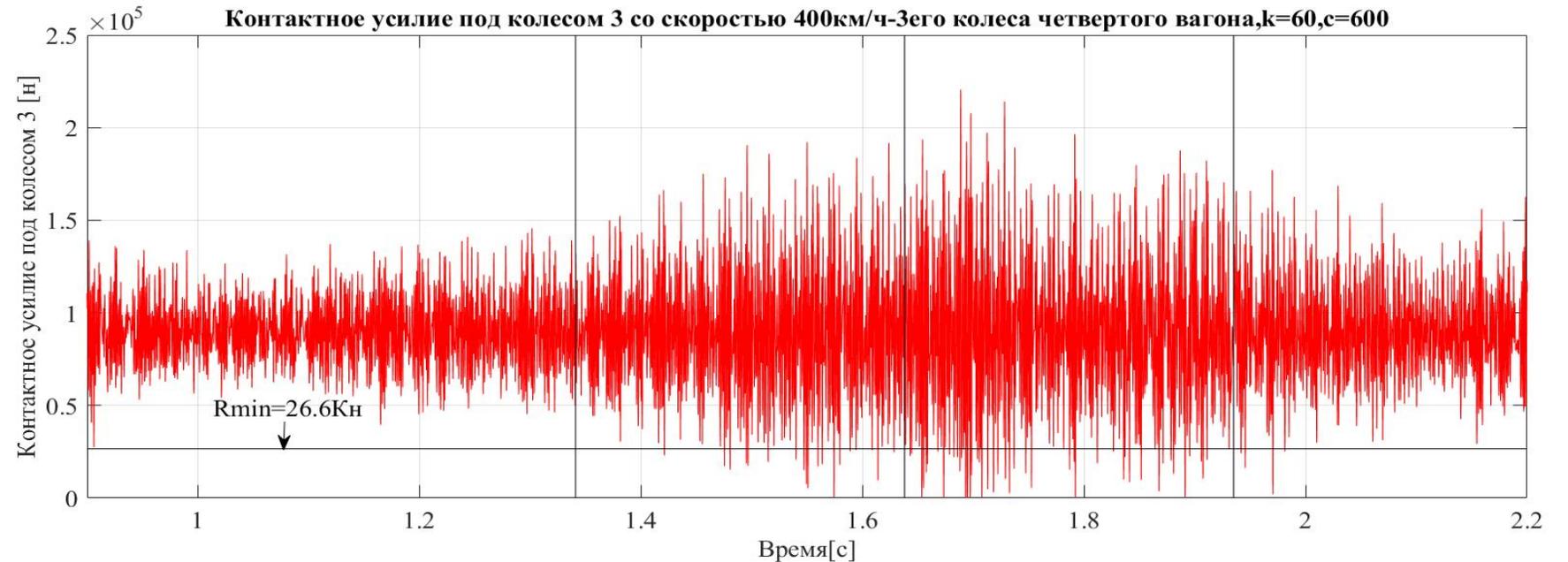
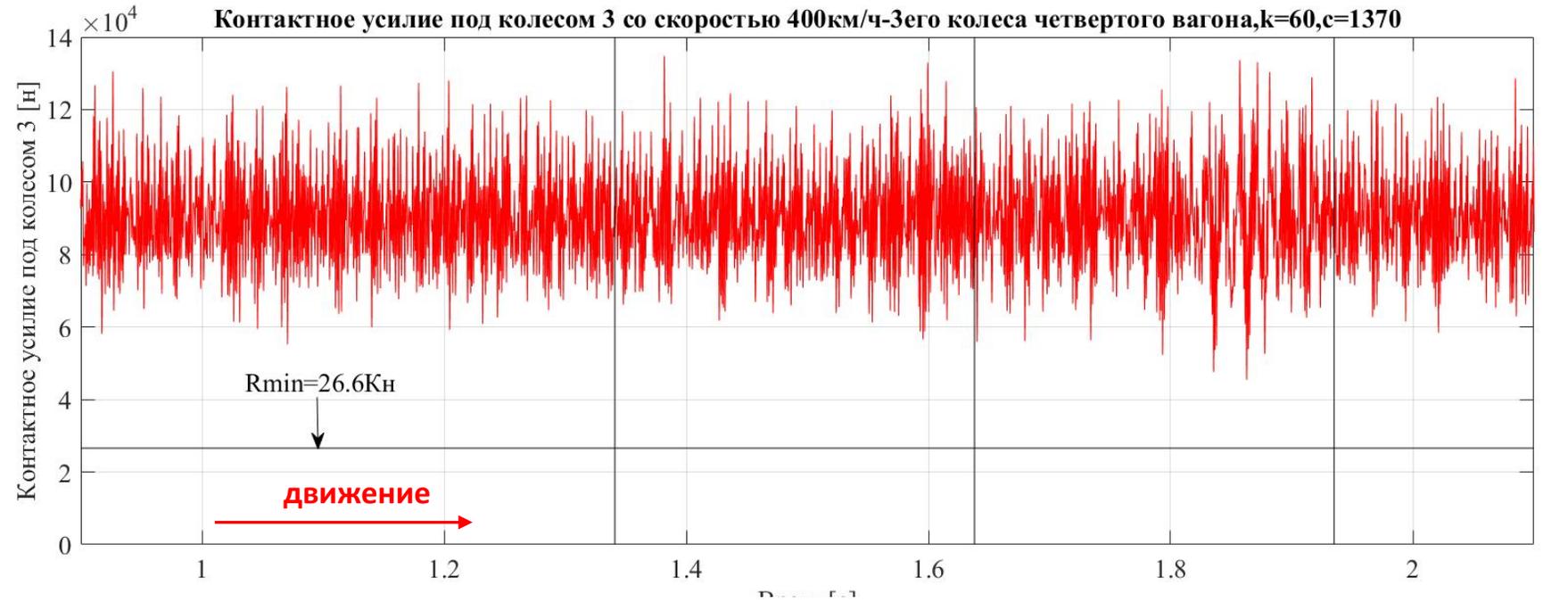


Таблица 6.5 –  
Условия  
надежности **второй**  
группы предельных  
состояний.  
(Табл.6.6 СП)

Условия надежности по предельным состояниям второй группы	Постоянные нагрузки	Вертикальная подвижная нагрузка			
		ВСП		Поезда СК	
		Число путей	Динамический коэффициент <sup>1)</sup>	Число путей	Динамический коэффициент



Критерии безопасности движения

Обезгруживание колес	да <sup>4)</sup>	1	$1 - \mu_2$ <sup>7)</sup>
----------------------	------------------	---	---------------------------

При контроле «обезгруживания» учитываются только дефекты пути и колес, но не колебания моста

Критерии комфортности проезда пассажиров

Ускорения в вагоне <sup>2)</sup>	да <sup>4)</sup>	1	1,0
----------------------------------	------------------	---	-----

<sup>7)</sup> приведено для методик А и Б.1 (см. 6.3.10);

6.3.20 Динамические эффекты, вызванные дефектами рельсового пути и несовершенствами колес поезда, могут быть учтены путем умножения результатов расчета (усилий, напряжений, ускорений, прогибов) на коэффициент  $\mu_2$ . (п.6.3.19 СП)

# Крушения поездов на ВСМ из-за схода.

Независимо от причин сход в зоне моста имеет более тяжелые последствия

Дата	Поезд	км/ч	Погибло	Пострадало	Описание аварии
14.12.92	TGV	270	-	25 на станции	Сход на стрелке
21.12.93	TGV	300	-	1(ушибы)	Сход 5 вагонов, размыв зем. полотна
05.06.00	Eurostar	250	-	7(ушибы)	Сход 4 тележек (в поезде 501 чел.)
14.11.15	TGV	243	11	16	Сход всего поезда в зоне моста,(53ч.)
03.06.98	ICE	200	101	88	Сход в зоне путепровода(287ч)
26.04.08	ICE	215	-	19	сход 12 вагонов в тоннеле
-.07.08	ICE	<200	-	-	Излом оси
17.08.10	ICE	?	-	10	Сход 2 вагонов
11.01.11	ICE	?	-	-	Сход нескольких вагонов
24.07.13	Talgo	180	79	139	Сход поезда в кривой из-за значительного превышения скорости (лимит 80 км/ч)

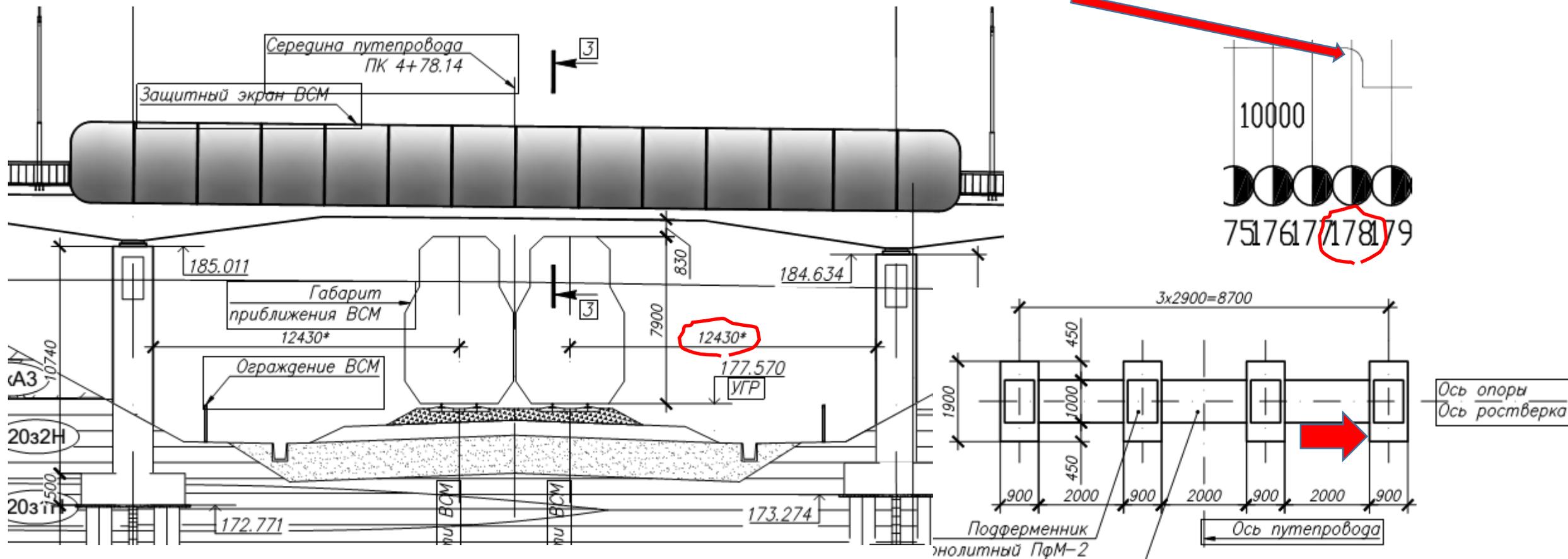
Отсутствие охранных устройств привело к обвалу  
путепровода, скорость поезда 200 км/ч



# Santiago de Compostella



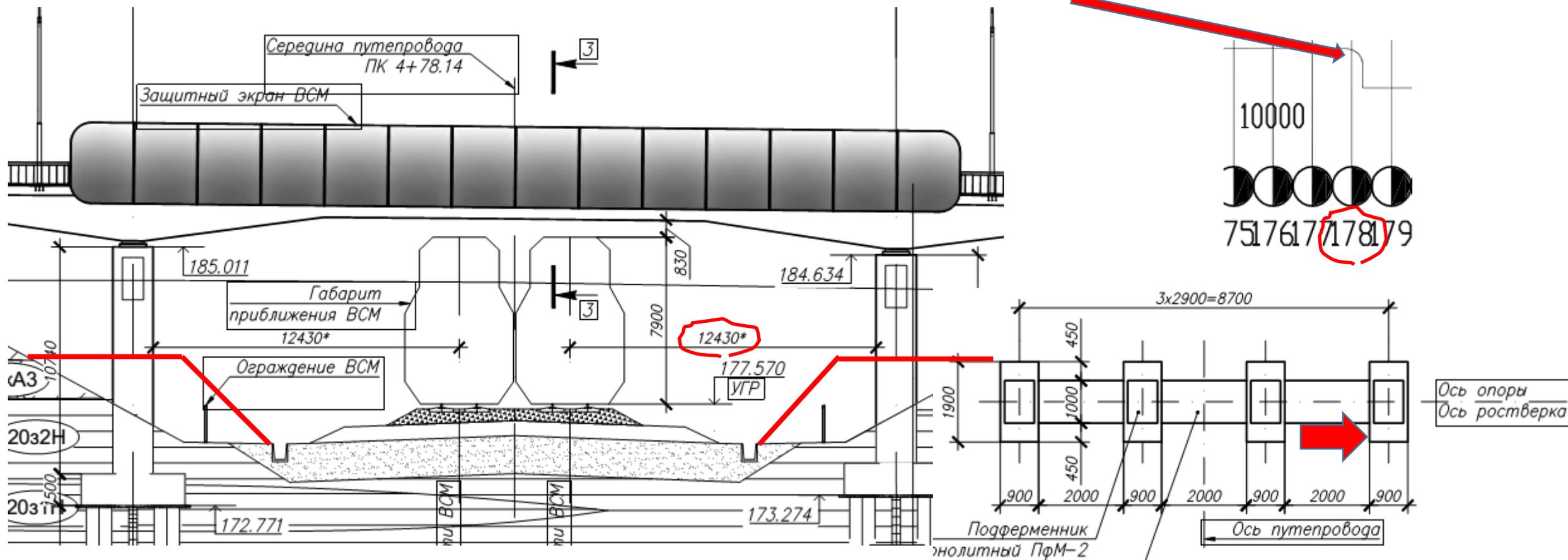
# Пересечение с АД ПК 1780+25 ограничение 400 км/ч, по кривой скорости 350 км/ч, режим тяги, вход в кривую на Москву



Аналогично пересечение с АД ПК 1843+87 по кривой скорости 350 км/ч, режим торможения

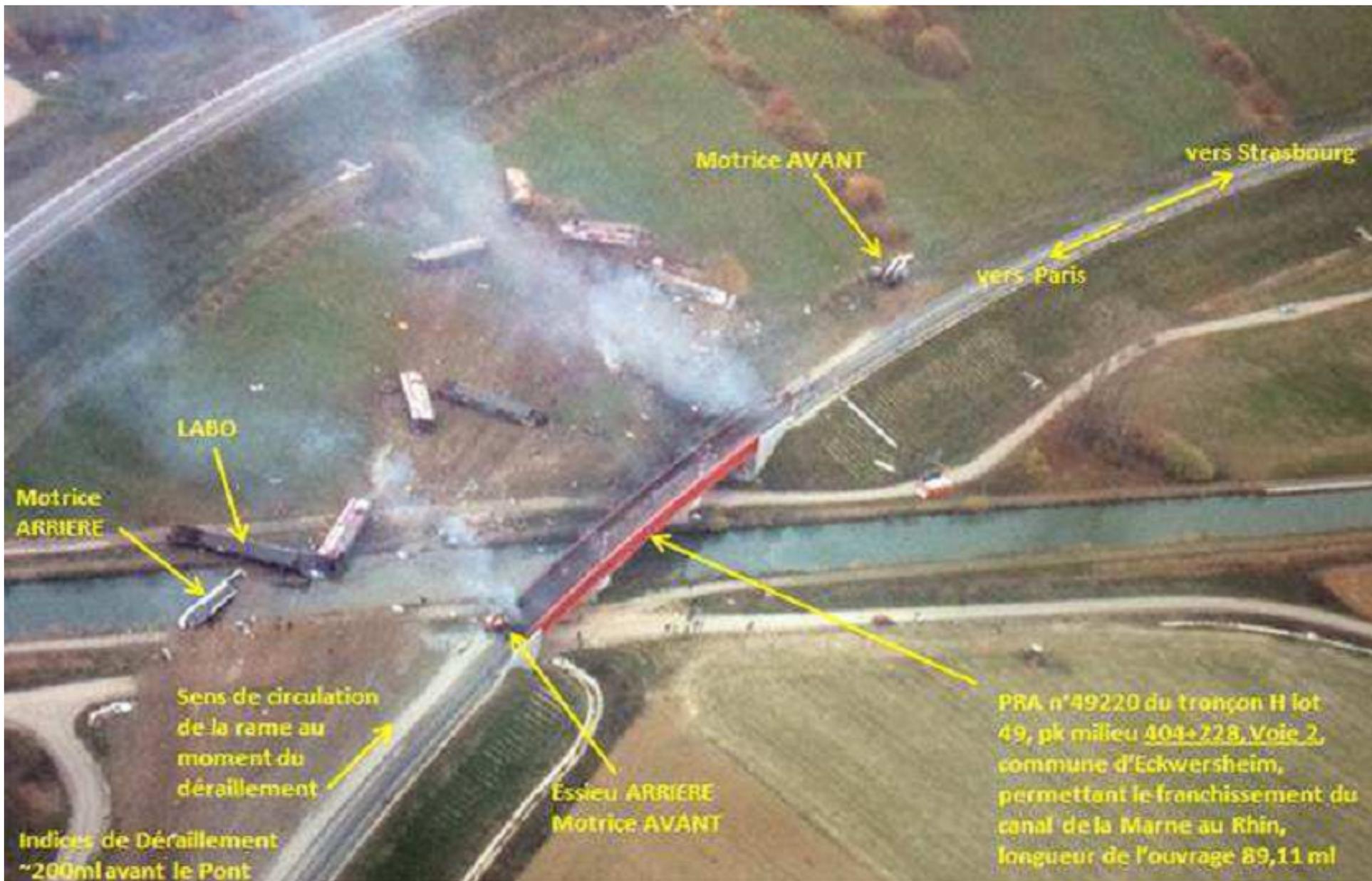
Аналогично пересечение с АД ПК 1195+43 по кривой скорости >350 км/ч (огр.400), режим тяги, вход в кривую на Казань

