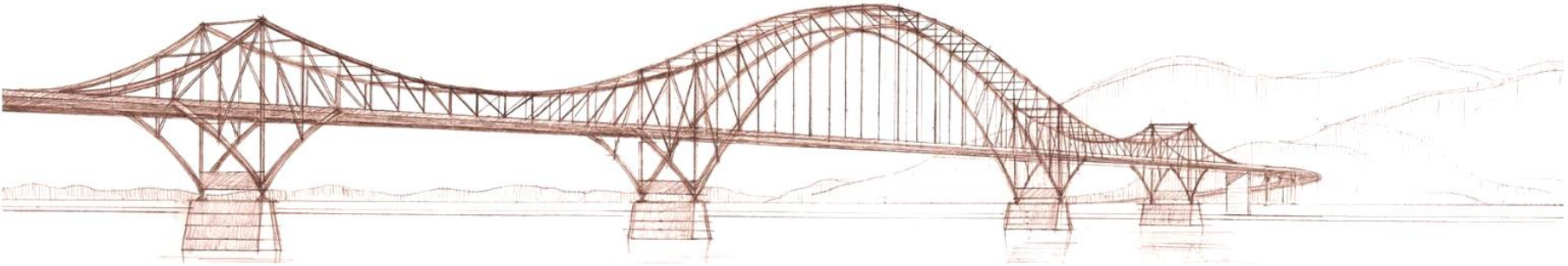
Опыт расчета мостов на динамическое воздействие от высокоскоростных поездов на ВСМ Москва-Казань с использованием SOFiSTiK

Докладчик: Уткин А.А.

27 мая 2016 Санкт-Петербург

Расчеты строительных конструкций зданий и мостов, геотехнический анализ



Пилотный проект ВСМ «Москва-Казань»

Самый современный подвижной состав

Пригородные скоростные поезда

до 200 км/ч

MAX

Региональные высокоскоростные поезда

до 400 км/ч

«Ночные» поезда

до 200 км/ч

Облегченные контейнерные поезда

до 160 км/ч

ВСМ Москва-Казань. ГЧП

1,07 трлн. руб.
общая стоимость проекта

Инвестиции государства в проект на этапе строительства не превышают 70 млрд. руб. в год

Таблица 3. Основные объемы работ по строительству искусственных сооружений

Тип сооружения	Кол., шт.	Длина сооружений, м	Сборный железобетон, м³	Монолитный железобетон, м³	Металл, т
Большие мосты	53	31967	35465	214430	30340
Средние мосты	78	5246	100620	361710	42750
Эстакады	49	77098	29410	2728160	201518
Железнодорожные путепроводы	33	3453	40248	144684	16150
Автодорожные путепроводы	128	23195	141986	510413	60325
Водопропускные трубы	454	14528 *	34504	32234	3178
Итого	795	117764 **	382233	3991631	354261

Общая протяженность железнодорожных мостов, путепроводов и эстакад составляет 117 764 пог. м или 15% от длины железнодорожной линии на участке ВСМ «Москва — Казань».

Дополнительные требования к конструкции пролетного строения согласно СТУ

- Ограничение максимальных прогибов, смещений и углов поворота узлов конструкции
- Ограничение максимального ускорения узлов конструкции на уровне верхнего строения пути и на уровне расположения пассажиров
- Ограничение первых частот собственных колебаний

Требования к динамическим расчетам согласно СТУ

- Вариация масс пролетного строения
- Анализ всех 22-х поездов
- Диапазон скоростей от 144 до 420 км/ч с шагом, исключающим вероятность пропуска зон резонанса и занижения пиковых значений амплитуд, скоростей и ускорений
- Учет дефектов рельсового пути и колес поезда

Схемы нагрузок от высокоскоростных поездов

Поезда A1-A10 (аналог HSLM - Европейских норм)

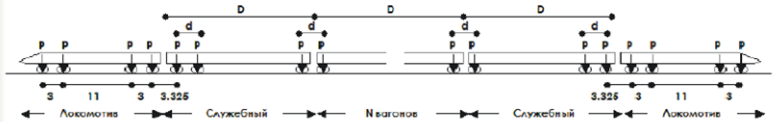


Таблица Ж.1

Варианты поезда	Промежуточные вагоны			Величина нагрузки на ось
	Число вагонов [1])	Длина вагона	База тележки	
	N	*D*	*d*	*P*
	шт	м	м	кН
A1	18	18	2	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2	180
A4	15	21	3	190
A5	14	22	2	170
A6	13	23	2	180
A7	13	24	2	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2	210
A10	11	27	2	210

[1]) общее число вагонов на 4 больше (2 локомотива + 2 служебных).

Европейские реальные поезда (RT)

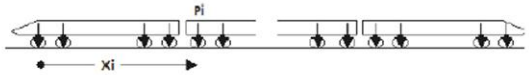


Таблица Ж.2

ICE2		ETR-Y		EUROSTAR 373-1		AVE		TALGO AV		VIRGIN		THALYS	
Xi	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*
м	кН	м	кН	м	кН	м	кН	м	кН	м	кН	м	кН
0	195	0	187	0	170	0	172.1	0	170	0	170	0	170
3	195	3	187	3	170	3	172.1	2.65	170	2.7	170	3	170
11.46	195	12	187	14	170	14	170.7	11	170	17	170	14	170
14.46	195	15	187	17	170	17	170.7	13.65	170	19.7	170	17	170
19.31	112	19.4	120	20.275	170	20.28	131.6	19.13	170	23.9	170	20.275	163
21.81	112	22.4	120	23.275	170	23.28	131.6	28.1	170	26.6	170	23.275	163
38.31	112	38.4	120	38.975	170	38.98	161.9	41.24	170	40.9	170	38.975	170
40.81	112	41.4	120	41.975	170	41.98	161.9	54.38	170	43.6	170	41.975	170
45.71	112	45.5	120	57.675	170	57.68	169.2	67.52	170	47.8	170	57.675	170
48.21	112	48.5	120	60.675	170	60.68	169.2	80.66	170	50.5	170	60.675	170
64.71	112	64.5	120	76.375	170	76.38	167.9	93.8	170	64.8	170	76.375	170
67.21	112	67.5	120	79.375	170	79.38	167.9	106.94	170	67.5	170	79.375	170
72.11	112	71.6	120	95.075	170	95.08	160.5	120.08	170	71.7	170	95.075	170

Существующие Российские поезда (RU)

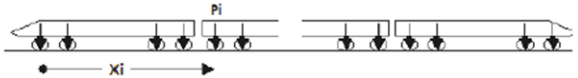
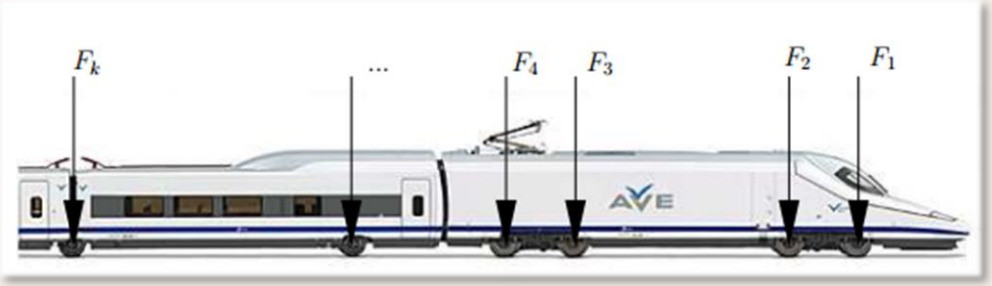


Таблица Ж.4

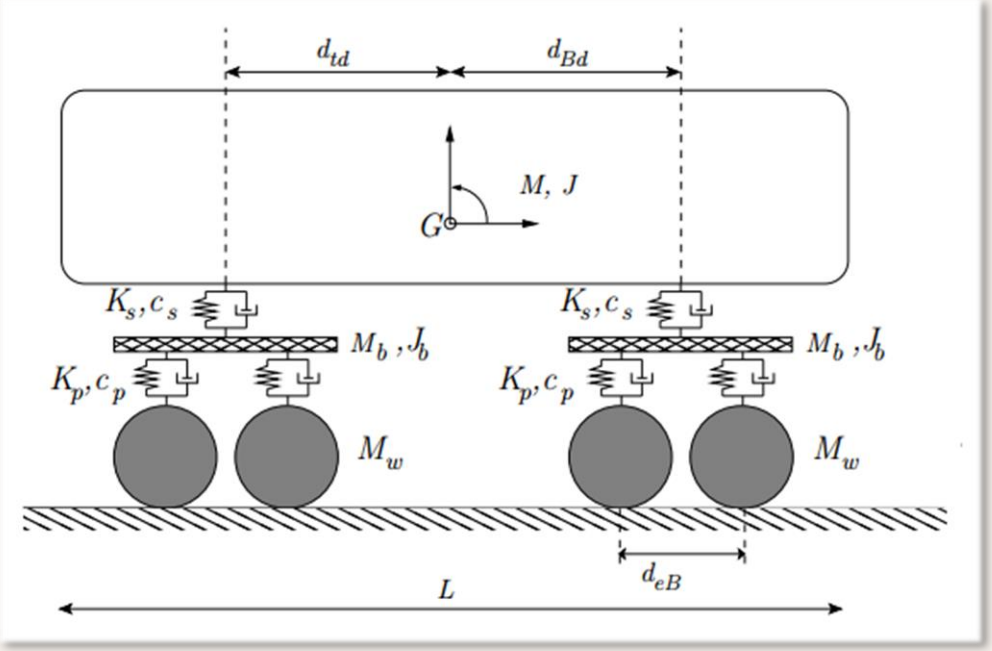
ЭР200		ЭВС1 "Сапсан"		ЭВС2 "Сапсан"		ЭВС1 х 2		ЭВС2 х 2	
Xi	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*	*Xi*	*Pi*
м	кН	м	кН	м	кН	м	кН	м	кН
2.65	126	3.73	159	3.73	159	3.73	159	3.73	159
5.15	126	6.33	159	6.33	159	6.33	159	6.33	159
21.45	126	21.10	159	21.10	159	21.10	159	21.10	159
23.95	126	23.70	159	23.70	159	23.70	159	23.70	159
29.25	155	28.46	164	28.46	164	28.46	164	28.46	164
31.75	155	31.06	164	31.06	164	31.06	164	31.06	164
48.05	155	45.83	164	45.83	164	45.83	164	45.83	164
50.55	155	48.43	164	48.43	164	48.43	164	48.43	164
55.85	158	53.19	142	53.19	166	53.19	142	53.19	166
58.35	158	55.79	142	55.79	166	55.79	142	55.79	166
74.65	158	70.56	142	70.56	166	70.56	142	70.56	166
77.15	158	73.16	142	73.16	166	73.16	142	73.16	166