# Пересечение с АД ПК 1780+25 ограничение 400 км/ч, по кривой скорости 350 км/ч, режим тяги, вход в кривую на Москву



Аналогично пересечение с АД ПК 1843+87 по кривой скорости 350 км/ч, режим торможения  
Аналогично пересечение с АД ПК 1195+43 по кривой скорости >350 км/ч (огр.400), режим тяги, вход в кривую на Казань

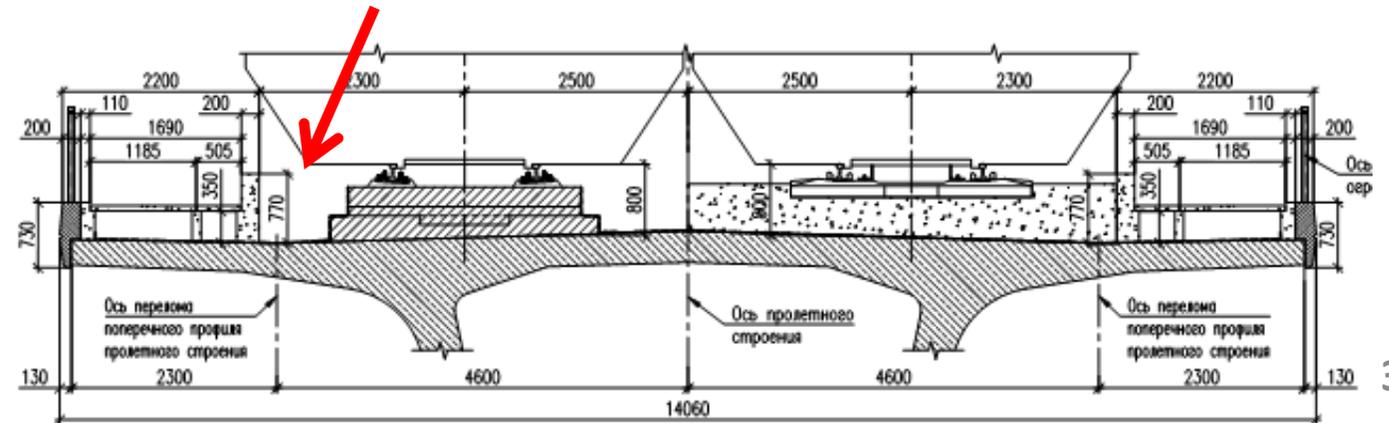
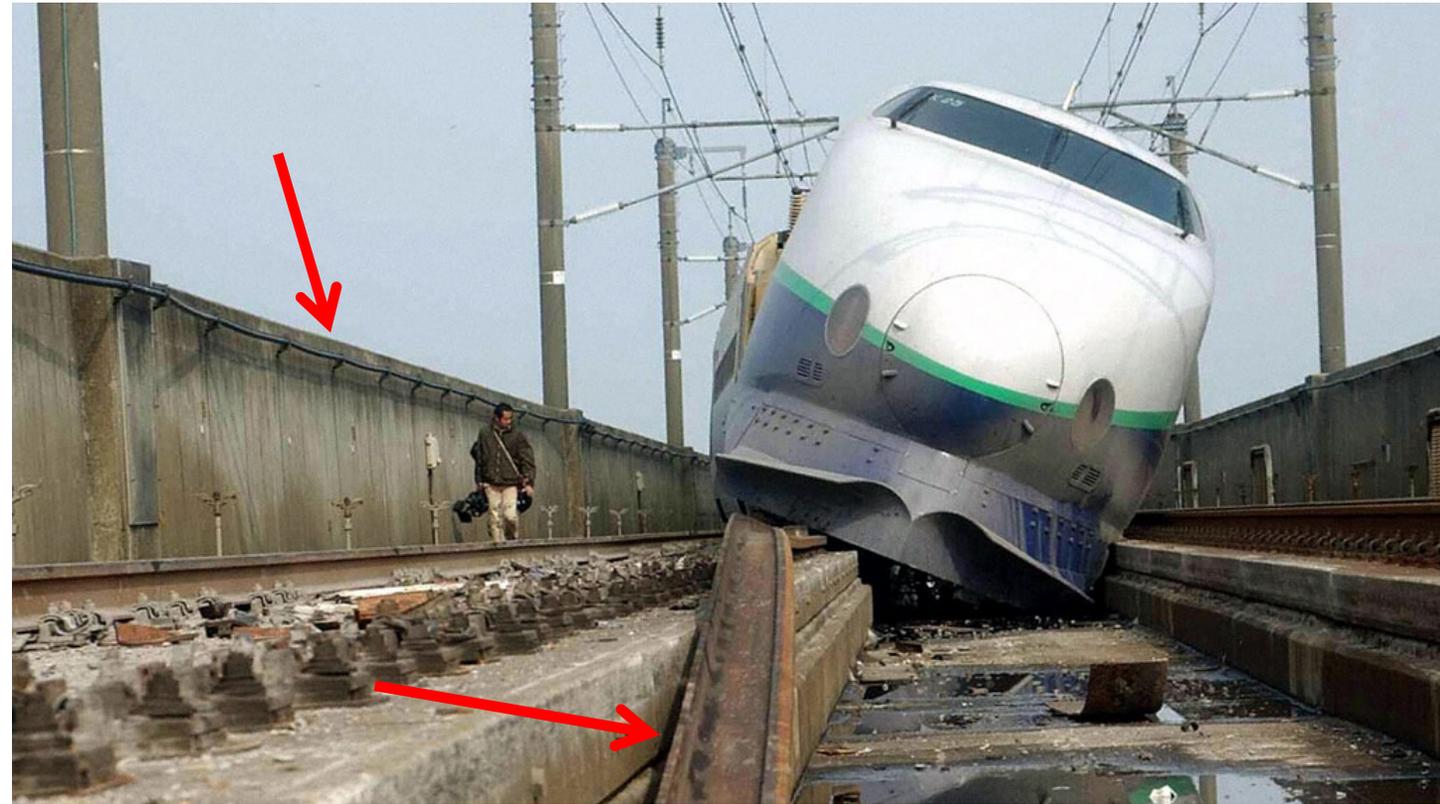
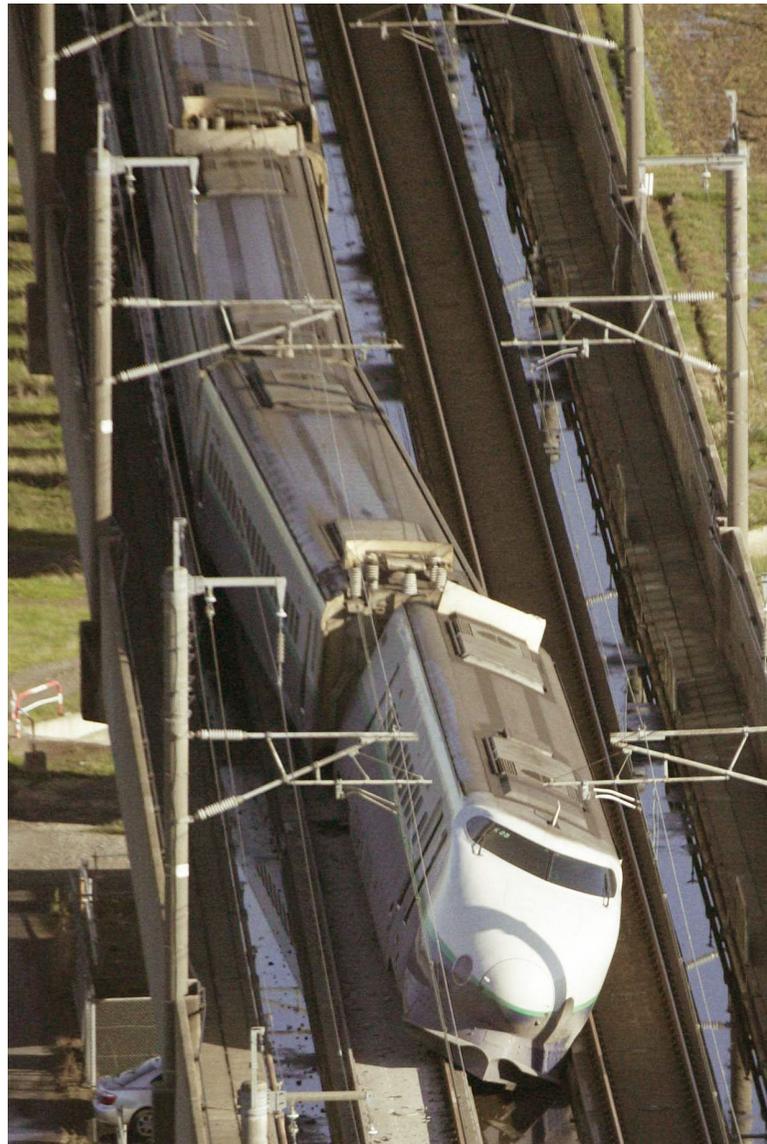
# Крушение TGV №814521 на испытаниях в ноябре 2015 из-за схода вследствие разгрузки колес ненаселенного поезда при $V=243$ км/ч



Локомотив удержали на мосту не контррельсы, а балка с ездой понизу. Унифицированные балки – с ездой поверху



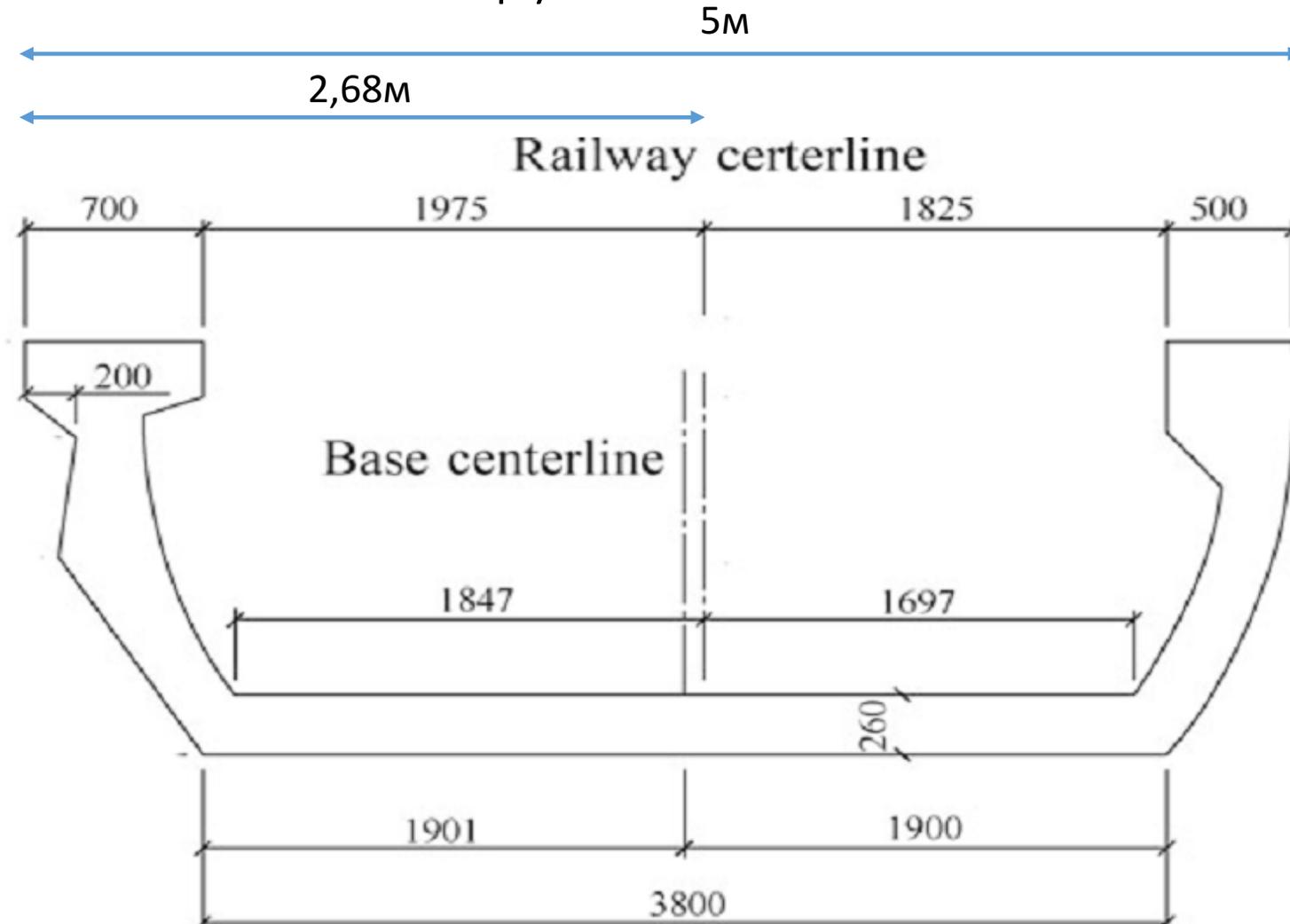
# Опыт японских ВСМ (поезд No. 325, 204 км/ч)



# Линия Пекин – Шеньян 12х32,6м

U-балка, сдерживает падение с моста.

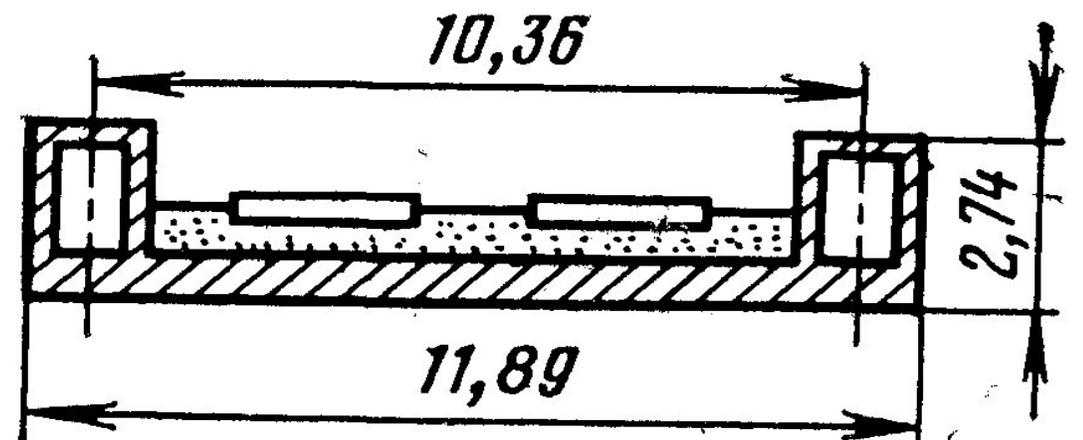
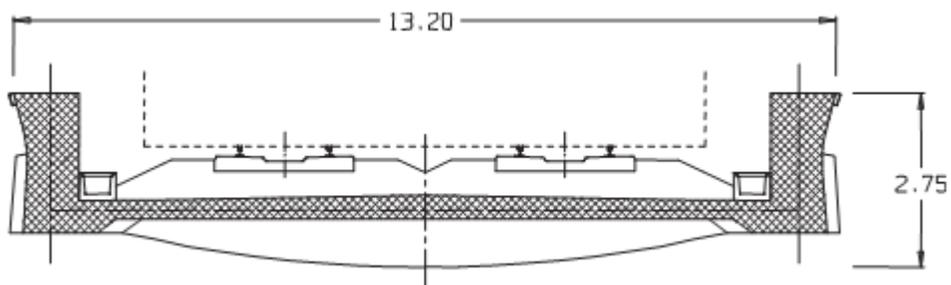
В однопутных балках нет кручения



# U балки в Европе



Modena precast deck lifted and transported on tyres from stocking area, Milano-Bologna line.



Необходимо продолжение исследований собственных парциальных частот колебаний элементов подвижного состава и резонанса при проходе через многопролетные эстакады.

**Эр Юань считает, что это дело специалистов по подвижному составу.**

Проблема не в подвижном составе – на одних балках есть резонанс, а на других - нет

Поезд	ЭВС-2		CRH380BL	
	Кузов, км/ч	Тележка, км/ч	Кузов, км/ч	Тележка, км/ч
23.6	71.4	<b>378.9</b> подпрыгивание	86.7	460.5
34.2	103.4	549.1	125.6	667.3
50	151.2	802.8	<b>183.6</b> галопирование	975.6

# ВОПРОСЫ ПО П.2?

## **ПРОБЛЕМЫ:**

1.Резонанс

**2.Безопасность движения**

3.Нормирование комфорта

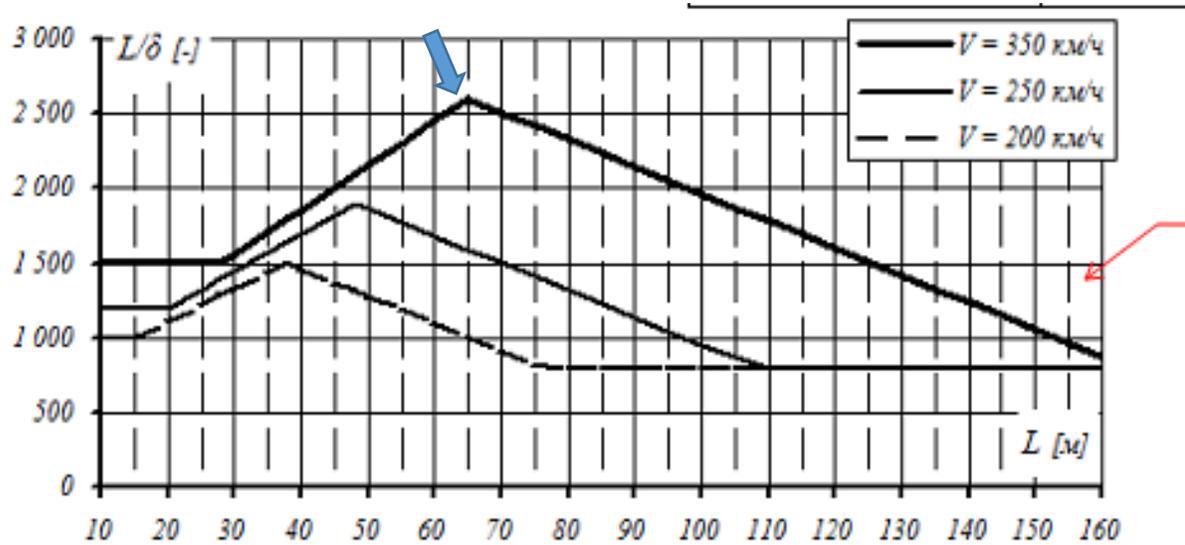
4.Материалоемкость

# Нормирование ускорений вагона по комфорту

- п.6.1.2 **СТУ1 (п.8.3.1.2 25.15-2-ПЗ 1 изм)**:
  - для пассажирских поездов на выпуклых переломах профиля – не более 0,3 м/с<sup>2</sup>; (над опорами)
  - для пассажирских поездов на вогнутых переломах профиля – не более 0,4 м/с<sup>2</sup> (в пролете)
- п. 6.4.14 **СТУ4 (6.4.16 СП)**, допускает ускорения в кузове по критерию комфорта до 1,45м/с<sup>2</sup> (0.15g)
- en.1991.2.2003: NOTE 5 Valid providing the bridge meets the requirements for the maximum coach body acceleration corresponding to **a very good standard of passenger comfort** given in EN 1990 A2.  
**<1.0 – очень хорошо**, <1.3 – хорошо    **< 0,7м/с<sup>2</sup> для пешеходов**
- 6.4.14. СТУ4.Для балочных разрезных пролетных строений, удовлетворяющих условиям А.1 и А.2 (см. 6.3.10), комфортность обеспечивается выполнением условия предельных прогибов (см. 6.4.4), и выполнение проверок предельных ускорений в вагоне не требуется.

**Эр Юань: в нормах КНР ускорение не более 1,3 м/с<sup>2</sup>**

Нормы прогибов СТУ4 соответствуют евро нормам en.1990:2002+A1:2005, но для ускорения в вагоне  $1 \text{ м/с}^2$

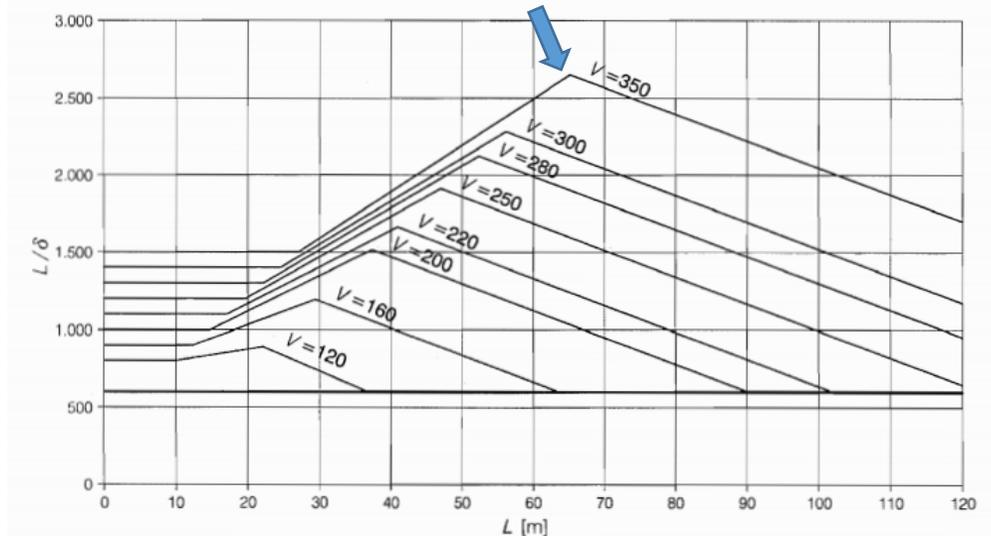


1) промежуточные значения - по интерполяции.

Рисунок 6.1 - Ограничение вертикальных прогибов для нагрузок

Проектная скорость на участке 1)	Предельный прогиб 1)
350 км/ч	$\delta \leq L/1500$ при $L \leq 28 \text{ м}$ $\delta \leq L/2600$ при $L = 65 \text{ м}$ $\delta \leq L/800$ при $L \geq 160 \text{ м}$
250 км/ч	$\delta \leq L/1200$ при $L \leq 20 \text{ м}$ $\delta \leq L/1900$ при $L = 48 \text{ м}$ $\delta \leq L/800$ при $L \geq 110 \text{ м}$

6.3.22 При расчетах по методикам А.1 и А.2 (см. 6.3.10) требования предельного обезгруживания колес поезда обеспечиваются косвенно, через контроль собственных частот (мы в резонансе) и предельных прогибов.



The factors listed in A2.4.4.3.2.(5) should not be applied to the limit of  $L/\delta = 600$ .

Figure A2.3 - Maximum permissible vertical deflection  $\delta$  for railway bridges with 3 or more successive simply supported spans corresponding to a permissible vertical acceleration of  $b_v = 1 \text{ m/s}^2$  in a coach for speed  $V$  [km/h]

«а permissible vertical acceleration of  $b_v = 1 \text{ m/s}^2$  in a coach»

**Эр Юань: согласны с корректировкой СТУ**

## Европейские реальные поезда (RT)

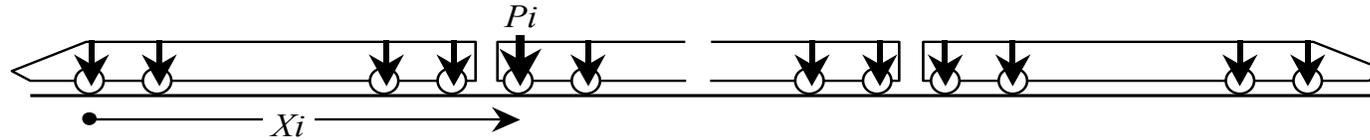


Таблица Ж.2

ICE2	ETR-Y	EUROSTAR 373-1	AVE	TALGO AV	VIRGIN	THALYS
------	-------	-------------------	-----	----------	--------	--------

<a href="#">AVE Class 100</a>	<a href="#">TGV-Atlantic</a>	<a href="#">Alstom</a>	300	1992
<a href="#">AVE Class 102, 112</a>	<a href="#">Talgo-350</a>	<a href="#">Talgo</a> <a href="#">Bombardier</a>	350	2005
<a href="#">AVE Class 103</a>	<a href="#">Velaro</a>	<a href="#">Siemens</a>	350	2006
<a href="#">AVE Class 105</a>	<a href="#">Oaris</a>	<a href="#">CAF</a>	350	2018
		<a href="#">Hitachi</a>		2017
<a href="#">VIRGIN</a>		<a href="#">Alstom</a>	200	2002
		<a href="#">Bombardier</a>		2002

[Отсутствуют TGV Sud-Est, TGV Atlantique, TGV Réseau, TGV Duplex, TGV POS, TGV Euroduplex](#)

Это влечет ошибки определения огибающей эквивалентной нагрузки

# ВОПРОСЫ ПО П.4?

## **ПРОБЛЕМЫ:**

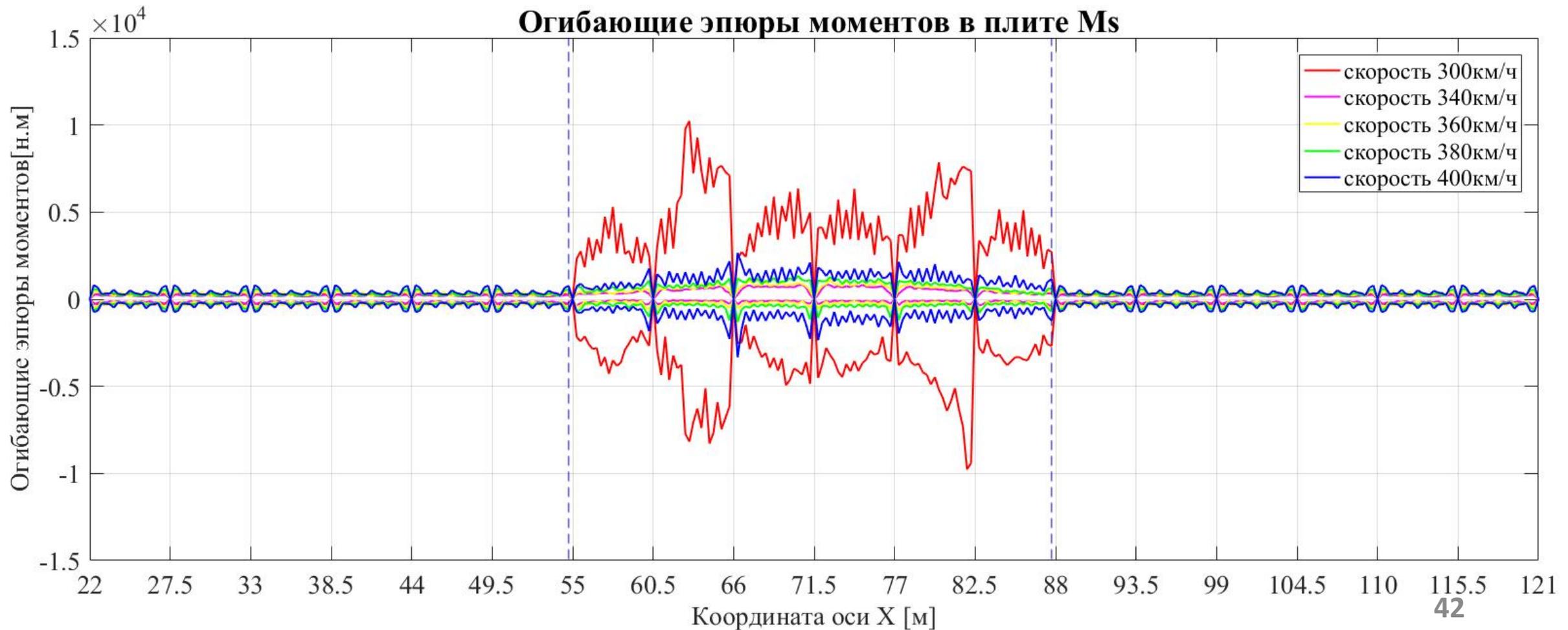
1.Резонанс

2.Безопасность движения

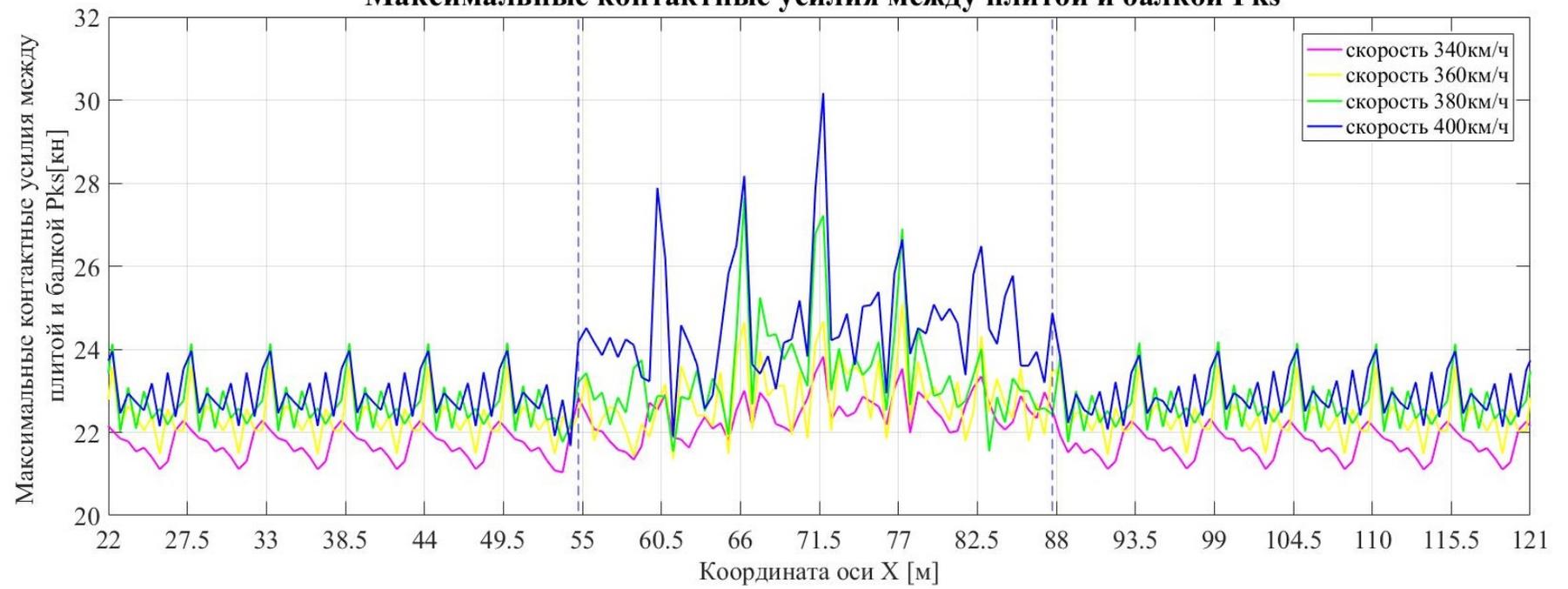
**3.Нормирование комфорта**

4.Материалоемкость

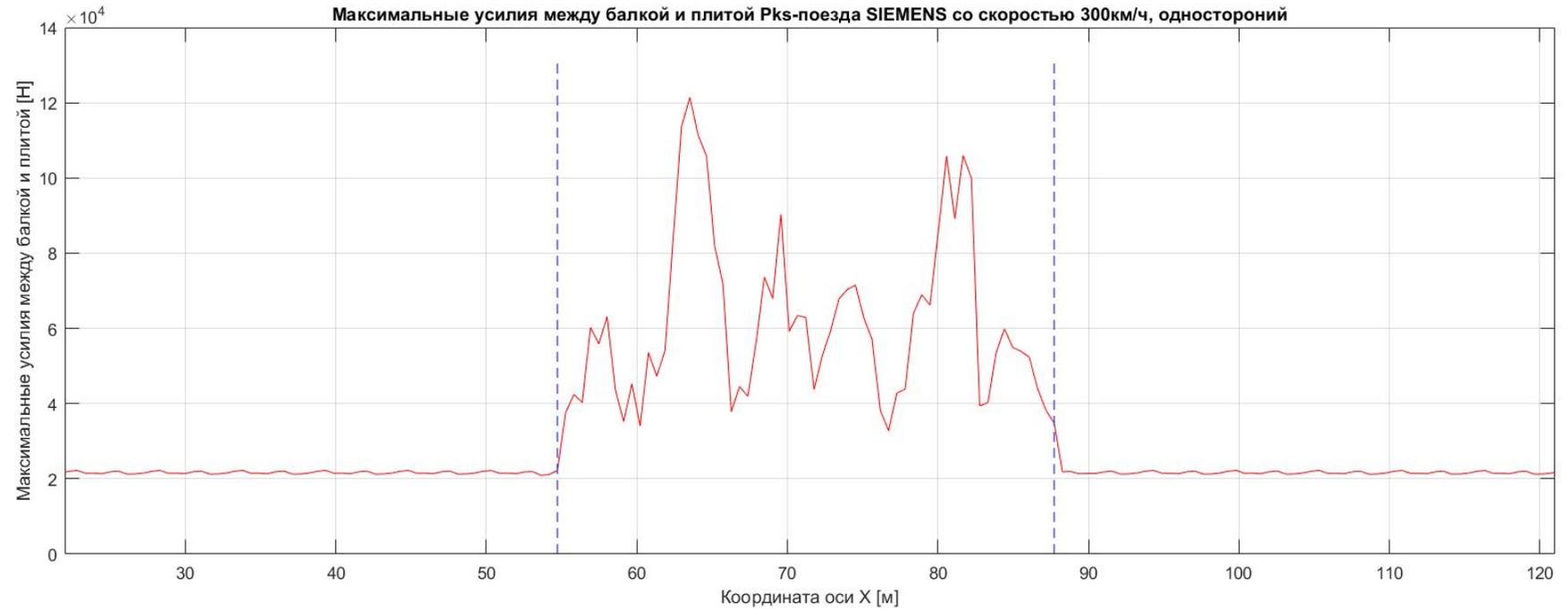
СП 5.6.1      Конструкция верхнего строения пути по всей длине сооружения должна быть одинаковой и такой же, как на подходах к нему. Конструкция верхнего строения пути на мостах должна разрабатываться по индивидуальному проекту