Методики решения задачи

Методика А
Расчет движения сосредоточенных сил, моделирующих подвижной состав



Методика Б
Расчет взаимодействия подвижного состава и конструкции пролетного строения (контактная задача)



Особенности расчета

- Учет всех 22-х поездов
- Учет скоростей от 144 до 420 км/ч с шагом 5 км/ч, а в зонах резонанса – 1 км/ч
- Учет четырех вариаций масс для каждого пролетного строения
- Общее количество расчетов около 5000 для каждого пролетного строения
- Множество пролетных строений с разными длинами пролетов и различными строительными высотами

Способы решения задачи в SOFiSTiK

Методика А

Метод прямого интегрирования:

- **DYNA**
  - Задание нагрузок в виде подвижного состава
  - Задание нагрузок в виде динамических функций
- **ASE**
  - Задание нагрузок в виде динамических функций

Метод разложения по собственным формам:

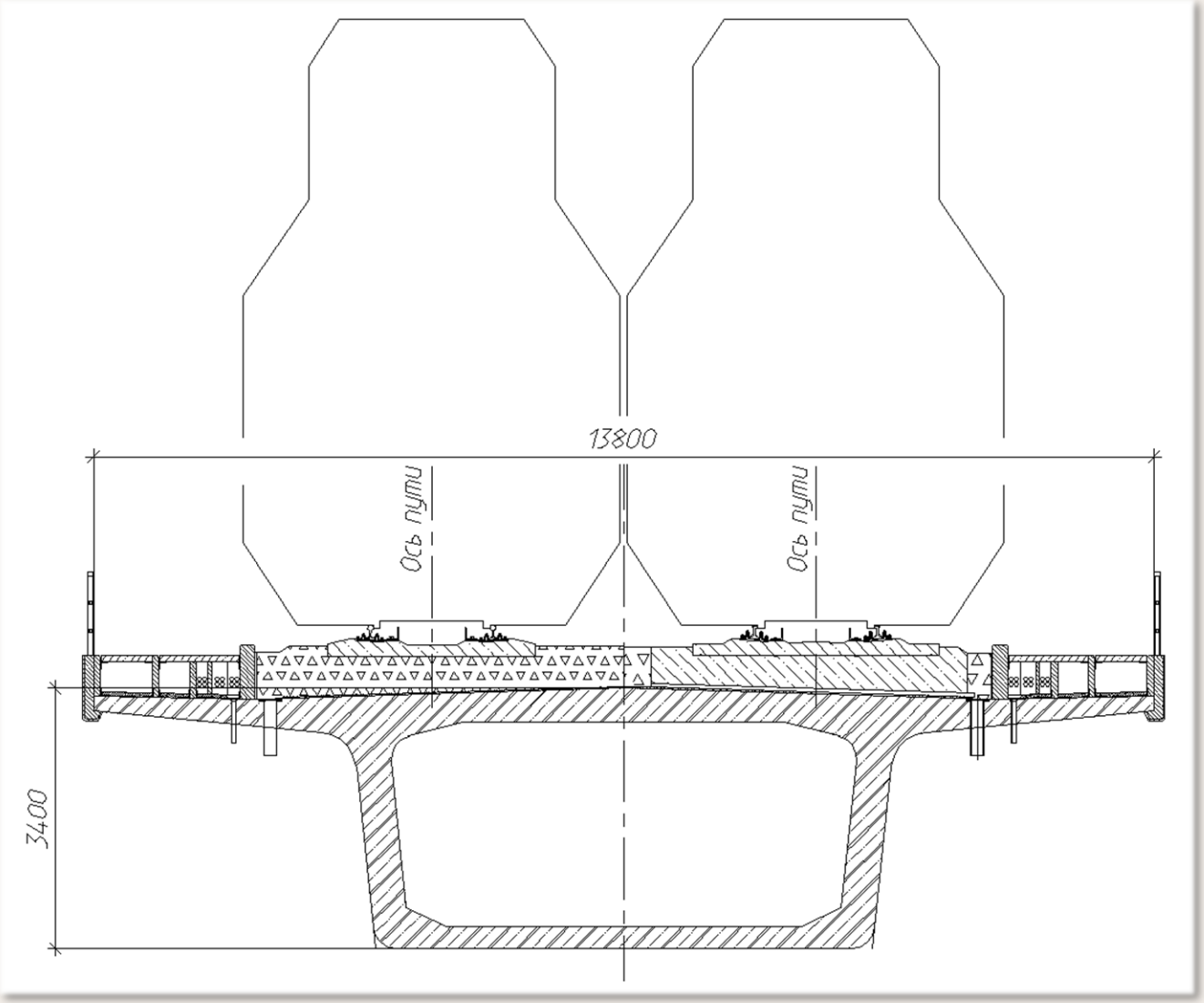
- **DYNA**
  - Задание нагрузок в виде динамических функций

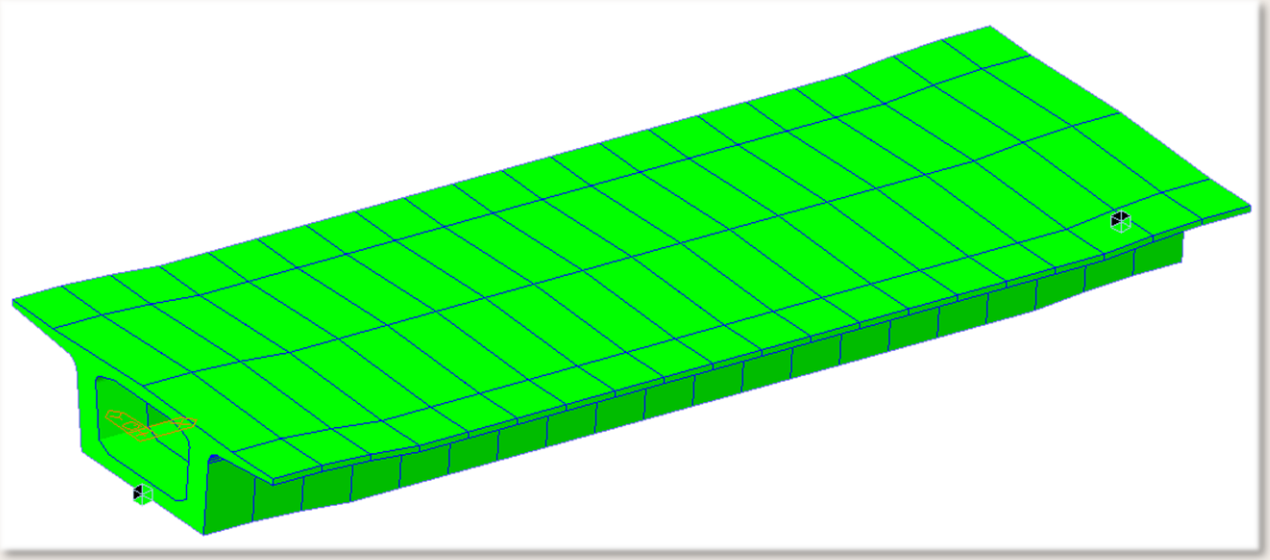
Методика Б

Метод прямого интегрирования:

- **DYNA**
  - Задание нагрузок в виде подвижного состава (виртуальный путь)
- **ASE**
  - Нелинейный расчет взаимодействия подвижного состава и конструкции пролетного строения (контактная задача)

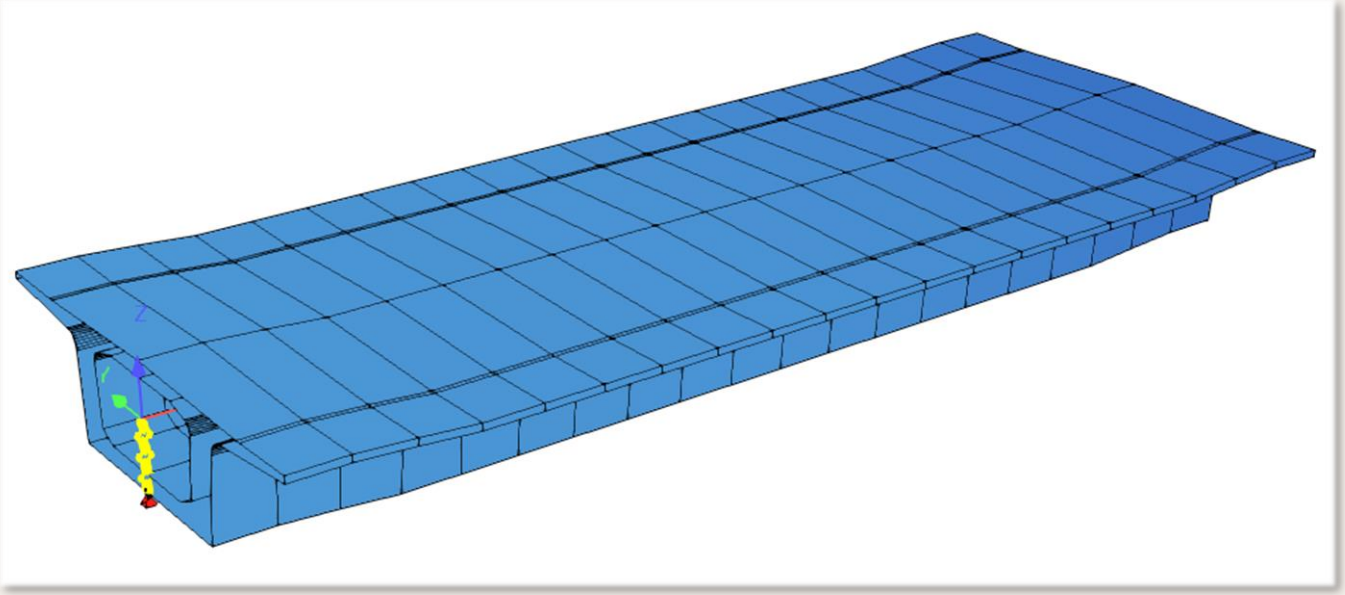
Железобетонное предварительно напряженное разрезное пролетное строение длиной 34.2 м (Lр = 33 м)