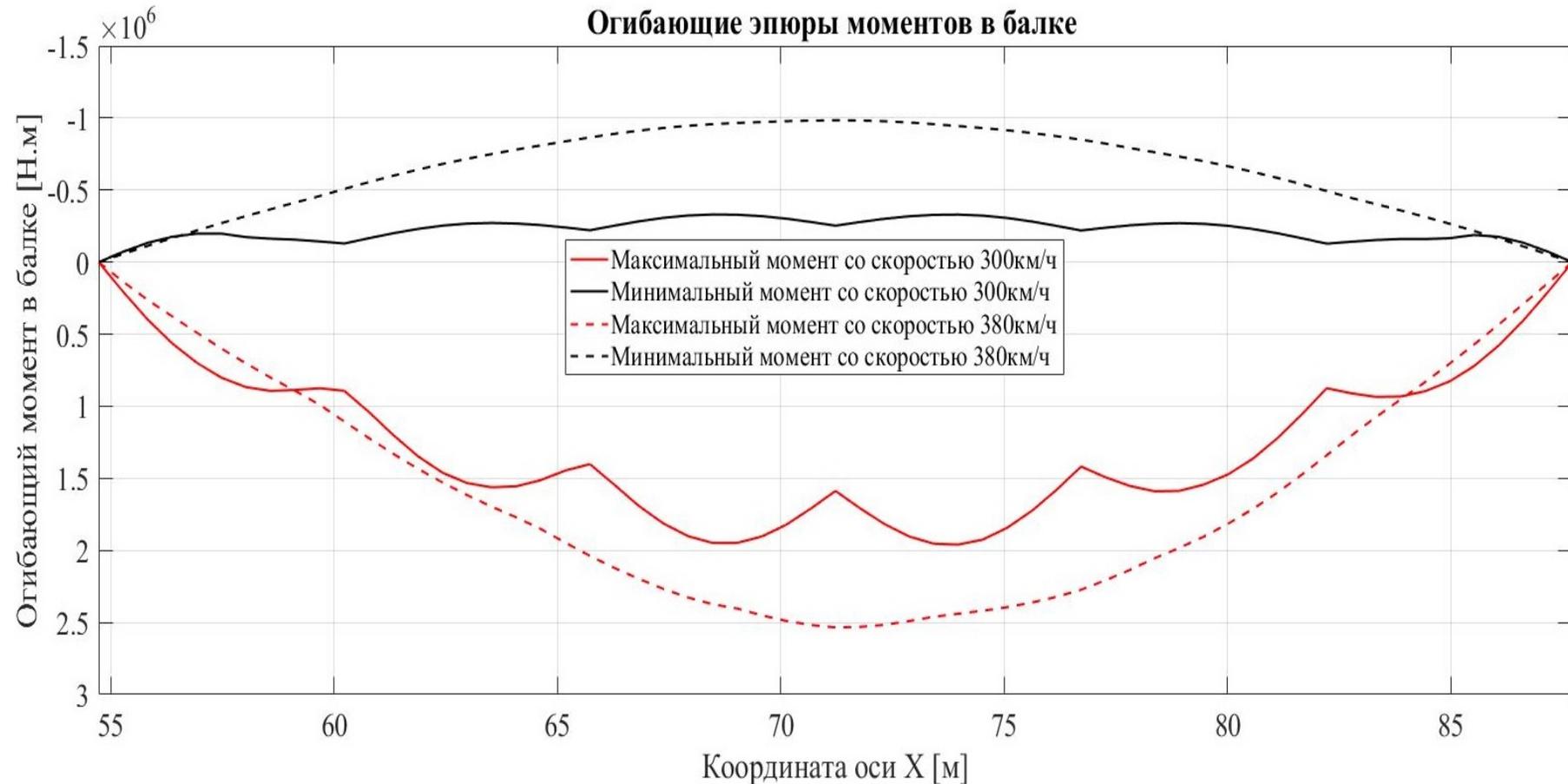
Максимальные контактные усилия между плитой и балкой Pks



Максимальные усилия между балкой и плитой Pks-поезда SIEMENS со скоростью 300км/ч, одностороний

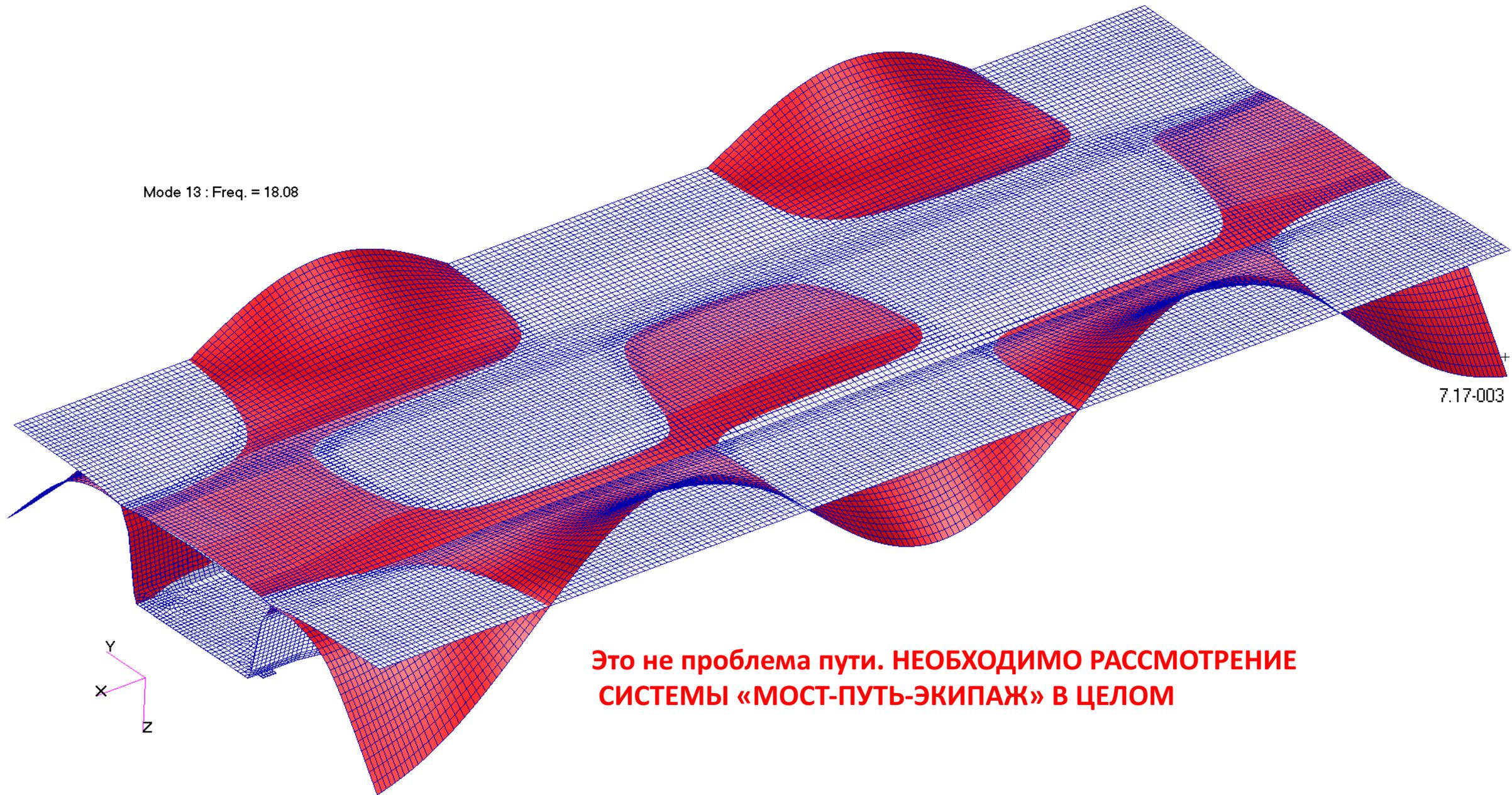


# Огибающие эпюры моментов (индекс) в балке 34,2м. При скорости 300 км/ч виден вклад старших собственных форм колебаний



**Это не проблема пути. НЕОБХОДИМО РАССМОТРЕНИЕ СИСТЕМЫ «МОСТ-ПУТЬ-ЭКИПАЖ» В ЦЕЛОМ**

Mode 13 : Freq. = 18.08



**Это не проблема пути. НЕОБХОДИМО РАССМОТРЕНИЕ СИСТЕМЫ «МОСТ-ПУТЬ-ЭКИПАЖ» В ЦЕЛОМ**

Услуги экспертно-консультационного сопровождения по научному обоснованию принятых в проектной документации основных технических и технологических решений с выводами о:

- безопасности принятых в проектной документации технических решений.

Исполнитель по итогам обсуждения на Экспертном совете по ВСМ

II

разрабатывает **предложения и рекомендации по оптимизации основных технических и технологических решений**, уточнению требований к ним; по проведению технико-экономического сравнения предлагаемых решений;

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЗВОЛЯЕТ РЕШИТЬ ВЫШЕУКАЗАННЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

# Критерии оптимизации СИСТЕМЫ

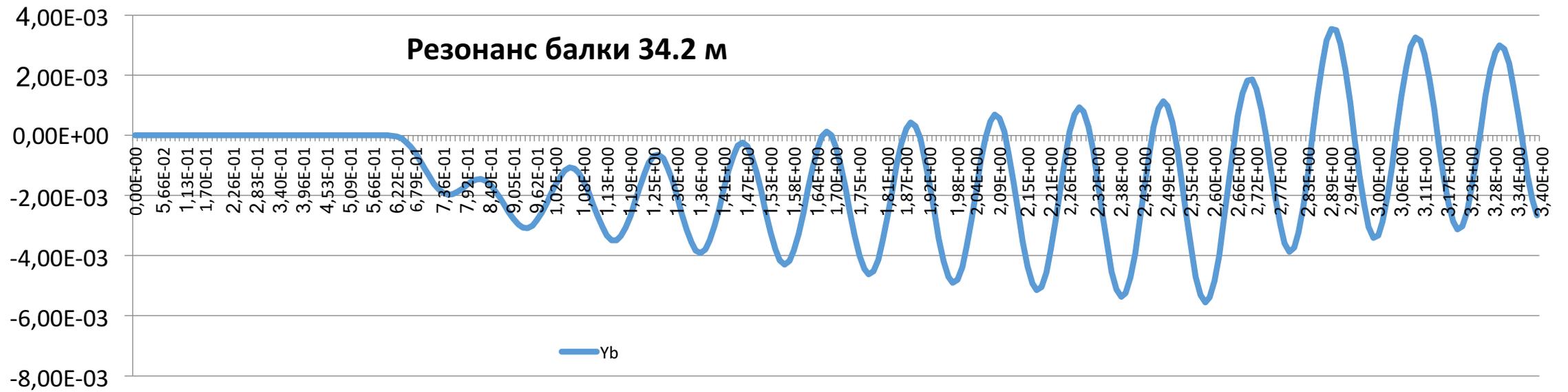
## «МОСТ-ПУТЬ-ПОЕЗД»

- Минимальная масса пролетного строения (прямое снижение материалоемкости)

При ограничении

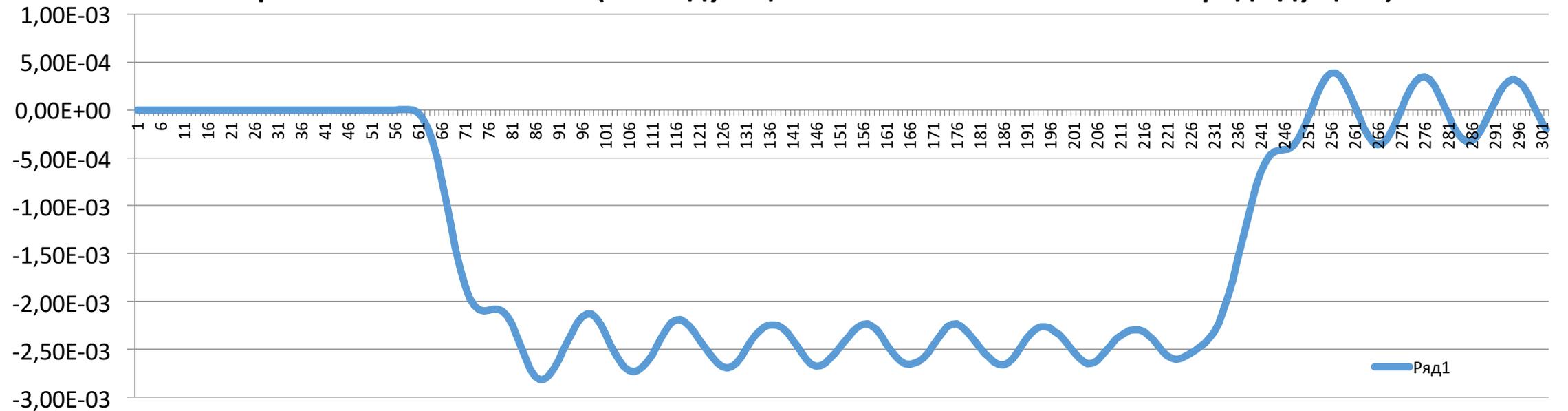
- на прогиб балки
- на усилие в контакте колеса и рельса
- на ускорения кузова вагона (комфорт)
- на усилия в балке
- технологические ограничения на высоту балки
- нагрузки на подрельсовое основание
- Минимальный динамический изгибающий момент, что ведет к снижению материалоемкости пролетных строений
- Минимальная жесткость пролетного строения, что достигается минимизацией высоты сечения, т.е. снижением материалоемкости пролетных строений
- Минимальная поперечная сила, что ведет к снижению опорных реакций, а значит, и к снижению материалоемкости опор

**Система «мост-путь-поезд» с заданным динамическим поведением – Это и есть инновационная цифровая технология проектирования и строительства с элементами искусственного интеллекта**



**Система мост-путь-поезд с заданным динамическим поведением.**

**Погашение резонанса балки 34.2м (последующий вагон гасит колебания от предыдущего)**



# Унифицированные пролетные строения 34 м

(2 исполнения: сборное и монолитное)

- Полная длина – 34,2 м.
- Расчетный пролет – 33,1 м.
- Изготовление в проектном положении и на полигоне.

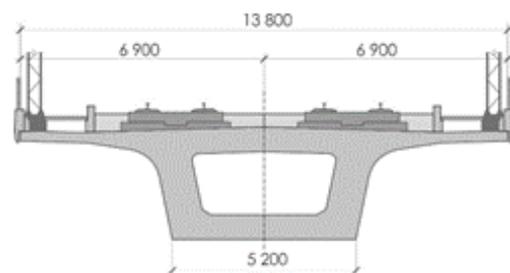
Стр. высота – 3 962 мм.

Масса блока – 892,5 т.

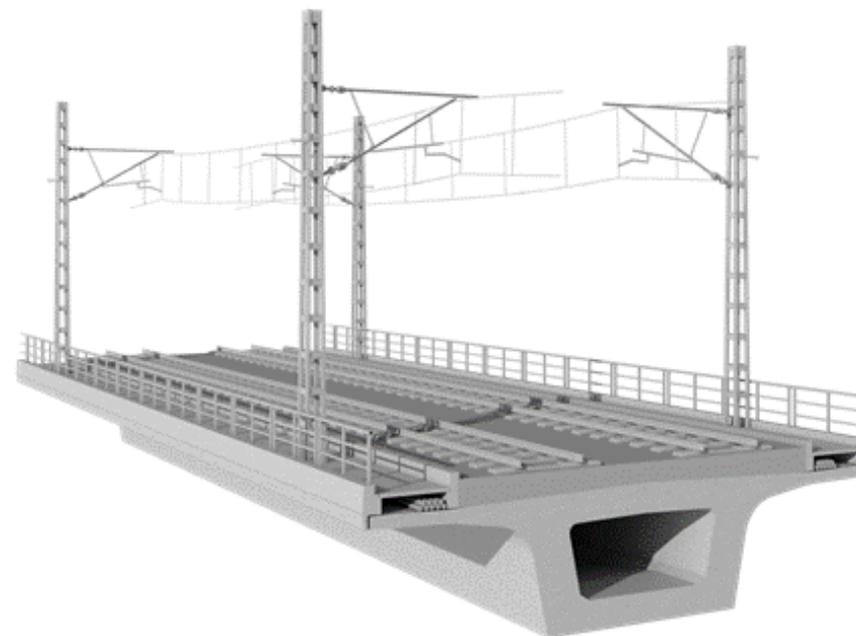
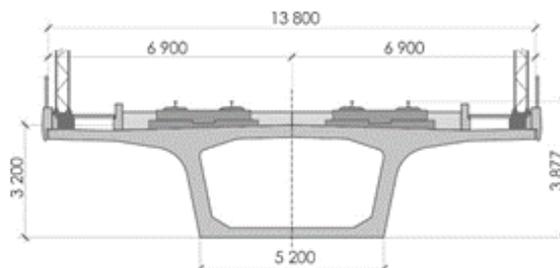
50м – 1500 т



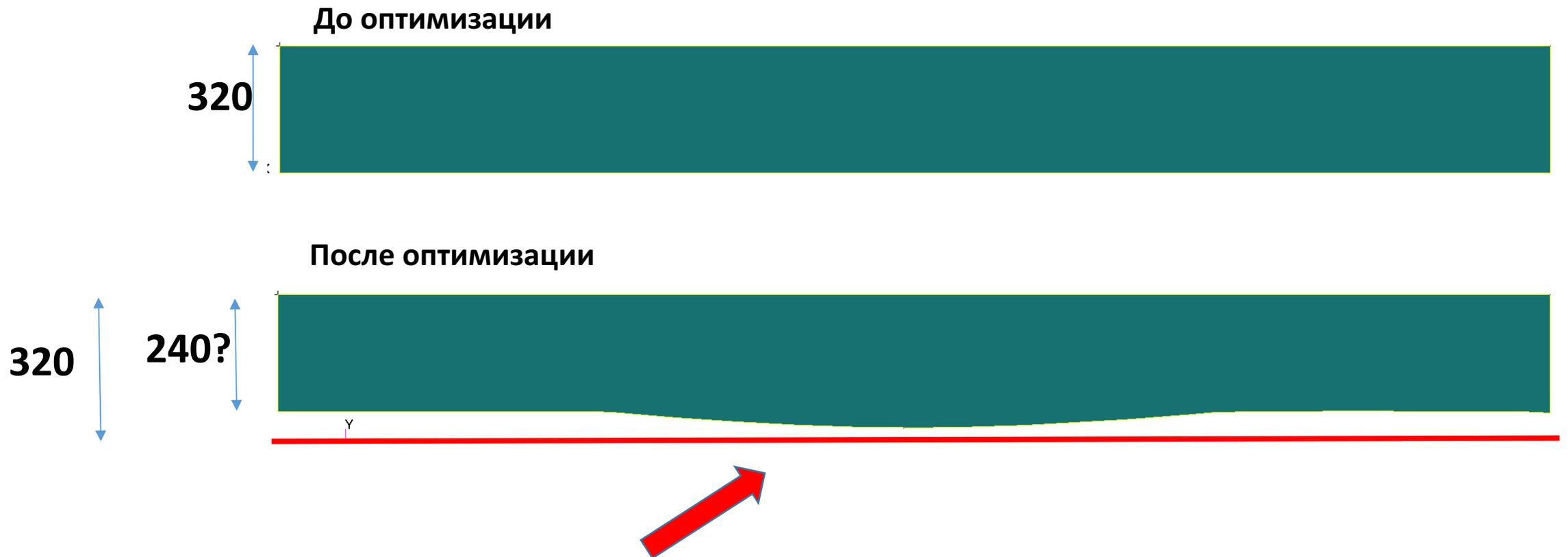
Сечение по оси опирания



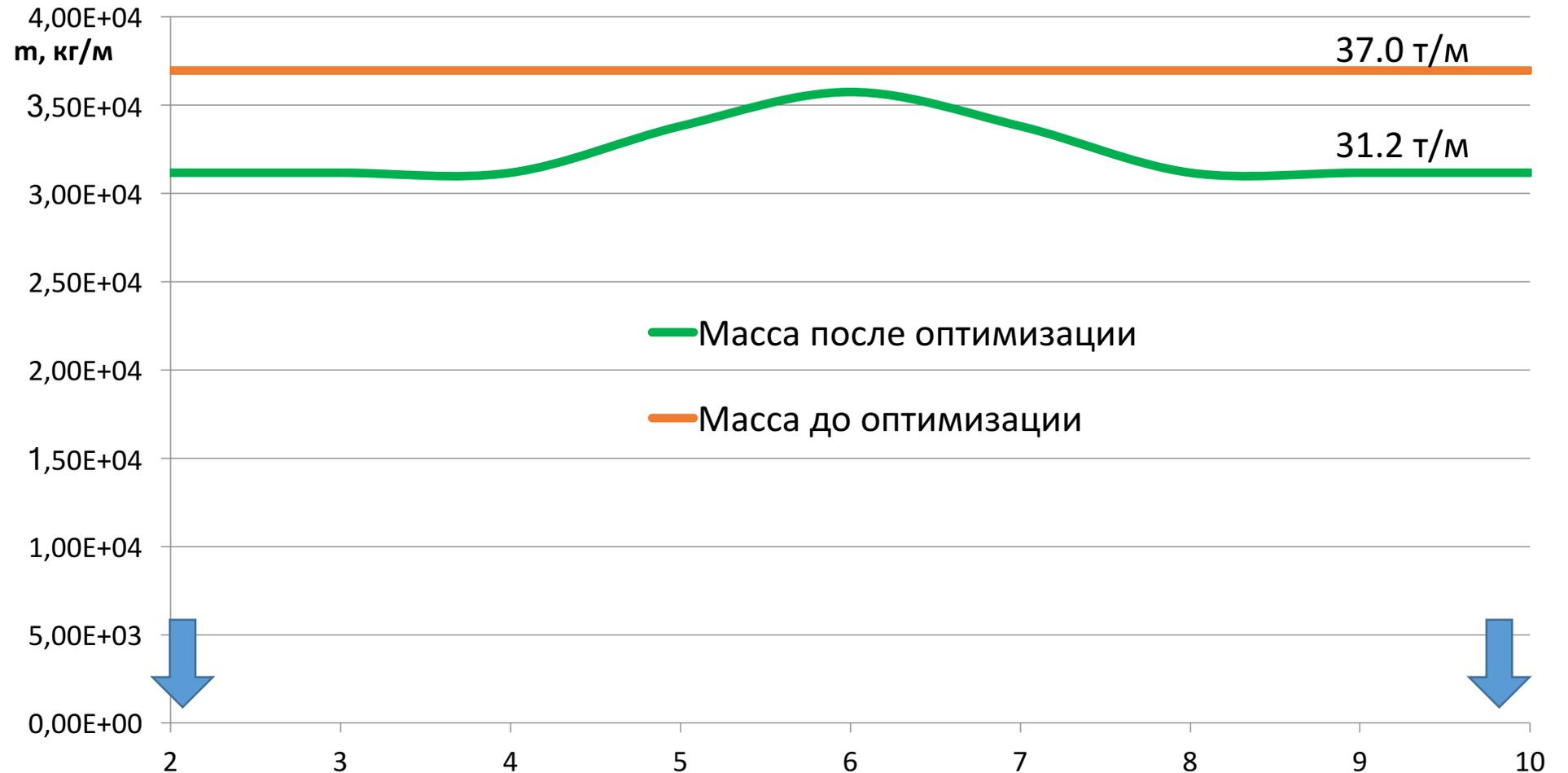
Рядовое поперечное сечение



# Пролетное строение до и после оптимизации



# Погонная масса пролетного строения 50м при оптимизации по массе



Снижение массы пролетного строения в результате оптимизации – **15% (300 т)** На всей трассе объем ж.б. сократится на 8%

**Эр Юань: результат 15% - завышено**

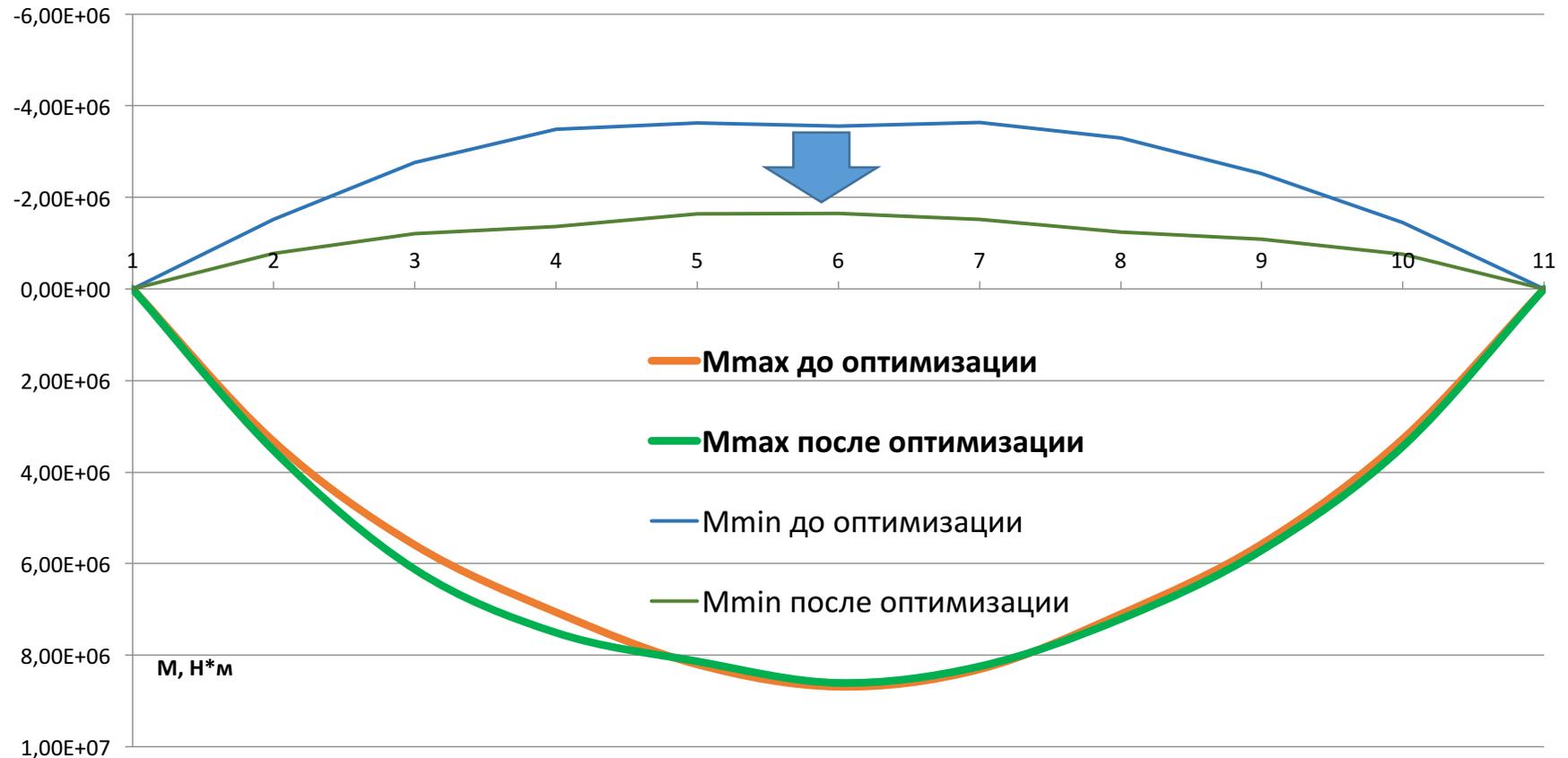
# Система «Мост-путь-поезд» с заданным динамическим поведением

При минимизации массы поставлена задача о равенстве изгибающего момента в начале и конце оптимизации

Эволюция максимального изгибающего момента (индекс) при колебаниях в процессе оптимизации

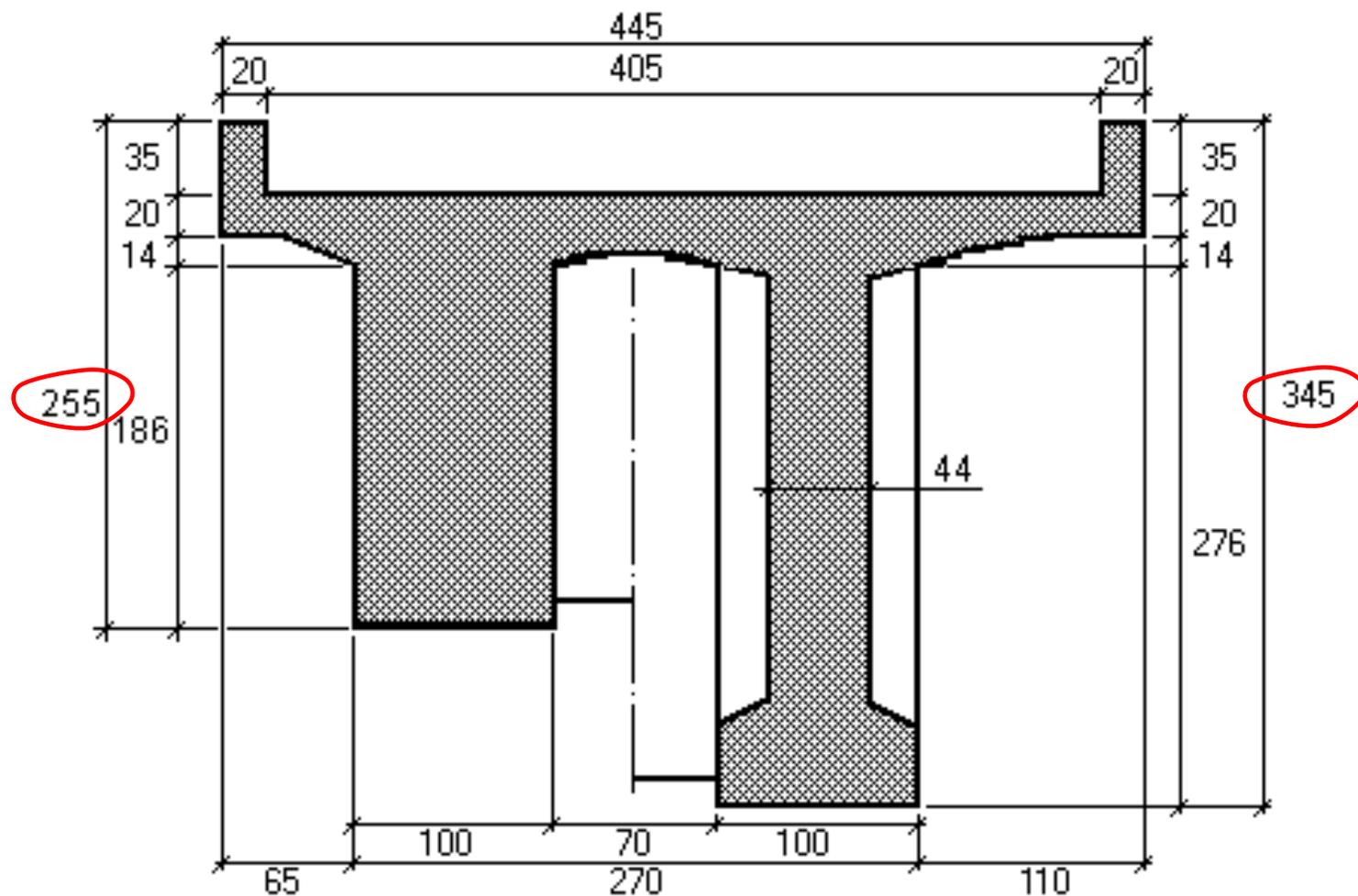


# Огибающая эпюра моментов (индекс) от временной нагрузки в унифицированной балке 50м при оптимизации по минимальной массе



наибольший изгибающий момент при проходе состава ЭВС-2 составил 99,18% от момента до оптимизации

Железобетонное пролетное строение переменной высоты  
L=22м, Ленпроектпуть, 1934г.