Расчетная модель в MIDAS Civil

Расчетная модель в SOFiSTiK



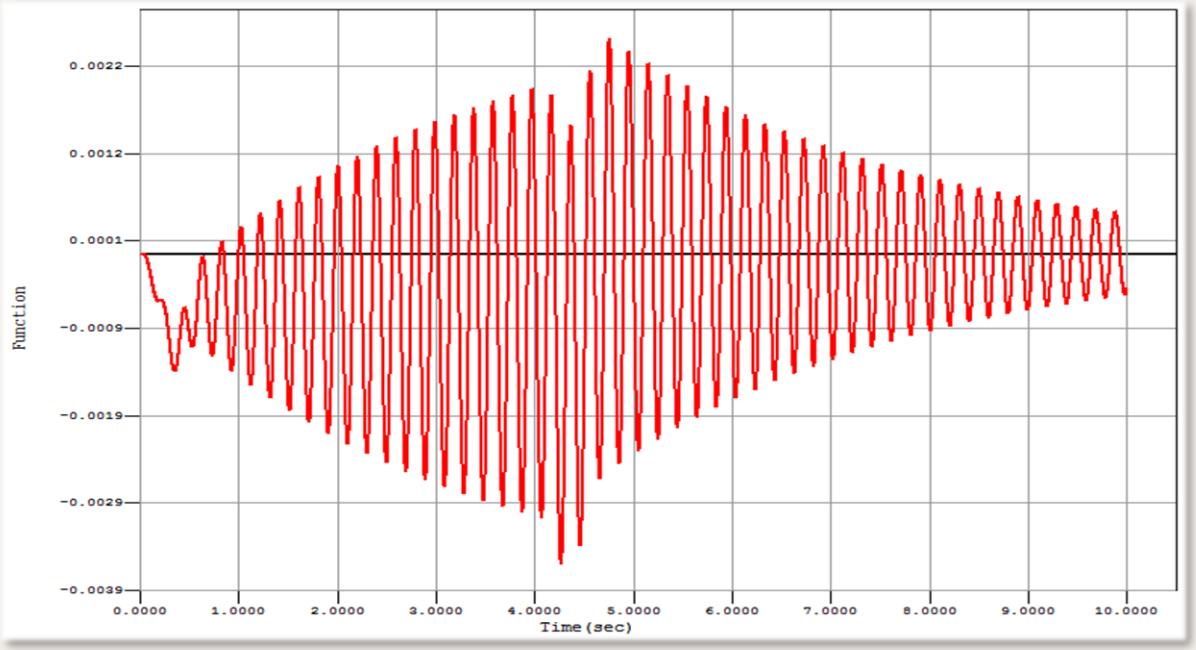


График вертикального перемещения Dz (м) от времени для центрального узла при прохождении поезда А1 на скорости 330 км/ч в MIDAS Civil

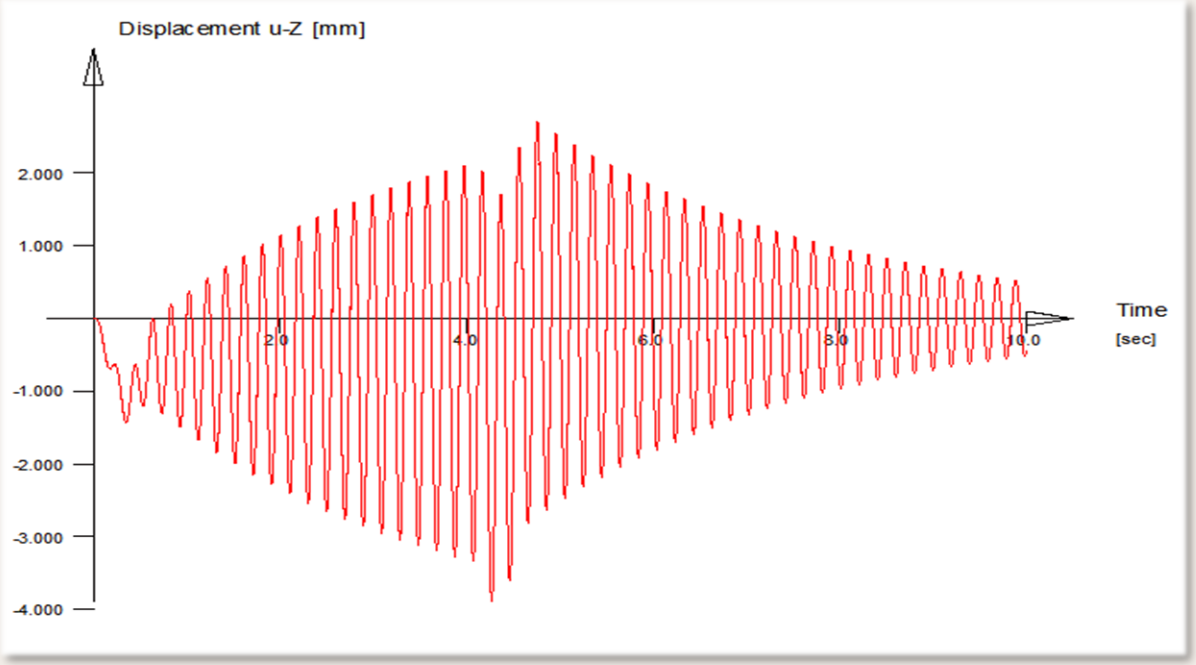


График вертикального перемещения Dz (мм) от времени для центрального узла при прохождении поезда А1 на скорости 330 км/ч в SOFiSTiK

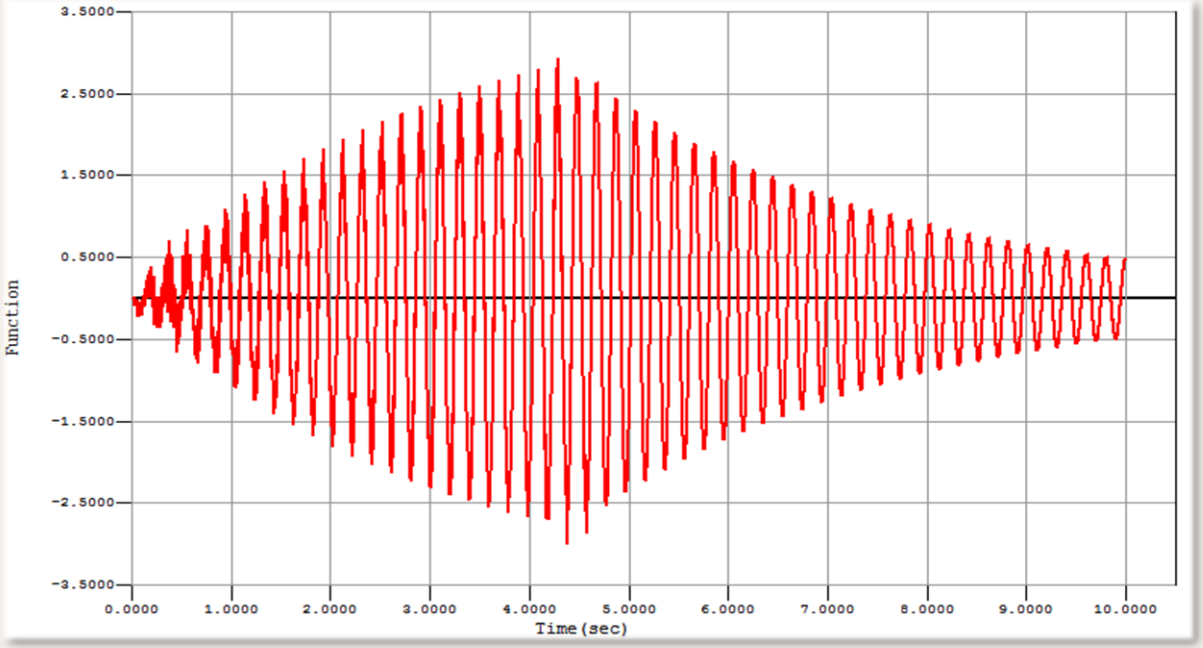


График вертикального ускорения Az (м/с^2) от времени для центрального узла при прохождении поезда А1 на скорости 330 км/ч в MIDAS Civil

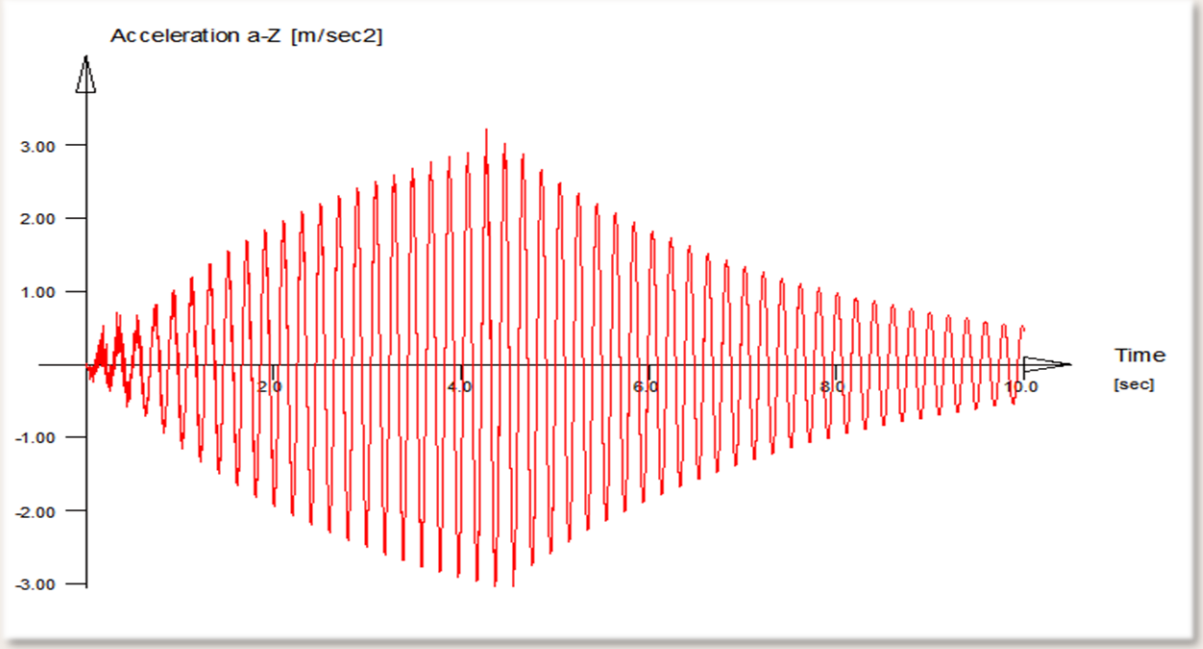


График вертикального ускорения Az (м/с^2) от времени для центрального узла при прохождении поезда А1 на скорости 330 км/ч в SOFiSTiK

Автоматизация расчетов

Препроцессор

Начальная расчетная схема в виде файла *.cdb

Дополнительные исходные данные с формы программы

Макросы CADINP

Расчет при помощи ядра SOFiSTiK

Серии динамических расчетов для выбранных поездов и скоростей

Постпроцессор

Считывание результатов из базы данных при помощи SOFiSTiK API, выборка и формирование результатов расчетов

M:\BCM\Унифицированные балки\Calculated\GB_33_3400_ballast_min.vsmtrain - VSM Train

File Calculation Tools Settings Help

Input data | Output data | Results | Other

Initial SOFiSTiK database

C:\SOFiSTiK\VSM_Train\GB_33_3400_ballast_min.cdb [Browse]

Train parameters

Start speed, kmh	40
End speed, kmh	420
Speed step, kmh	5

Model parameters

System	2D / 3D
Element length, m	1.65
Bridge length, m	33
Load cases to be converted into the masses	2
Edge or structural line number	1
Train axis division	1 / 3 / 3x3 / 3x5
Train load coefficient	1

Calculation parameters

Calculation type	DYNA Automated train / DYNA Manual function / DYNA Modal analysis
Total step number	25
Results save interval	1
Time step coefficient	1
Damping groups	-1
Frequency #1, Hz	5.06
Frequency #2, Hz	12.38
Damping coefficient	0.01
Eigen values number	

Used trains

Select all | Unselect all

	Train name	Enabled
1	A1	☑
2	A2	☑
3	A3	☑
4	A4	☑
5	A5	☑
6	A6	☑
7	A7	☑
8	A8	☑
9	A9	☑
10	A10	☑
11	ICE2	☑
12	ETR-Y	☑
13	EUROSTAR 373-1	☑
14	AVE	☑
15	TALGO AV	☑
16	VIRGIN	☑
17	THALYS	☑
18	ER200	☑
19	Sapsan1	☑
20	Sapsan2	☑
21	Sapsan1 x2	☑
22	Sapsan2 x2	☑
23	Transporter	☐

Lane nodes id

Lane number 1

	Lane 1 load coef.
1	1

	Lane 1
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	

M:\BCM\Унифицированные балки\Calculated\GB_33_3400_ballast_min.vsmtrain - VSM Train

File Calculation Tools Settings Help

Input data | Output data | Results | Other

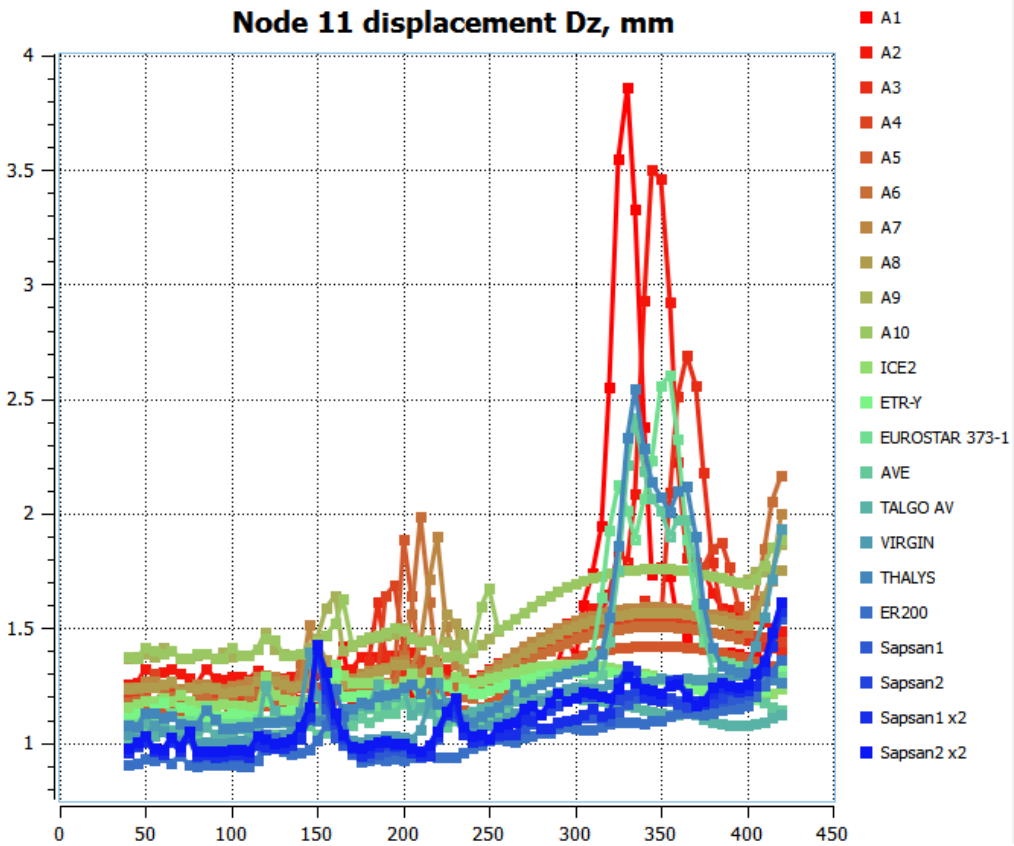
Results selection

Single results | Envelopes by speed | Envelopes by element

Node | Spring | Beam

Node id 11

Dx Dy Dz Rox Roy Roz Ax Ay Az



	40	45	50	55	
A1	1.122	1.119	1.127	1.15	1.
A2	1.259	1.264	1.322	1.297	1.
A3	1.193	1.193	1.192	1.177	1.
A4	1.212	1.214	1.234	1.301	1.
A5	1.13	1.107	1.145	1.114	1
A6	1.176	1.183	1.192	1.177	1.
A7	1.246	1.238	1.272	1.271	1.
A8	1.234	1.242	1.245	1.243	1.
A9	1.369	1.375	1.391	1.373	1.
A10	1.377	1.369	1.415	1.4	1.
ICE2	1.154	1.167	1.186	1.181	1.
ETR-Y	1.112	1.131	1.128	1.147	1.
EUROSTAR 373-1	1.086	1.082	1.129	1.117	1.
AVE	1.013	1.009	1.063	1.066	1.
TALGO AV	1.05	1.026	1.09	1.03	1.
VIRGIN	1.034	1.015	1.022	1.079	1.
THALYS	1.076	1.071	1.128	1.128	1.
ER200	0.905	0.911	0.928	0.925	0.
Sapsan1	0.956	0.982	1.006	0.966	0.
Sapsan2	0.974	1.006	1.029	0.977	0.
Sapsan1 x2	0.956	0.989	1.006	0.966	0.
Sapsan2 x2	0.976	1.007	1.032	0.977	0.

M:\BCM\Унифицированные балки\Calculated\GB_33_3400_ballast_min.vsmtrain - VSM Train