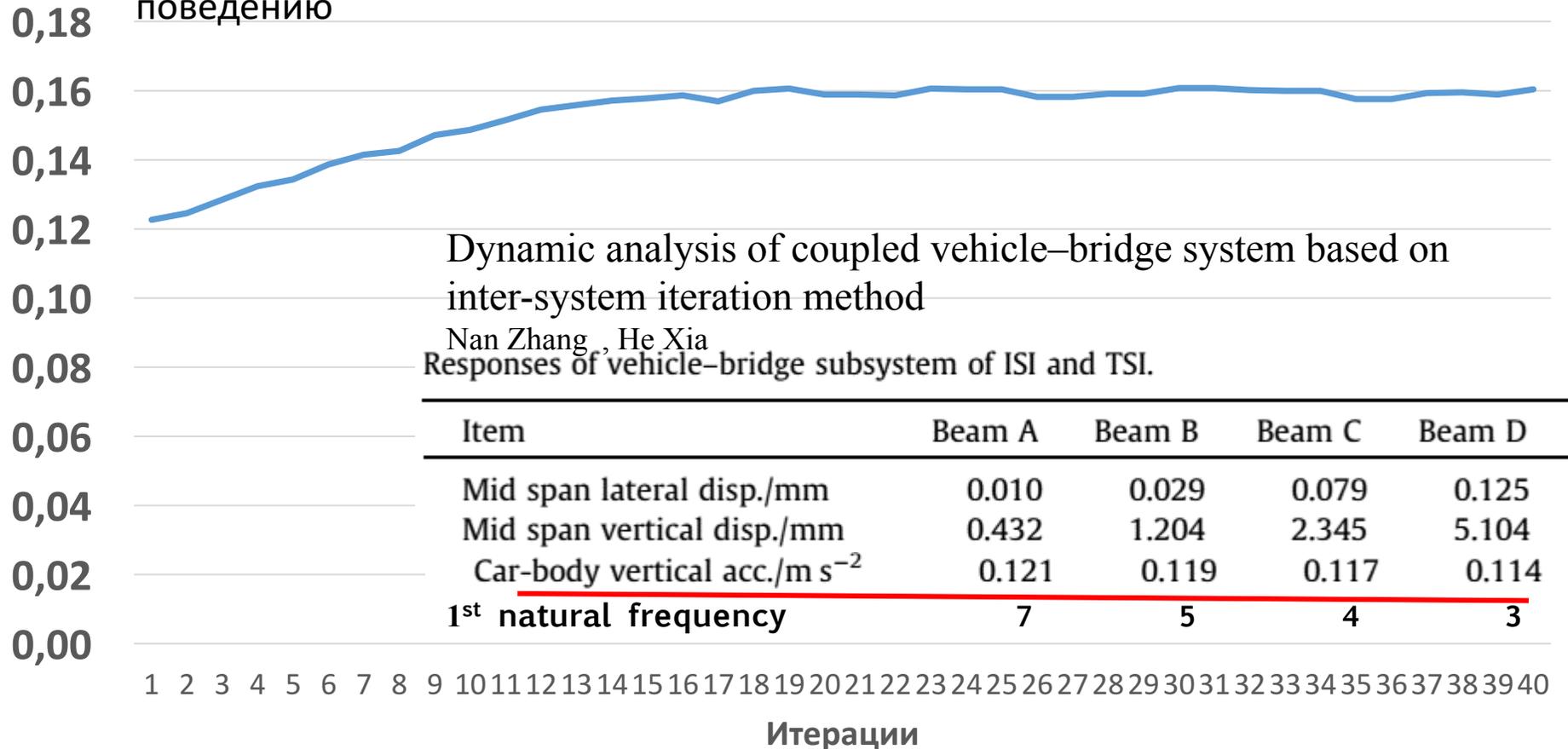


# Экономический эффект 5,9 млрд. руб.

- Снижение затрат на бетонирование вследствие снижения кубатуры пролётного строения.
- Снижение затрат на доставку и установку пролётного строения вследствие снижения его веса.
- Изменение затрат на СВСиУ для сооружения пролётного строения.
- Прирост затрат на сооружение тела капитальных опор вследствие увеличения их высоты
- Эффект от сокращения трудоёмкости работ
- Эффект от сокращения платы за пользование заёмными средствами.
- Эффект от уменьшения накладных расходов
- Эффект от сокращения сроков строительства

# Максимальное ускорение в кузове вагонов ЭВС-2 при оптимизации пролетного строения 50м

Система Мост-путь-поезд с заданным динамическим поведением. Пролетное строение имеет избыточный запас по комфорту, но неудовлетворительно по динамическому поведению



# ВОПРОСЫ ПО П.4?

## **ПРОБЛЕМЫ:**

1.Резонанс

2.Безопасность движения

3.Нормирование комфорта

**4.Материалоемкость**

# **СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

Проф. Поляков Владимир Юрьевич,  
rvy55@mail.ru

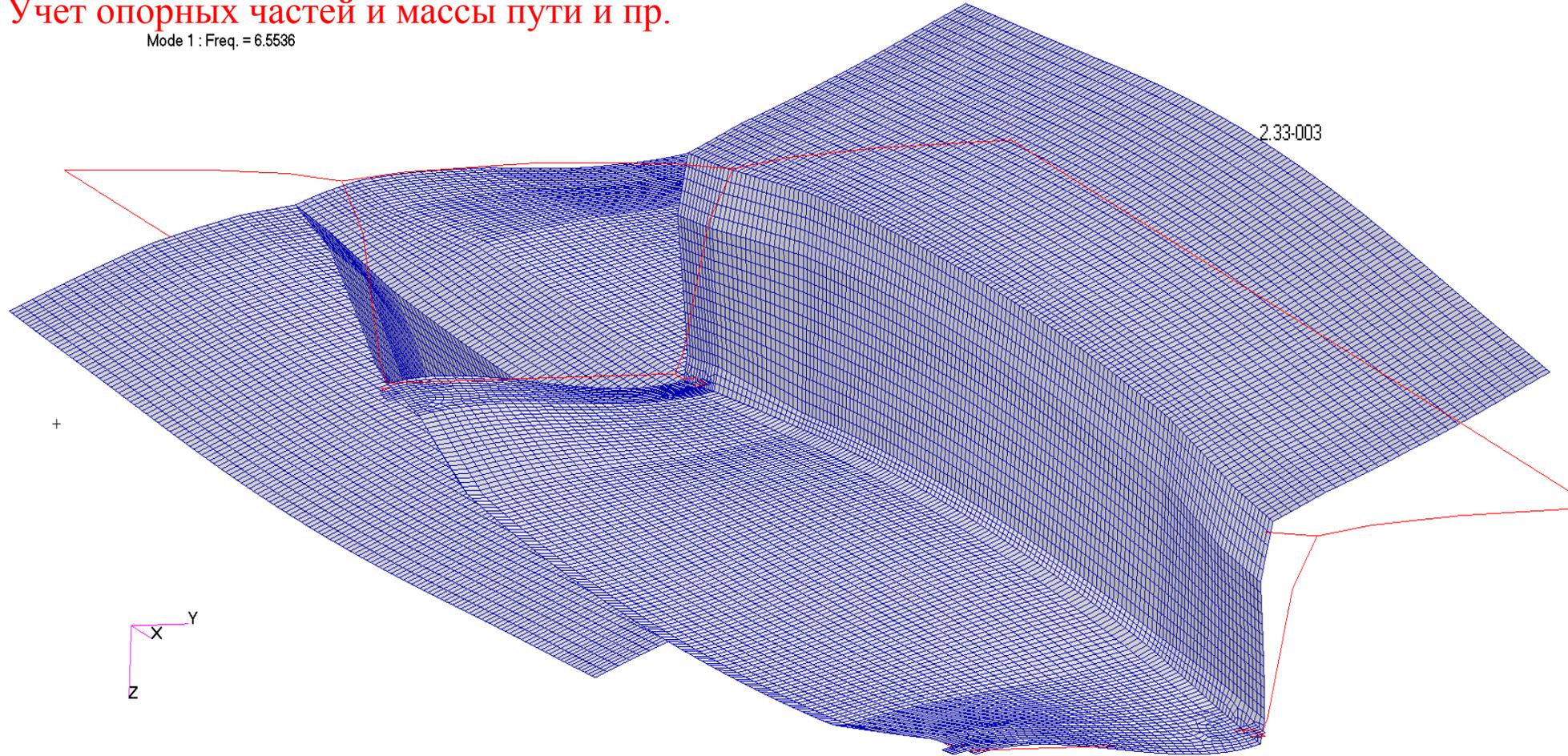
## Рекомендации в протокол:

1. Для недопущения резонансных явлений рекомендовать совместно с РУТ-МИИТ корректировку отдельных пунктов СТУ «Сооружения искусственные участка Москва-Казань высокоскоростной магистрали Москва-Казань-Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». Включить в СТУ (СП) положения об оптимизации пролетных строений.
2. Считать целесообразным корректировку проектной документации совместно с РУТ-МИИТ на унифицированные пролетные строения с целью снижения их материалоемкости, исключения резонанса пролетных строений, соблюдения условий комфорта пассажиров.
3. После выбора подвижного состава необходимы проверки устойчивости движения по мостам с возможными корректировками пролетных строений

# Первая форма собственных колебаний балки 23,6м (крутильная). Частота 6,55 Гц

Общее число элементов в модели – 26325, узлов -26509, степеней свободы – 159054. Условный средний размер КЭ – 0.148 м. **Учет опорных частей и массы пути и пр.**

Mode 1 : Freq. = 6.5536



For a simply supported bridge subjected to bending only, the natural frequency may be estimated using the formula

$$f_0 \text{ [Hz]} = \frac{17.75}{\sqrt{\delta_0}}$$

Д.2 Для балочных разрезных пролетных строений допускается определять первую вертикальную частоту колебаний по формуле:

$$f_1 = \frac{17.75}{\sqrt{\delta_p}} \quad (\text{Гц}),$$

## ТРЕБОВАНИЯ СТУ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ

6.3.22 При расчетах по методикам А.1 и А.2 (см. 6.3.10) требования предельного обезгруживания колес поезда обеспечиваются косвенно, через контроль собственных частот и предельных прогибов. В случае использования методик Б.1 и Б.2 (см. 6.3.10) необходимо выполнять прямые проверки предельного обезгруживания колес высокоскоростных поездов согласно 6.4.15. Данное требование следует рассматривать как требование безопасности

**ГОСТ 27751-2014 (п.5.1.1)** «Строительные объекты должны удовлетворять требованиям (критериям), соответствующим следующим предельным состояниям: - первая группа предельных состояний - состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной расчетной ситуации.»

# Принципиальные конструктивные решения с использованием сборно-монолитных пролетных строений.

## 3.2 Динамические расчеты

### 3.2.1 Собственные значения

В соответствии с требованиями 6.3.14 СТУ, **первая собственная вертикальная частота** пролетного строения должна находиться в разрешенном диапазоне:

$$f_{l\min} \leq f_l \leq f_{l\max} \quad (\text{Гц}),$$

где:  $f_{l\max} = 94.76 \cdot L^{-0.748}$  (Гц)

$$f_{l\min} = \frac{80}{L} \quad (\text{Гц}) \quad \text{при } 4 \leq L \leq 20 \text{ м};$$

$$f_{l\min} = 23.58 \cdot L^{-0.592} \quad (\text{Гц}) \quad \text{при } L > 20 \text{ м}.$$

Пределы частоты для пролетных строений составляют:

Пределы частот, Гц	Расчетный пролет, м
	32.5
$f_{l\min}$	7.010
$f_{l\max}$	3.000

это  $f_{l\max}$

**Первая собственная частота кручения** должна быть не менее чем на 20% выше первой вертикальной частоты.

$$f_{l,t} \geq 1.2 f_l \quad (\text{Гц}).$$

### 3.2.2 Решение динамической задачи взаимодействия поезда и пролета

Для случая разрезной балки длиной менее 40 м, постоянной жесткости СТУ предписывают выполнять расчет по **методике А** (6.3.10 а).

В соответствии с этой методикой:

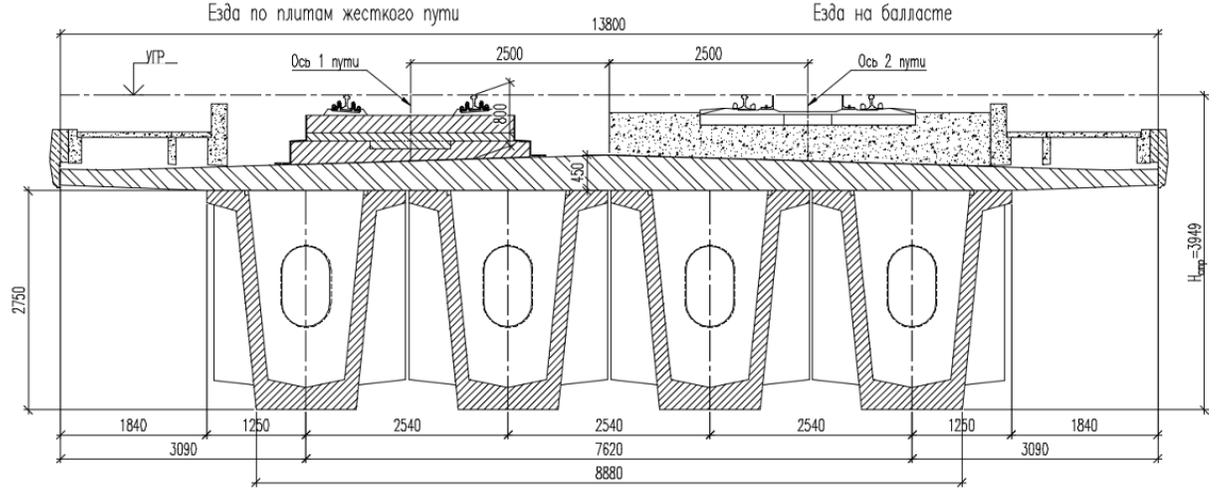
1) Расчетную модель следует принимать II типа (модель II приложения Г):

Модель	Тип задачи	Модель моста	Модель поезда
II - Подвижные силы на балке	Динамическая постановка задачи	Мост - упругая колеблющаяся балка (система) конечной массы с вязким затуханием	Поезд - система движущихся сил

2) В соответствии с 6.3.16 СТУ в результате динамических расчетов по методике А должны быть определены:

- вертикальные ускорения на уровне верхнего строения пути, гарантирующие его устойчивость (предельные значения ускорений см. ниже);
- амплитуды колебаний (по всем рассматриваемым поездам), необходимых для вычисления коэффициента динамики (см. ниже).