File Calculation Tools Settings Help

Input data | Output data | Results | Other

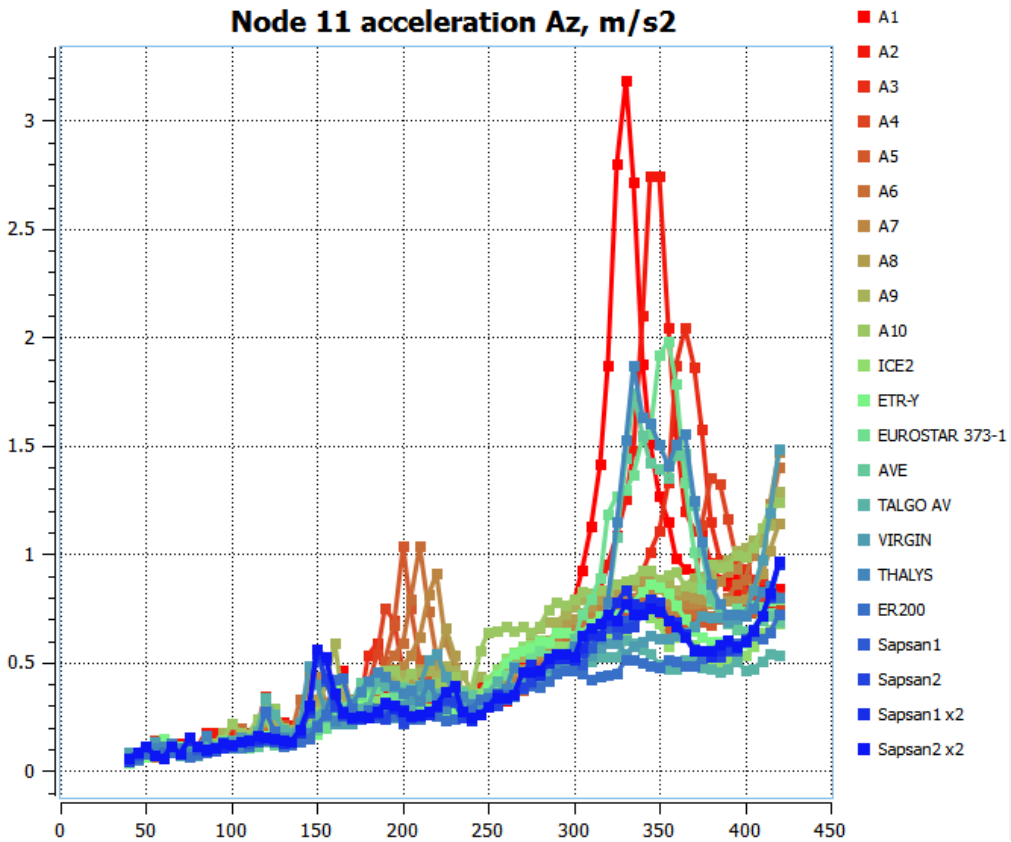
Results selection

Single results | Envelopes by speed | Envelopes by element

Node | Spring | Beam

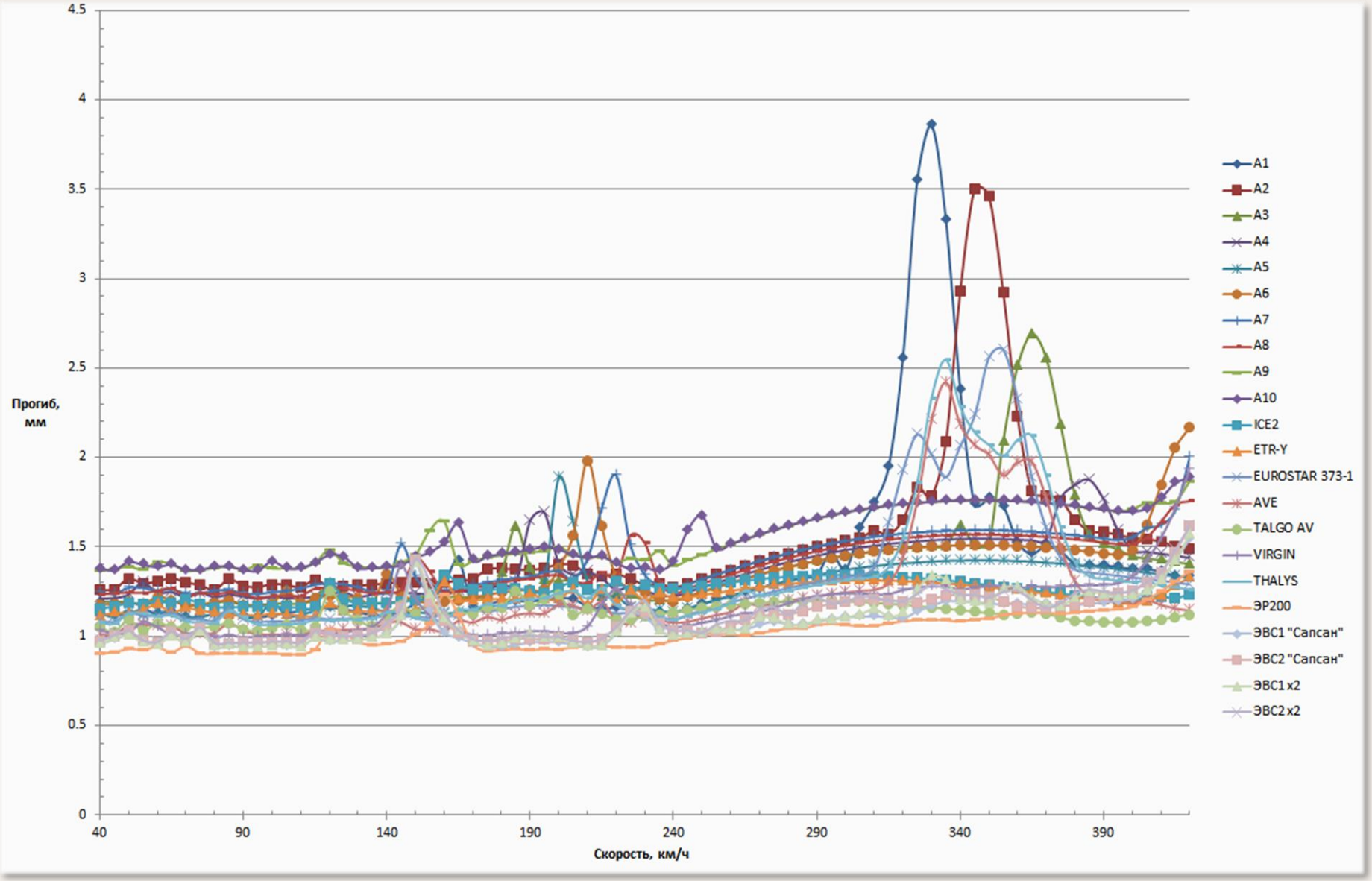
Node id 11

Dx Dy Dz Rox Roy Roz Ax Ay Az

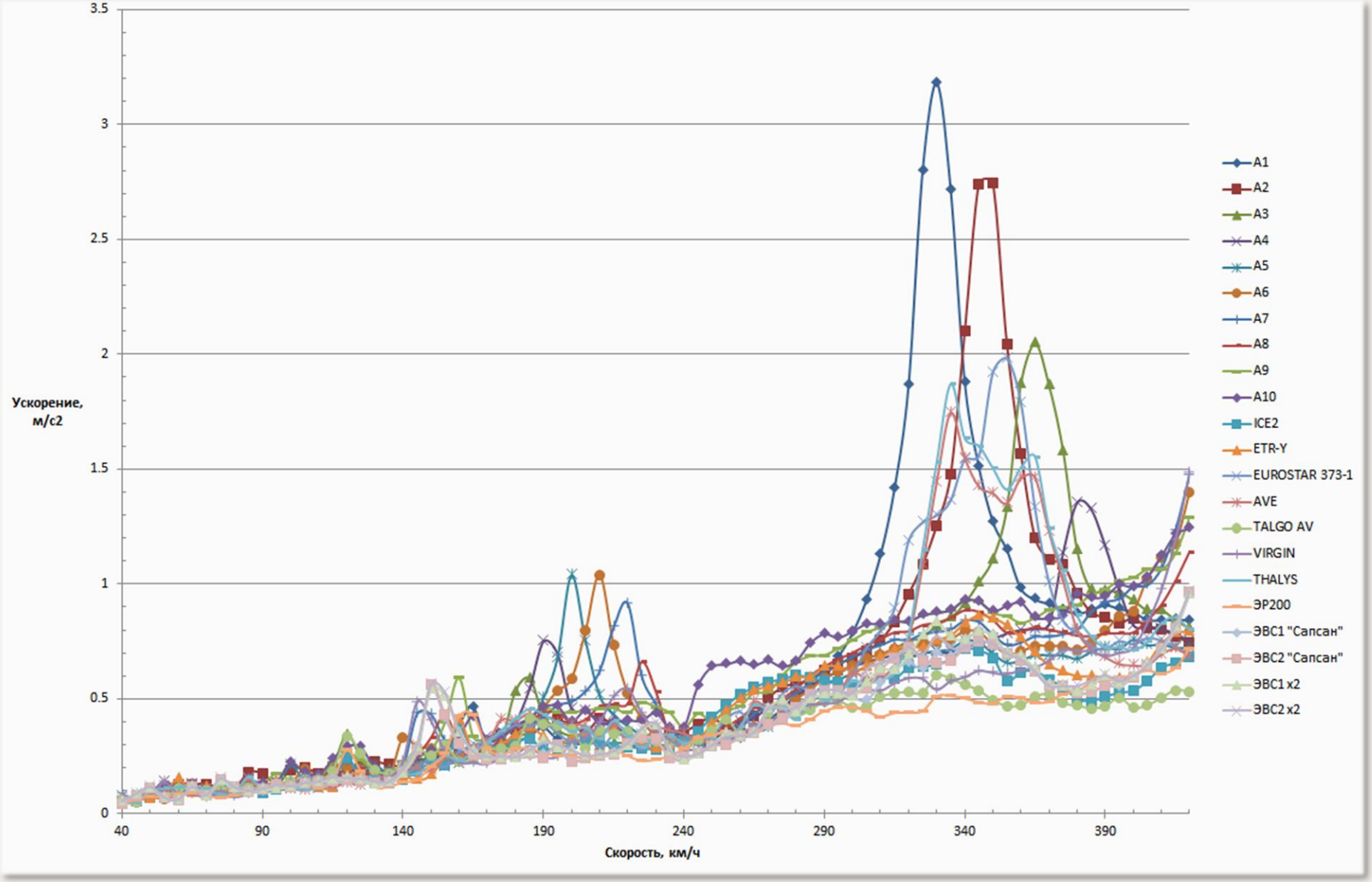


	40	45	50	55	
A1	0.059	0.055	0.083	0.101	0.
A2	0.053	0.059	0.093	0.086	0
A3	0.069	0.067	0.082	0.067	0.
A4	0.051	0.058	0.087	0.14	0.
A5	0.073	0.049	0.093	0.064	0.
A6	0.05	0.067	0.077	0.064	0.
A7	0.065	0.056	0.099	0.108	0.
A8	0.063	0.074	0.096	0.075	0.
A9	0.056	0.071	0.09	0.07	0.
A10	0.063	0.06	0.097	0.111	0.
ICE2	0.046	0.058	0.072	0.079	0.
ETR-Y	0.04	0.073	0.065	0.087	0.
EUROSTAR 373-1	0.048	0.055	0.087	0.084	0.
AVE	0.046	0.049	0.089	0.096	0.
TALGO AV	0.063	0.049	0.101	0.069	0.
VIRGIN	0.084	0.068	0.081	0.137	0.
THALYS	0.048	0.051	0.098	0.11	0.
ER200	0.041	0.061	0.076	0.071	0.
Sapsan1	0.045	0.075	0.105	0.071	0.
Sapsan2	0.045	0.079	0.112	0.071	0.
Sapsan1 x2	0.055	0.086	0.114	0.071	0.
Sapsan2 x2	0.055	0.087	0.117	0.071	0.

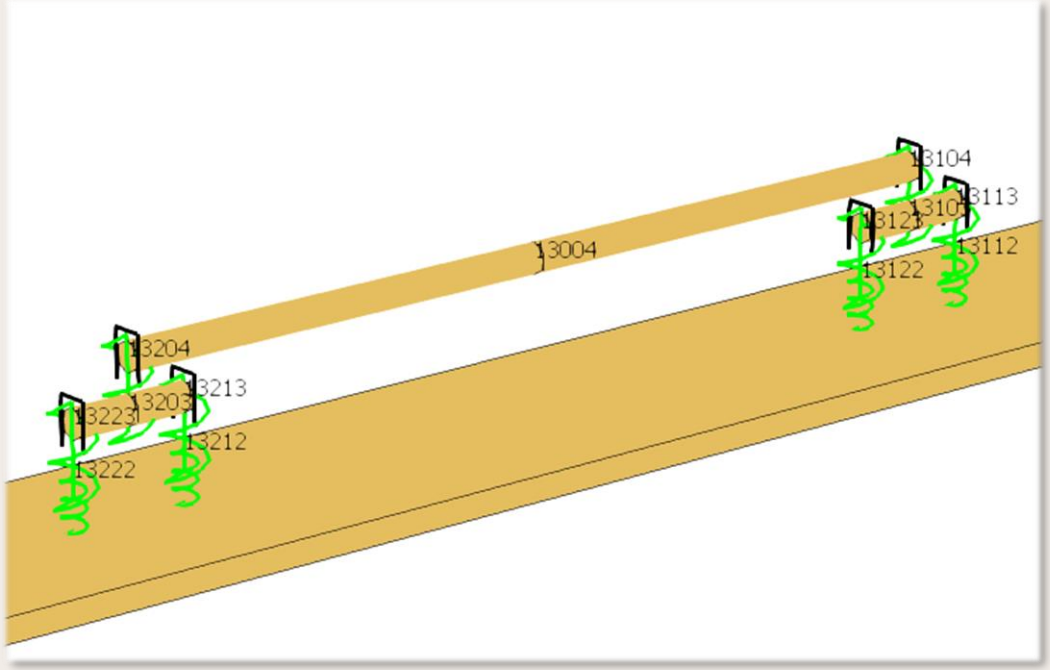
Огибающая вертикальных перемещений Dz (м)

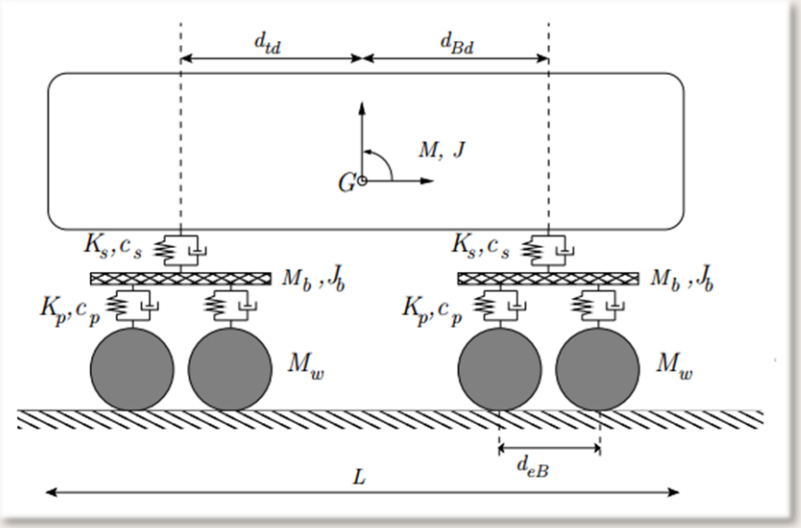


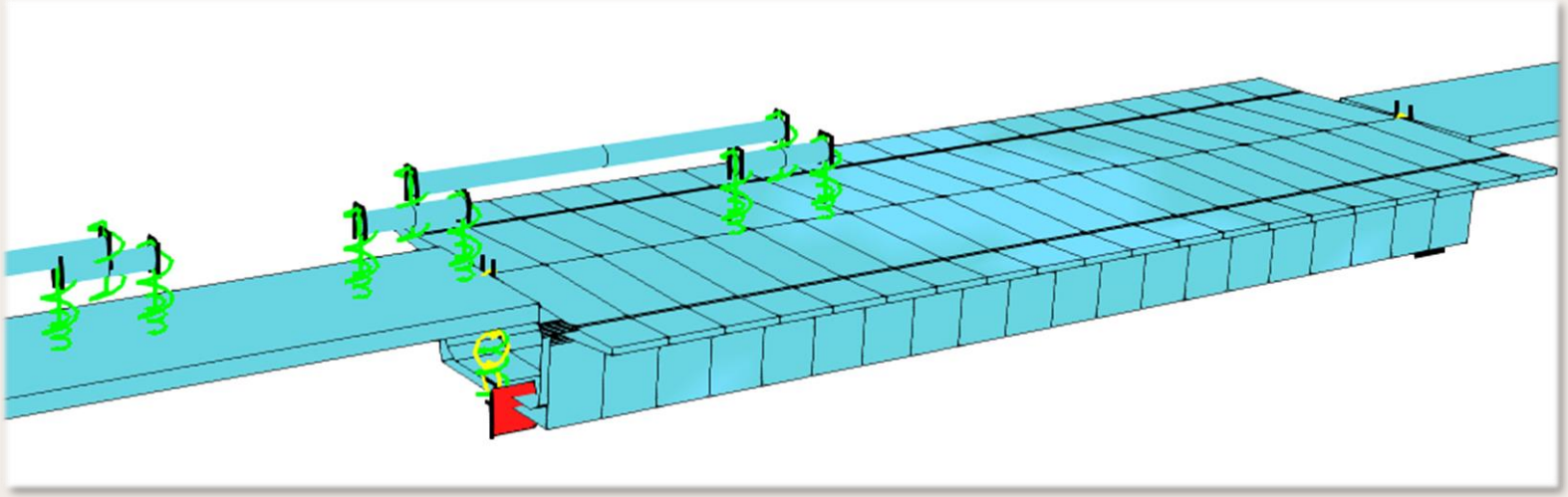
Огибающая вертикальных ускорений Az (м/с2)



Расчет на подвижную нагрузку ICE2 с учетом подрессоривания подвесок колес по методике Б







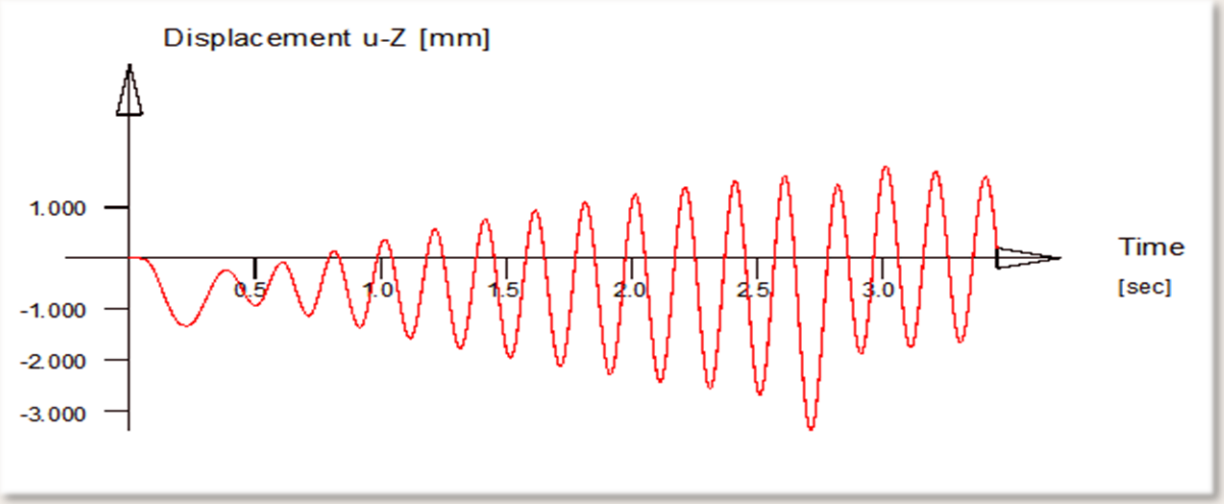


График вертикального перемещения Dz (мм) от времени для центрального узла при прохождении поезда ICE2 на скорости 480 км/ч модуль DYNA (методика А)

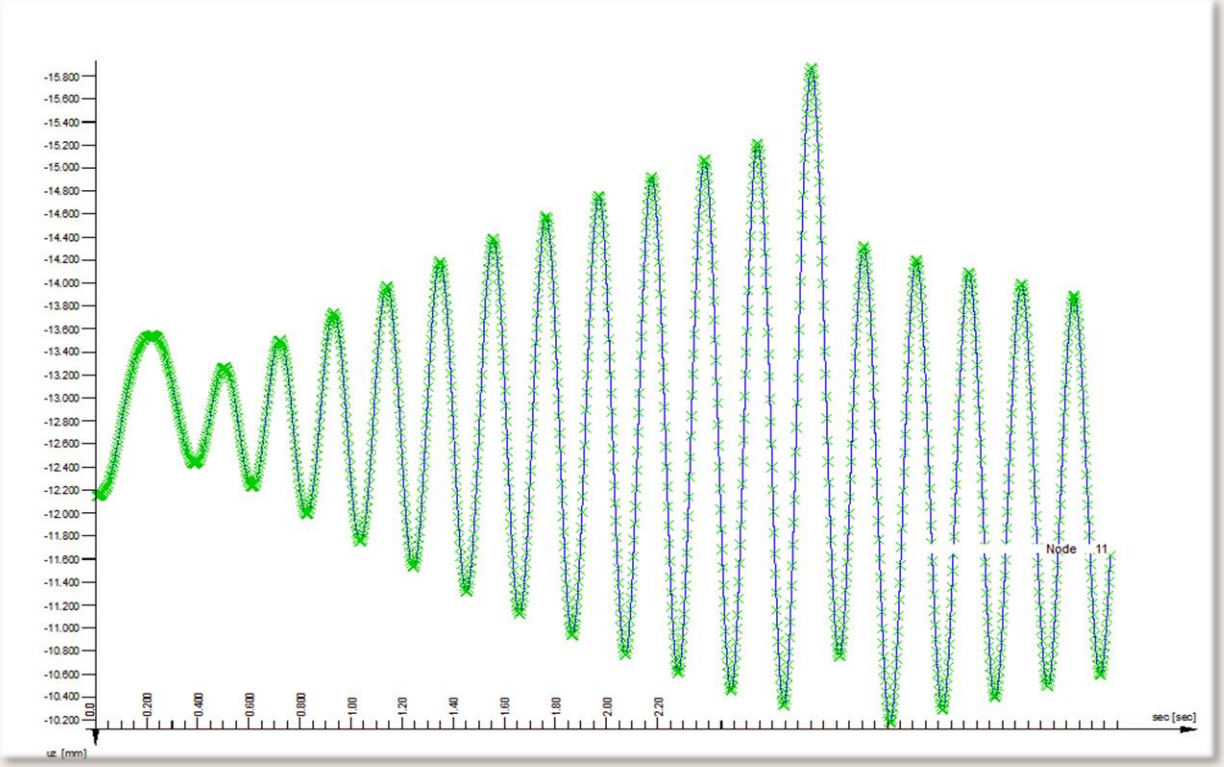


График вертикального перемещения Dz (мм) от времени для центрального узла при прохождении поезда ICE2 на скорости 460 км/ч модуль ASE (методика Б)

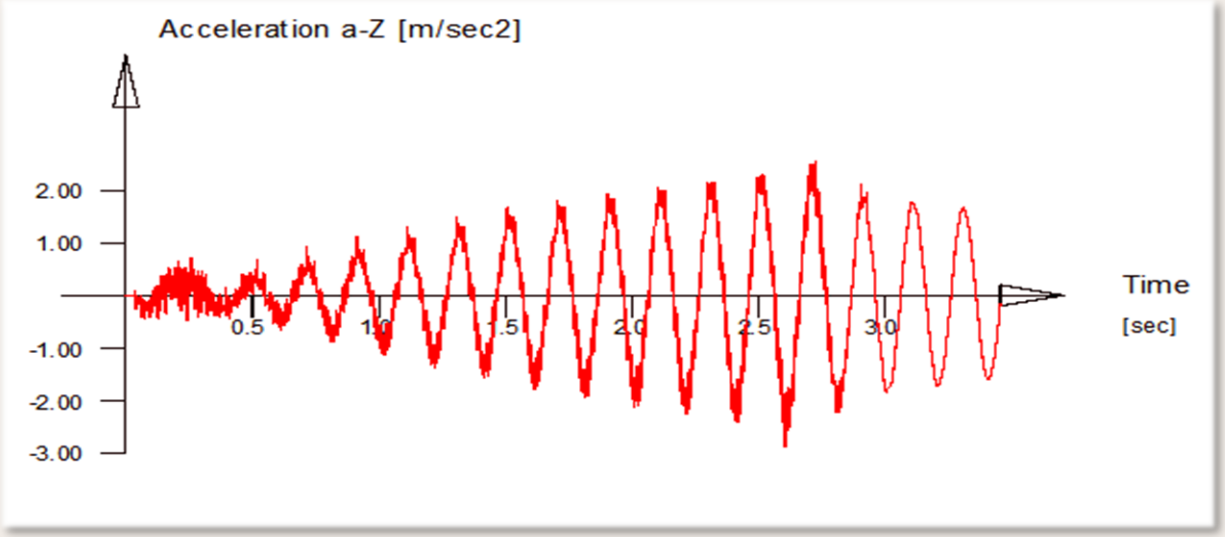


График вертикального ускорения Az (м/с^2) от времени для центрального узла при прохождении поезда ICE2 на скорости 480 км/ч модуль DYNA (методика А)