3) Согласно 6.3.18 СТУ при выполнении динамического анализа по методике А учет динамических эффектов, вызванных взаимодействием поезда и пролета, производится умножением результатов статического расчета на коэффициент динамики  $\mu_1$  согласно приложению Л:



L, м	f1, min	f1, max	Vcr, min	Vcr, max	Vcr, min	Vcr, max
32.5	3	7	74.4	173.6	268	625

## 4.3 Динамические характеристики

**Первая собственная вертикальная частота и допустимый диапазон:**

Частота $f_l$	раз-мер-ность	при весе		ДОПУСТИМЫЙ ДИАПАЗОН		
		макс	мин	макс	мин	
при жесткости	макс	Гц	4.592	5.288	7.010	3.000
	мин	Гц	4.378	5.042		

крит. скорость 391,0464 км/ч

25/15-ТКР-УК400-СОГЛ.РР-1

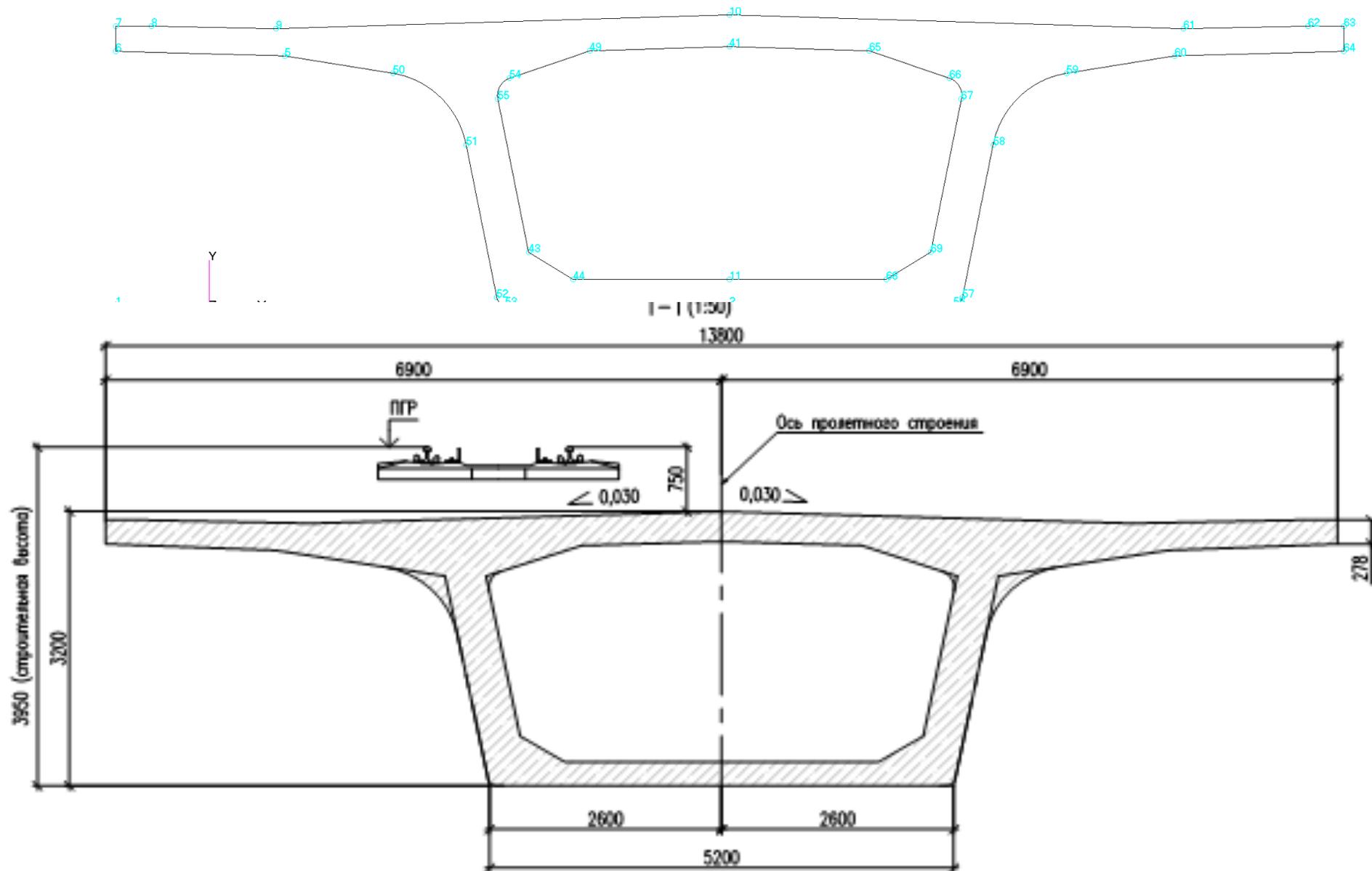
Изм. № подл. Подп. и дата Взам. инв. №

Изм.	Кол.уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата

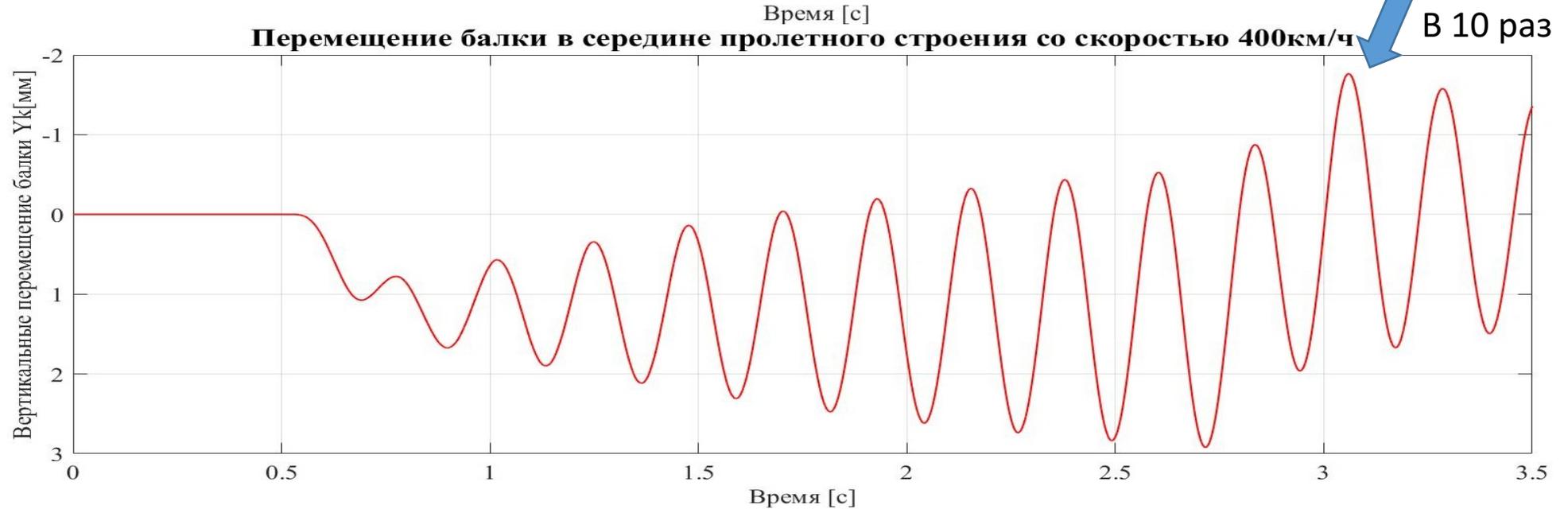
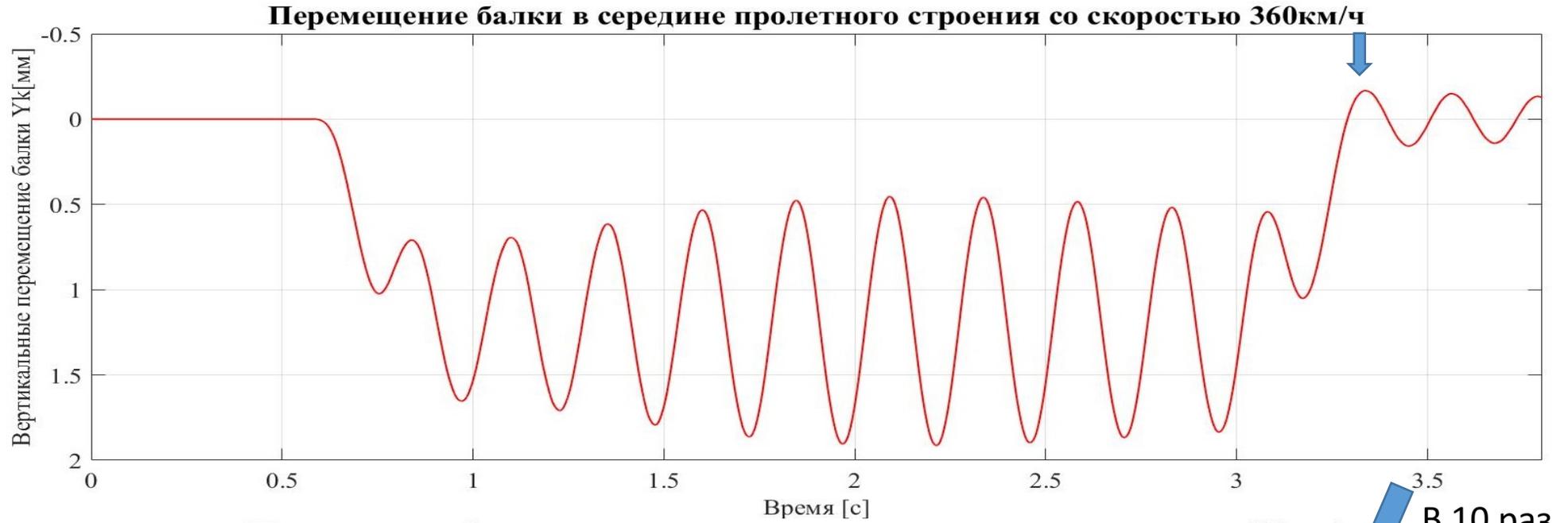
**Состав рабочей группы «Искусственные сооружения» Экспертного совета по технической политике в области проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей в Российской Федерации:**

1. Балючик Эдуард Александрович Главный инженер НИЦ «Мосты»
2. Васильков Алексей Сергеевич Вице-президент ОАО Институт Гипростроймост
3. Дорошкевич Антон Андреевич АО «НИИ Мостов»
4. Замуховский Александр Владимирович Зав. путеиспытательной лабораторией, РУТ, к.т.н.
5. Кондратов Валерий Владимирович Зав. отделом, АО «НИИ Мостов», к.т.н.
6. Курбацкий Евгений Николаевич Профессор каф. Мосты и тоннели РУТ, д.т.н.
7. Меркин Валерий Евсеевич ООО НИЦ Тоннельная ассоциация, д.т.н.
8. Поляков Владимир Юрьевич Профессор каф. Мосты и тоннели РУТ, д.т.н.
9. Смирнов Владимир Николаевич Зав. кафедрой Мосты ПГУПС, д.т.н.
10. Соловьев Вячеслав Владимирович, доцент кафедры "Экономика строительного бизнеса" РУТ к.э.н.
11. Нань Занг Профессор Пекинского университета транспорта, зам. директора отделения Мостов, Ph.D.

# Поперечное сечение балки 23,6м в модели и проекте



# 1.Резонанс пролетных строений



Вице-президенту

ОАО «Институт Гипростроймост»

А.С. Василькову

Уважаемый Алексей Сергеевич!

Направляю отзыв Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) на проект свода правил «Сооружения искусственные высокоскоростных линий. Правила проектирования и строительства».

Университет готов к плодотворному сотрудничеству наших организаций в области строительства высокоскоростных магистралей на договорной основе.

Проректор по научной работе  
и инновациям



А.М. Давыдов

## О нормах проектирования мостов на высокоскоростных магистралях

Поляков В.Ю., д-р техн. наук, проф., Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МИИТ), Москва

### Аннотация

Рассмотрены вопросы проектирования пролетных строений на высокоскоростных магистралях. Показано необходимость специальных норм, определяющих повышенные динамические воздействия в сравнении с обычными скоростями.

### Ключевые слова

Высокоскоростные магистрали, динамика мостов, нормы.

### Abstract

The paper reviews the design issues of high-speed railway superstructures. The article proves the necessity of special norms reflecting excessive dynamic effects compared with regular speeds.

### Keywords

bridge dynamics, design rules, high-speed railway.

Для разворачивающегося в России строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ) требуются принципиально новые нормы проектирования из-за значительных динамических воздействий. Недавнее падение поезда TGV с моста [1, 2] свидетельствует о серьезности проблемы. Важно подчеркнуть, что необходим новый подход, а не корректировка динамических коэффициентов к равномерно распределенной эквивалентной нагрузке.

### Предельные состояния

В соответствии с [3] строительные объекты должны удовлетворять определенным предельным состояниям.

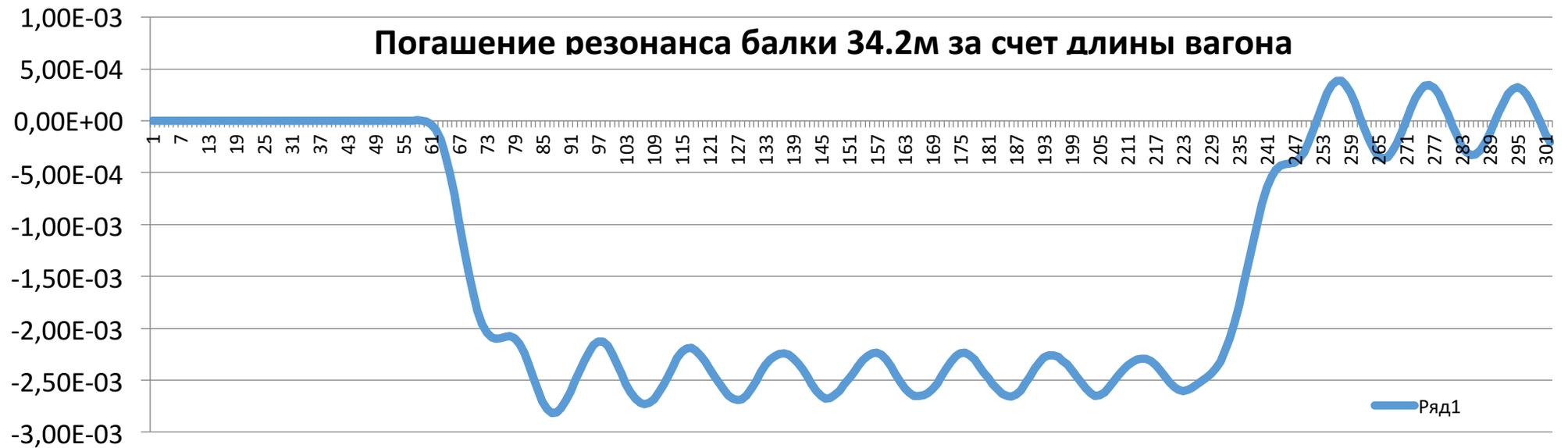
Первая группа предельных состояний — состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной расчетной ситуации. В этой группе учитываются расчетные значения параметров, а также соответствующие коэффициенты надежности и доверительные вероятности. Так, при совместных колебаниях пролетных строений моста, ма-

стового полотна и поезда может возникнуть предельное состояние, за которым последует сход колеса с рельса, ведущий к аварии. Сход поезда в зоне моста связан с падением вагонов с высоты, сопоставимой с длиной вагона, и потому должен быть исключен с вероятностью, соответствующей именно первой группе предельных состояний.

В соответствии с [3] предельные состояния второй группы лишь затрудняют нормальную эксплуатацию. Последствия наступления предельных состояний второй группы — только ограничения эксплуатации. Сход же поезда с рельса — это авария, вызванная неблагоприятным сочетанием параметров в системе «мост–путь–экипаж», неучитенным при проектировании. Такой сход возможен и тогда, когда колебания пролетного строения далеки от резонанса. В [4] показано, что для 6-вагонного поезда при скорости 350 км/ч при увеличении коэффициента жесткости пролетного строения в 2,5 раза динамические прогибы уменьшаются с 24 мм до 4,2 мм. Однако снижение прогибов не только не избавляет от опасных точек, но и даже не ведет к сокращению их числа.

Если сход произошел из-за неудачных динамических параметров пролетного строения, то оно подлежит замене или капитальному ремонту с учетом обеспечения требуемых упруго-динамических свойств, поскольку ограничение скорости неприемлемо для ВСМ. Важно отметить, что оценка устойчивости движения колеса по рельсу должна быть проверена в системе «мост–путь–экипаж».

В то же время вторую группу предельных состояний необходимо дополнить критерием равномерности воздействия на подрельсовое основание по длине моста (включая подходы). Неравномерное по длине воздействие ведет к отклонениям профиля пути от проектного положения, а следовательно, к ограничениям скорости на участке.



Л.5 При выполнении расчетов по методикам А.1, А.2 слагаемое динамического коэффициента  $\mu_2$  следует вычислять по формуле

$$\varphi'' = \frac{\alpha}{100} \left[ 56 e^{-\left(\frac{L_{\Phi}}{10}\right)^2} + 50 \left( \frac{L_{\Phi} n_0}{80} - 1 \right) e^{-\left(\frac{L_{\Phi}}{20}\right)^2} \right]$$

$$\mu_2 = \frac{a}{100} \cdot \left[ 56 \cdot e^{-\left(\frac{L}{10}\right)^2} + 50 \cdot \left( \frac{L \cdot f_1}{80} - 1 \right) \cdot e^{-\left(\frac{L}{20}\right)^2} \right] \geq 0,05,$$


(4)P The values of  $\varphi' + \varphi''$  shall be determined using upper and lower limiting values of  $f_1$ , unless it is being made for an individual bridge of known first natural frequency.

## Рекомендации применения динамического расчета в EN 1991-2:2003 (E)

В случае выполнения динамического анализа по методике А.1 (6.3.10 Методика А.-Для расчетов плитных, сплошностенчатых **(коробчатых и ребристых) разрезных балок пролетами до 60 м.)**

результатами динамического расчета, используемыми для дальнейших расчетов, являются:

⌘ вертикальные ускорения на уровне верхнего строения пути (предельные значения ускорений приведены в 6.4.13);

⌘ амплитуды колебаний (по всем рассматриваемым поездам) необходимые для вычисления коэффициента динамики (см. 6.3.18).