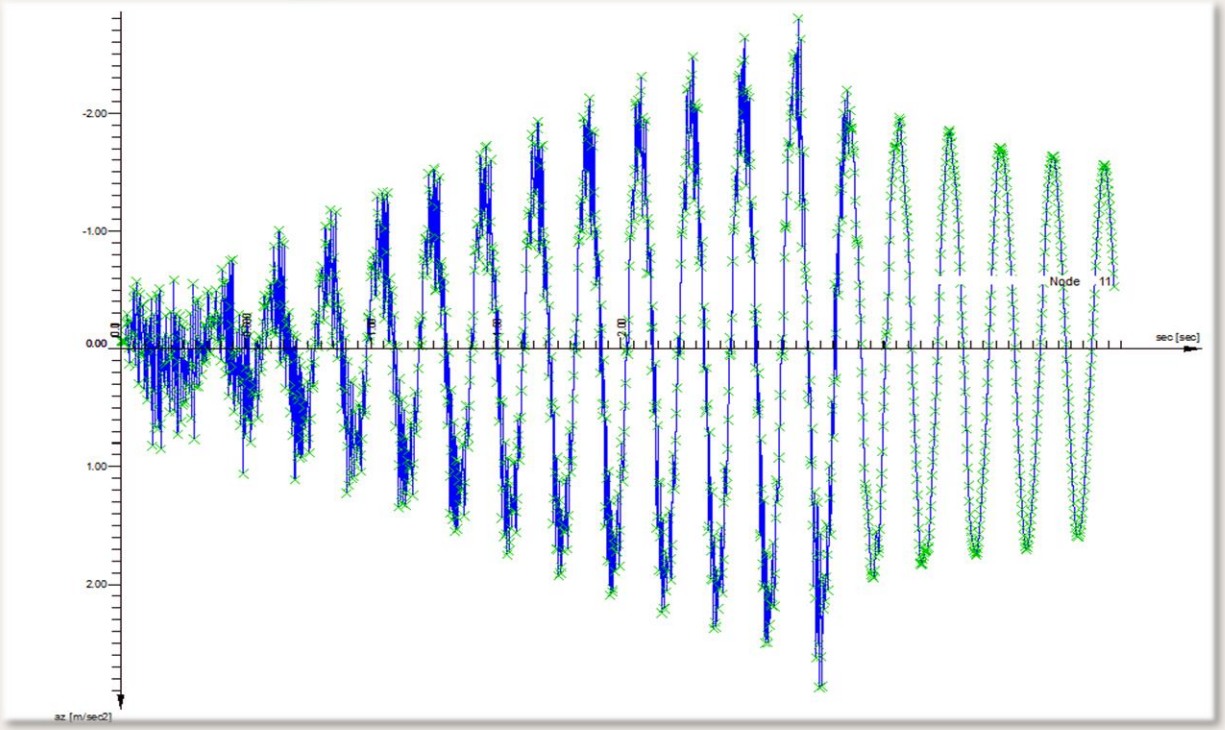


График вертикального ускорения Az (м/с^2) от времени для центрального узла при прохождении поезда ICE2 на скорости 460 км/ч модуль ASE (методика Б)

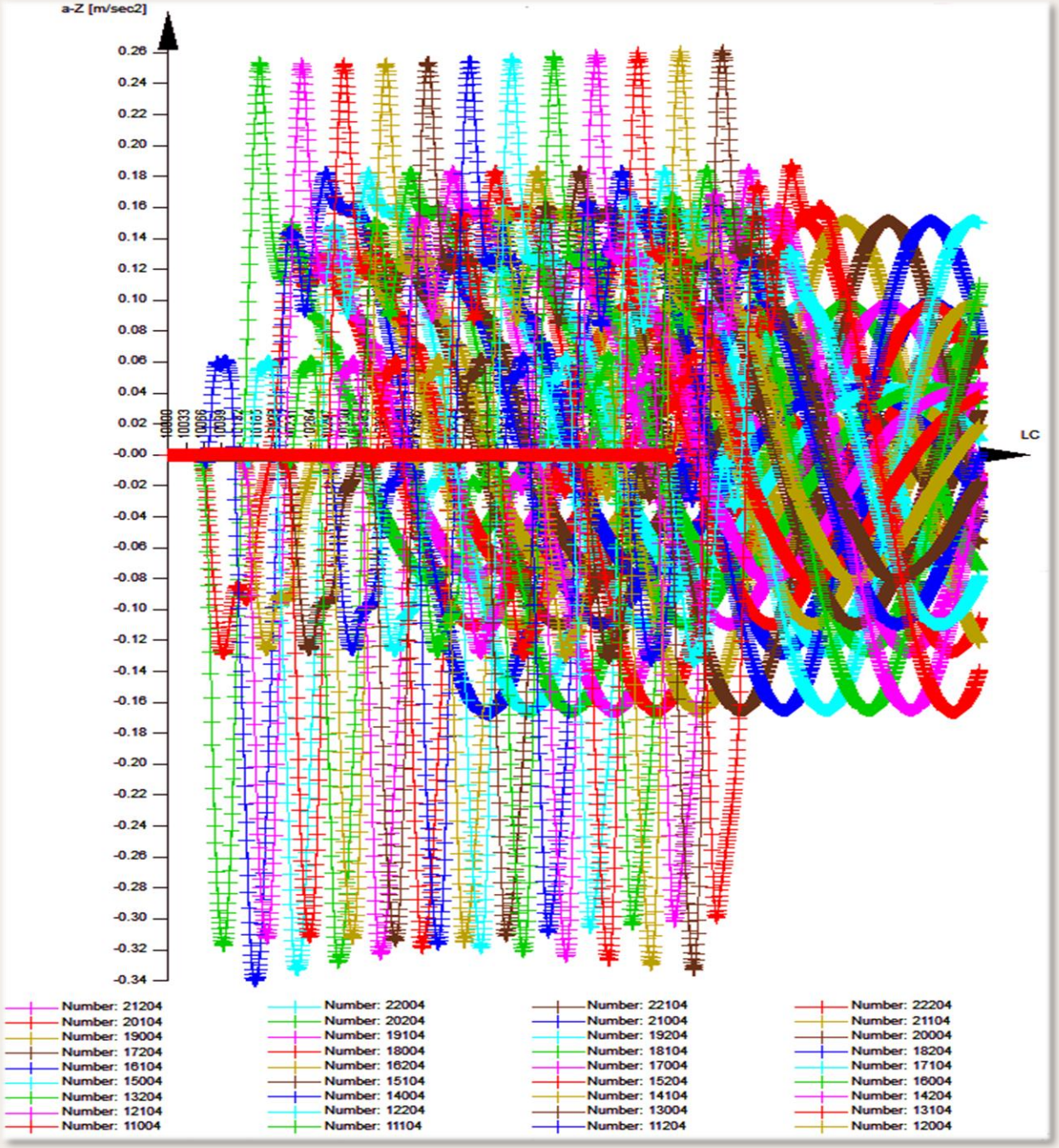
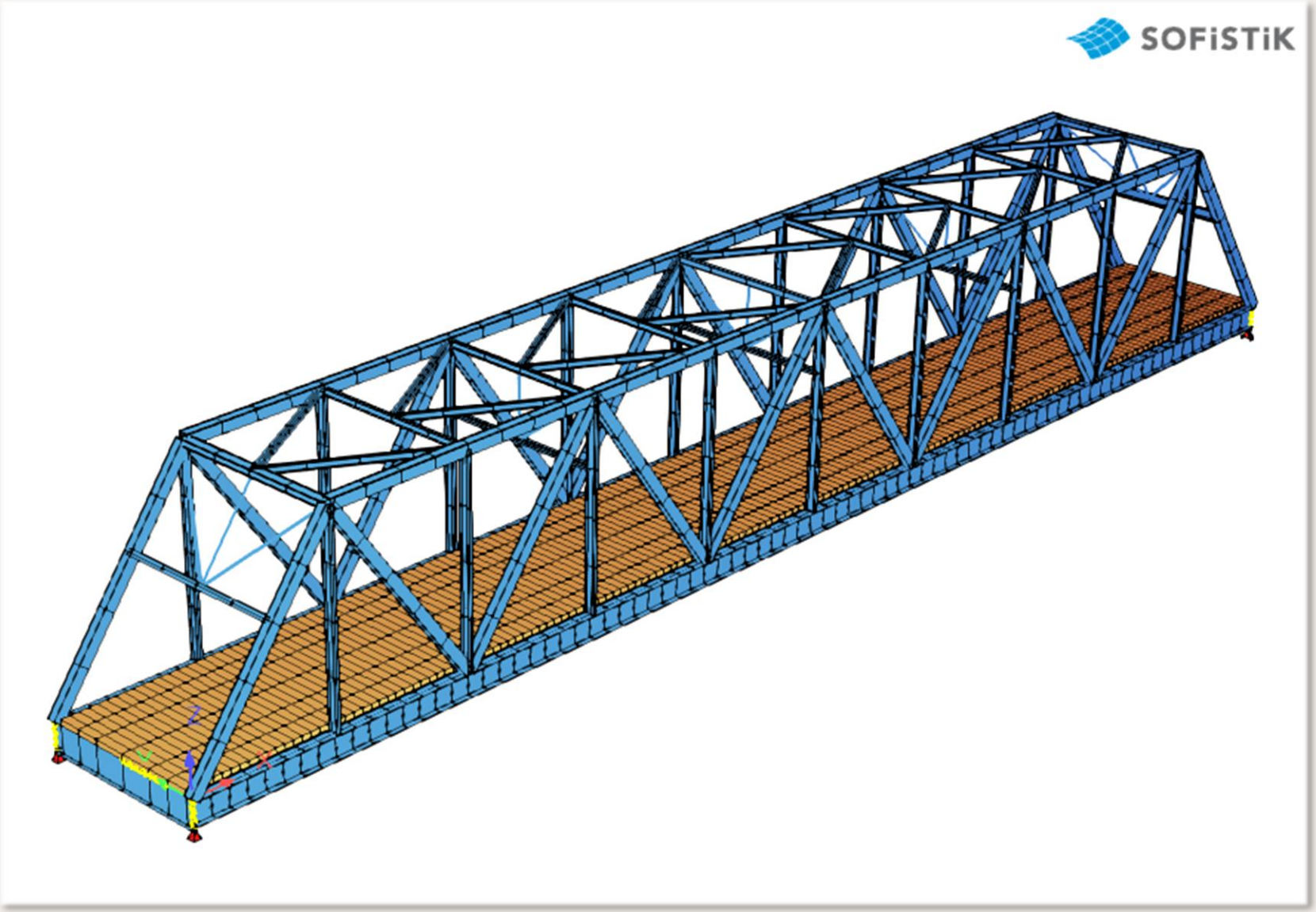
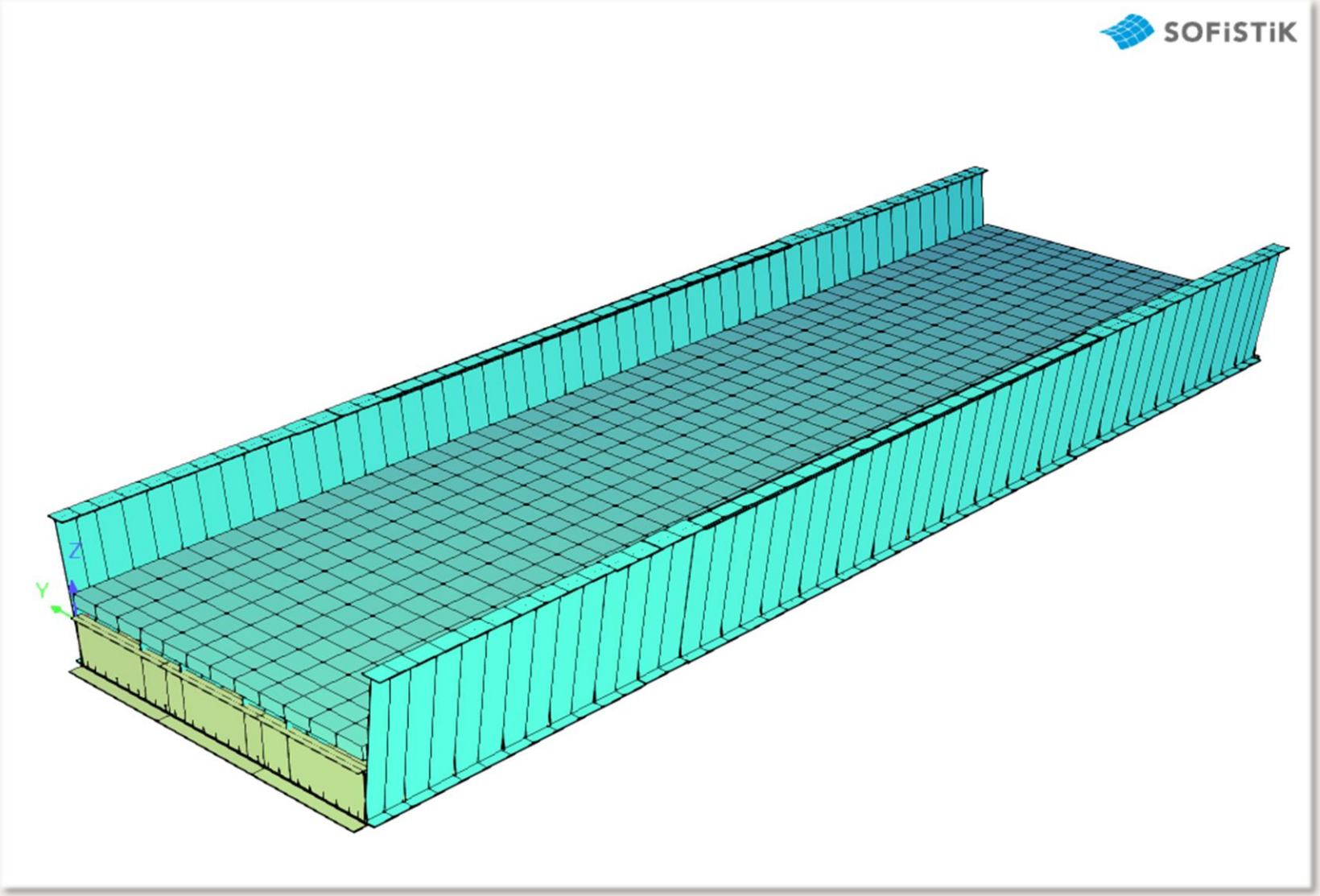