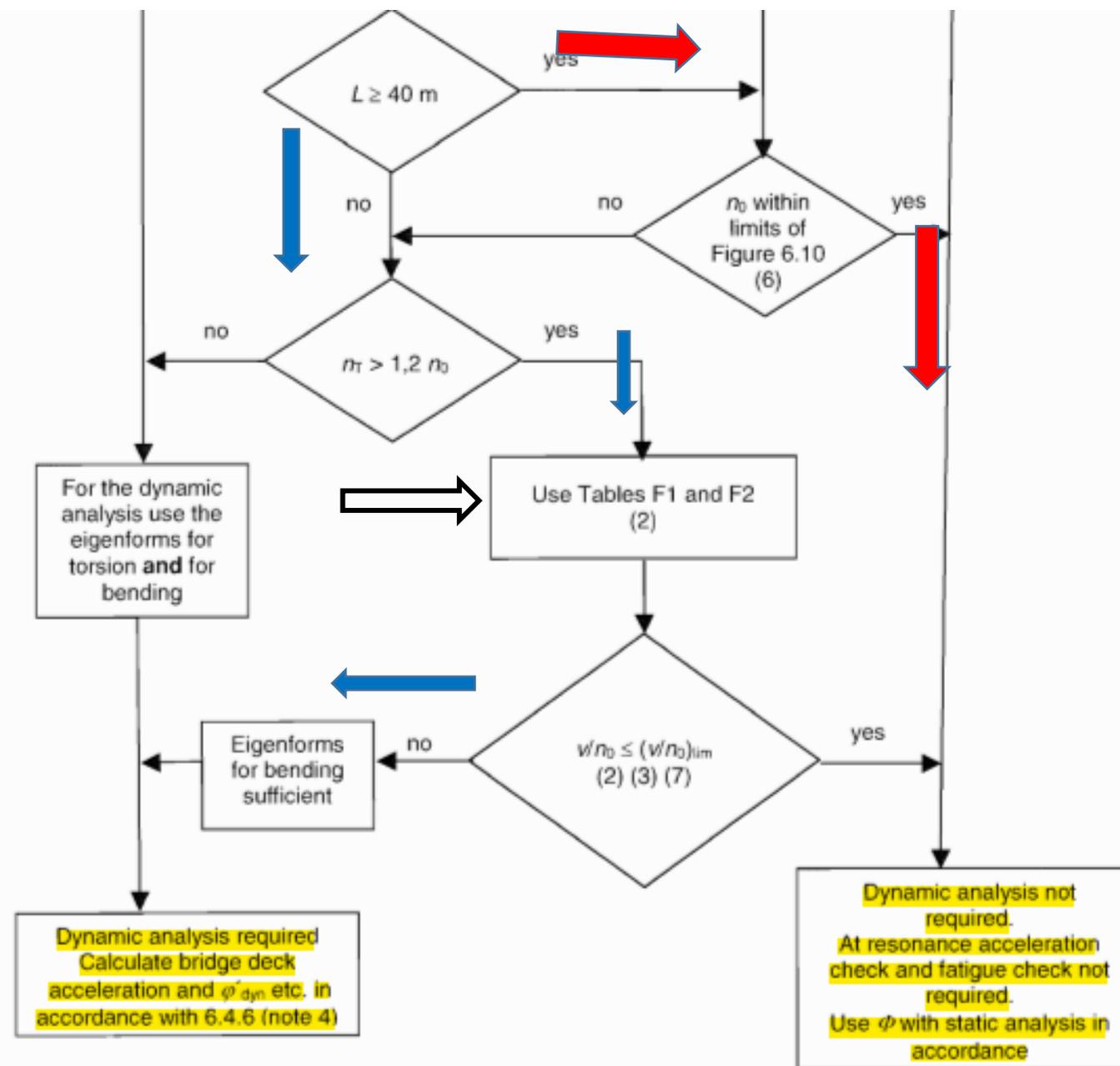
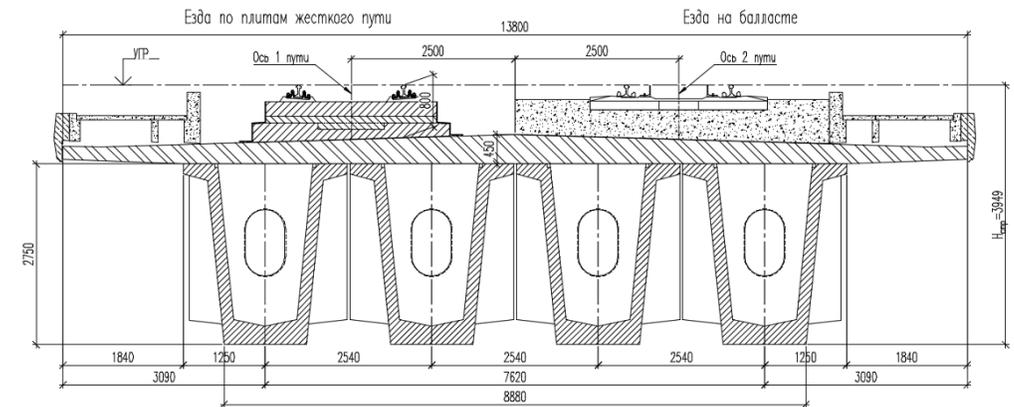
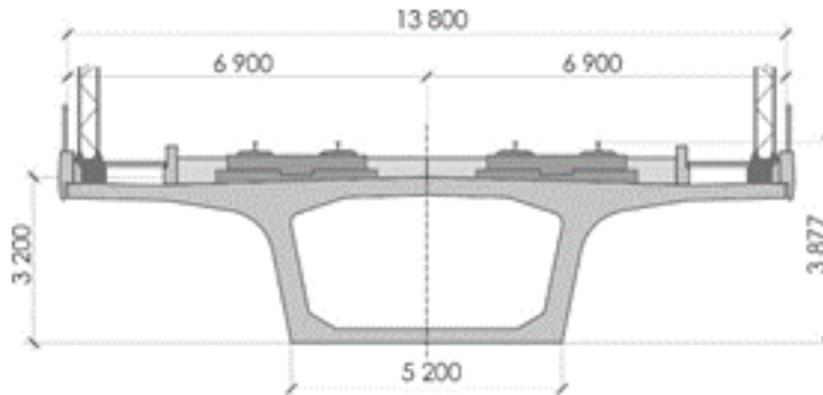


Figure 6.9 - Flow chart for determining whether a dynamic analysis is required

Высокоскоростные магистрали. Расчет сечений, представленных Ленгипротранс. Максимальная допустимая скорость обращения подвижного состава 350 км/ч

№	Расчетный пролет, м	Высота балки жесткости, м	Конструкция ПС	Сечение балки жесткости	Динамический анализ					
					Предельное значение ускорения балки жесткости	Расчетное значение ускорения балки жесткости	Критическая скорость подвижного состава	Верхний предел частоты колебаний	Нижний предел частоты колебаний	Частота 1-й формы изгибных колебаний
					м/с <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>	км/ч	Гц	Гц	Гц
7	33,0	3,0	Монолитное плитное ПС		3,5	2,655	305	6,931	2,976	4,724 <sup>2)</sup>
8	44,0	4,0	Монолитное плитное ПС		3,5	1,845	310	5,589	2,510	3,614 <sup>2)</sup>
9	55,0	5,0	Монолитное плитное ПС		3,5	1,326	280	4,730	2,199	2,907 <sup>2)</sup>

# Сопоставление сборно-монолитных и унифицированных пролетных строений



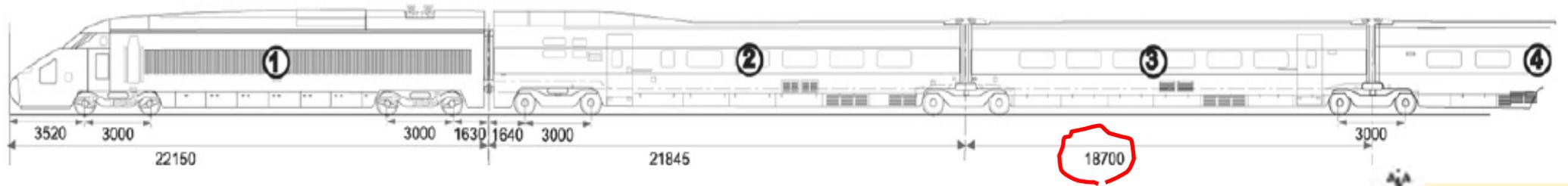
Пролетное строение	Масса до оптимизации, т	Масса после оптимизации, т	Сокращение массы, %
Унифицированное	1066	886	16,8
Сборно-монолитное	1703	1524	10,5

II - Вторая группа Описание Состояния, Состояния, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация, исчерпывается ресурс их долговечности или нарушаются условия комфортности. (явления, при которых возникает необходимость ограничения пропускной способности или снижение расчетного срока службы).

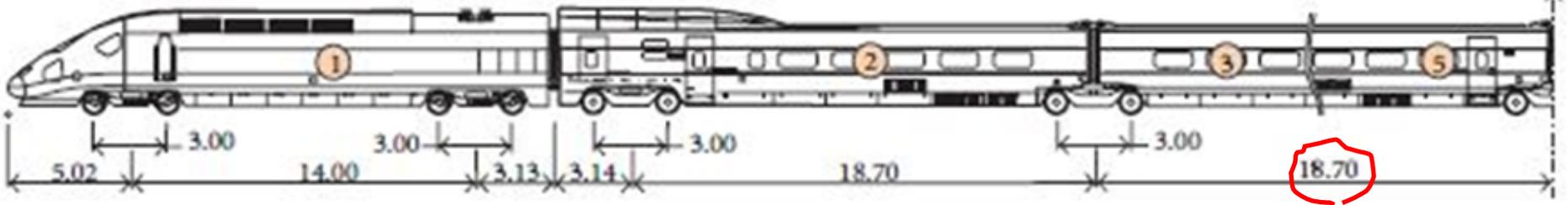
В случае использования методик Б.1 и Б.2 (см. 6.3.10) необходимо выполнять прямые проверки предельного обезгруживания колес высокоскоростных поездов согласно 6.4.15. Данное требование следует рассматривать как требование безопасности железнодорожного движения !!!

# Европейские высокоскоростные поезда

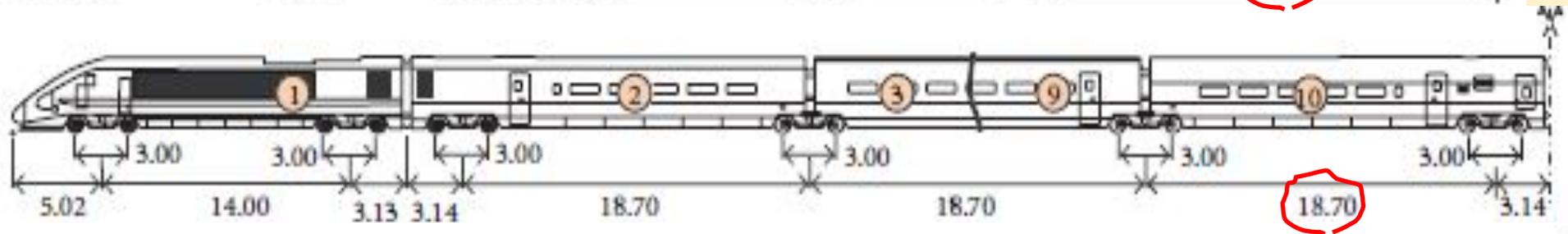
TGV/AVE



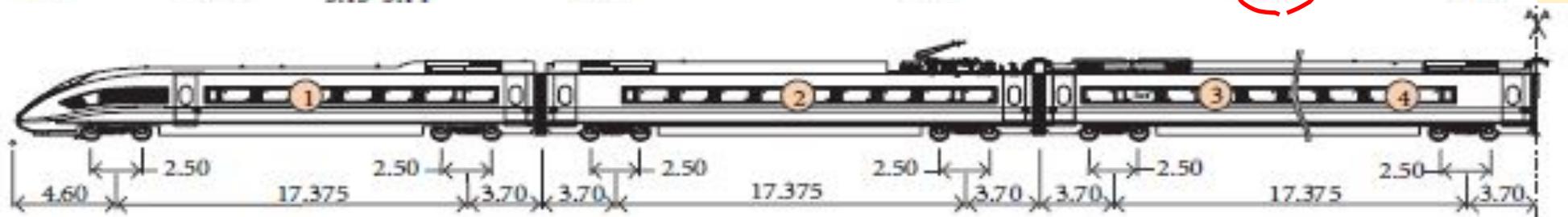
Thalys-HST



Eurostar



ICE3



**Сигнатура TGV значительно отличается от ЭВС2**

## 2.Безопасность движения

Колебания Такомского моста – прочность при резонансе можно обеспечить



# ТРЕБОВАНИЯ СТУ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ

6.4.15 При расчетах по методикам Б.1 и Б.2 (см. 6.3.10) необходимо выполнять прямые проверки предельного обезгруживания колес высокоскоростных поездов, контролируя в расчетах минимальные силы давления колес поездов на рельс:

$$\min_{i=1, j=1}^{n, m} [\Delta P_{i, j} / P_{stat, i, j}] \leq 0,6, \quad (6.5)$$

где  $\Delta P_{i, j}$  - минимальное давление  $i$  колеса  $j$  поезда с учетом динамики, центробежной силы, а также эксцентриситетов  $e_q$  и  $e_s$  (см. 6.6.2.6);

$P_{stat, i, j}$  - статическая нагрузка на  $i$  колесо  $j$  поезда.

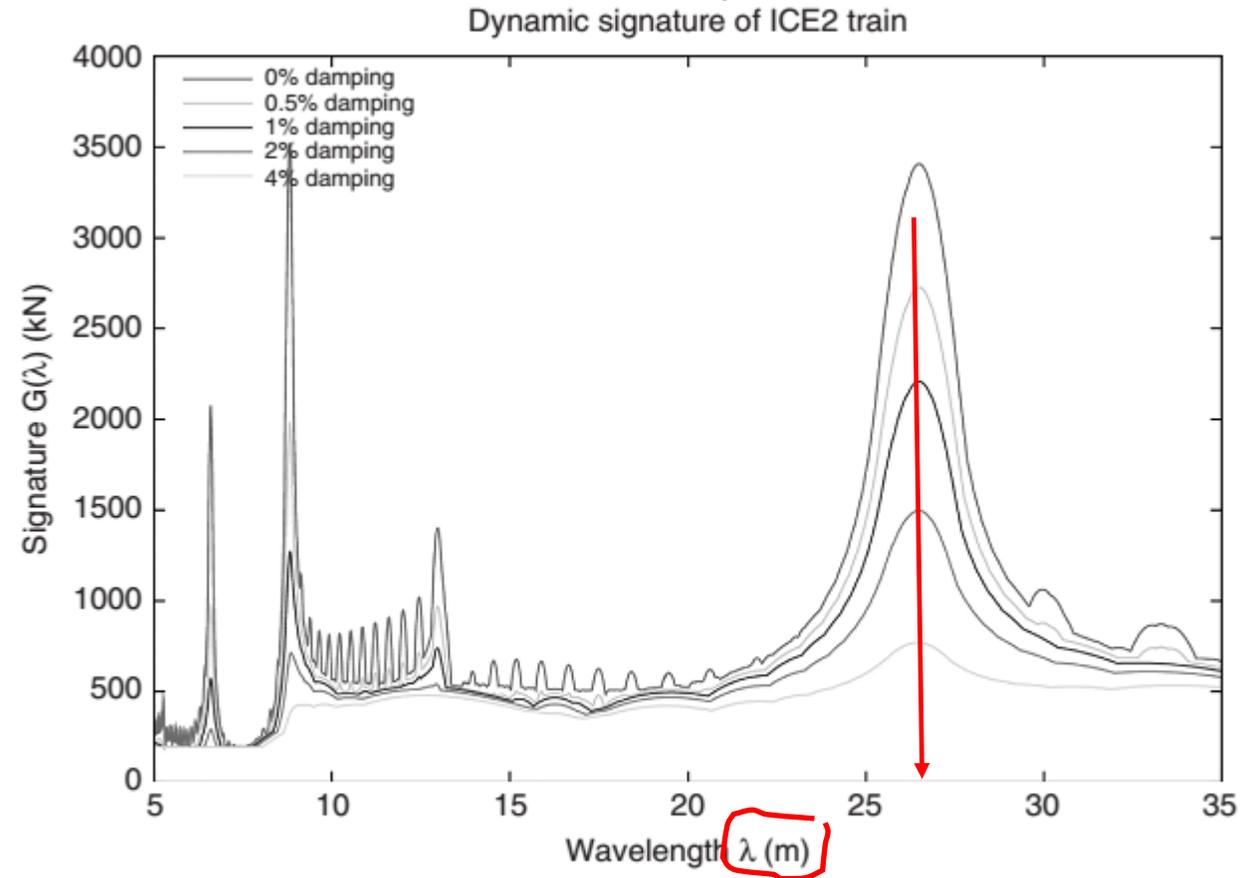


$$\frac{Min}{Stat} < 0.6 !!!$$

IV – Подвижные массы на балке с учетом жесткости пути <b>Соотв.Б2</b> Применяется в аналитических исследованиях				Путь - упругая балка, связанная с пролетным строением системой пружин и демпферов	Позволяет оценить влияние дефектов пути и колес, а также деформации напряжения в рельсах и других элементах пути
---	--	--	--	---	---

# Что есть длина волны возбуждения?

$$\lambda = \frac{v}{f_0},$$
$$\lambda = \frac{D_k}{i},$$



Dynamic signature of ICE2 train for different damping ratios.

Длина вагона ICE2 **26,4м**, между внутренними колесами тележек одного вагона 17,5м

Each train has its own dynamic signature, which is independent of the mechanical characteristics of the bridges.  
«Dynamic loads in new engineering codes for railway bridges in Europe and Spain//Bridges for High-Speed Railways»