График вертикального ускорения Az (м/с^2) от времени для узлов, находящихся на уровне пассажиров, при прохождении поезда ICE2 на скорости 460 км/ч модуль ASE (методика Б)

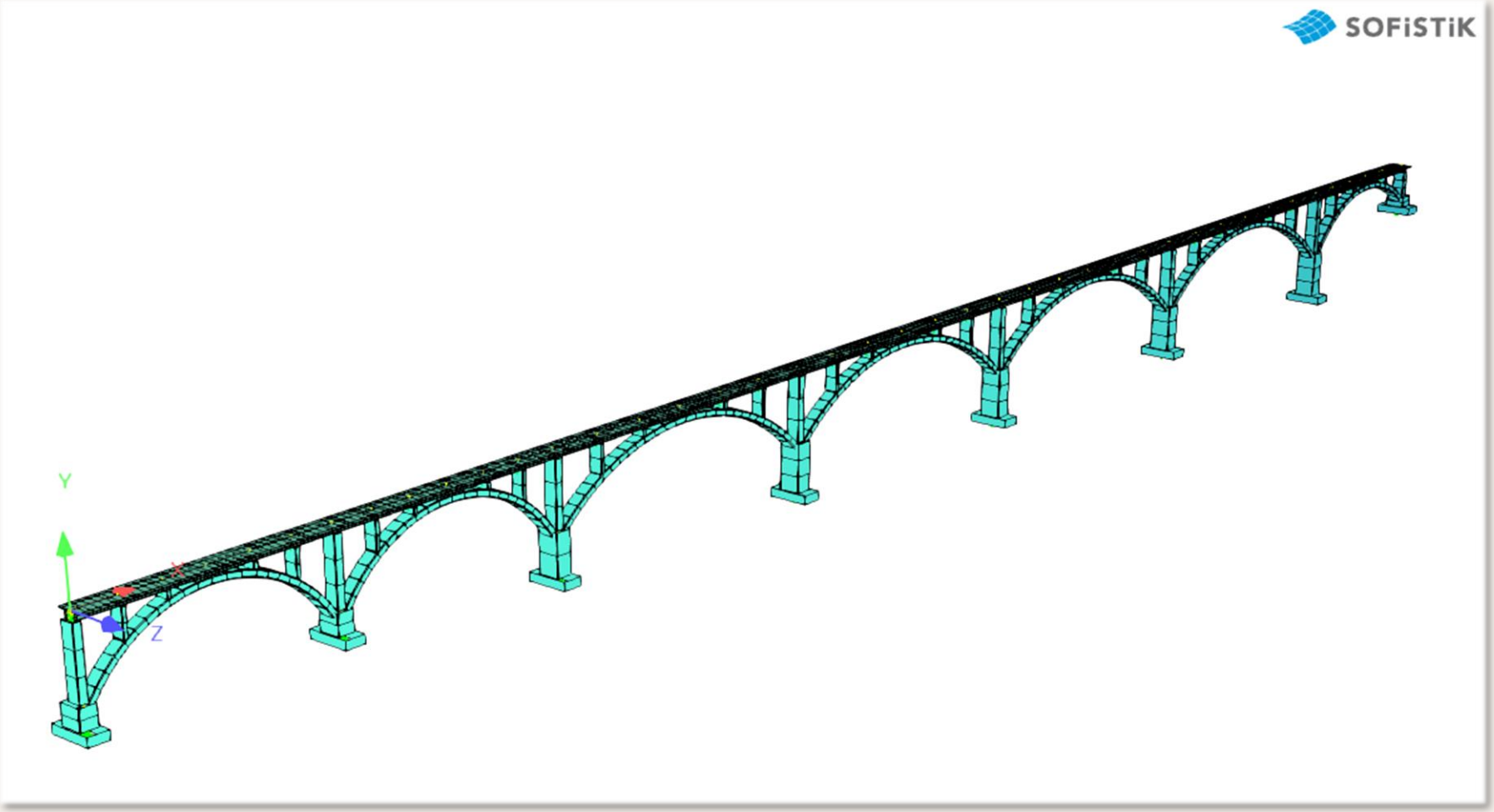
Сталежелезобетонная ферма длиной 110 м



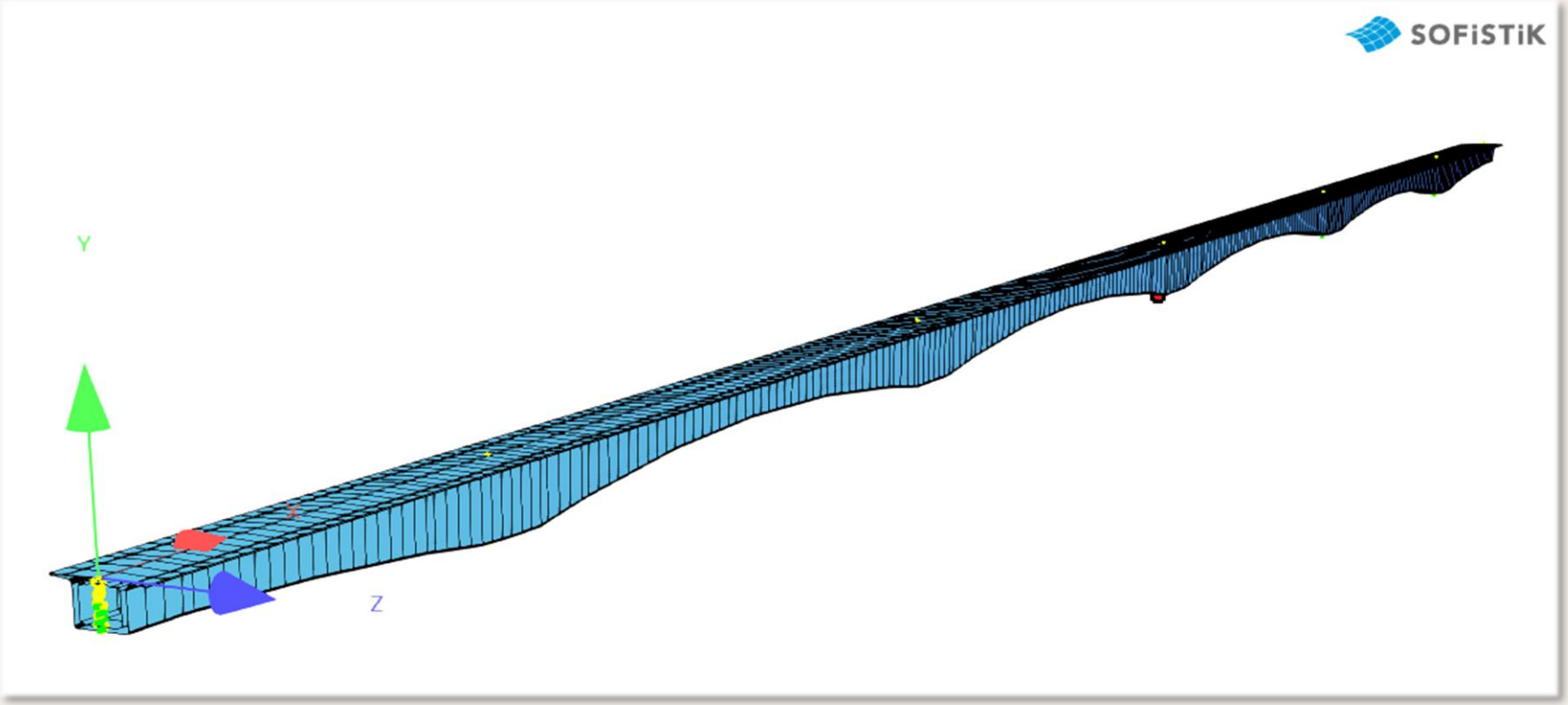
Сталежелезобетонная разрезная балка длиной 49 м



Арочное пролетное строение длиной 980 м



Железобетонное предварительно напряженное неразрезное пролетное строение длиной 800 м



Преимущества и недостатки SOFiSTiK

Преимущества:

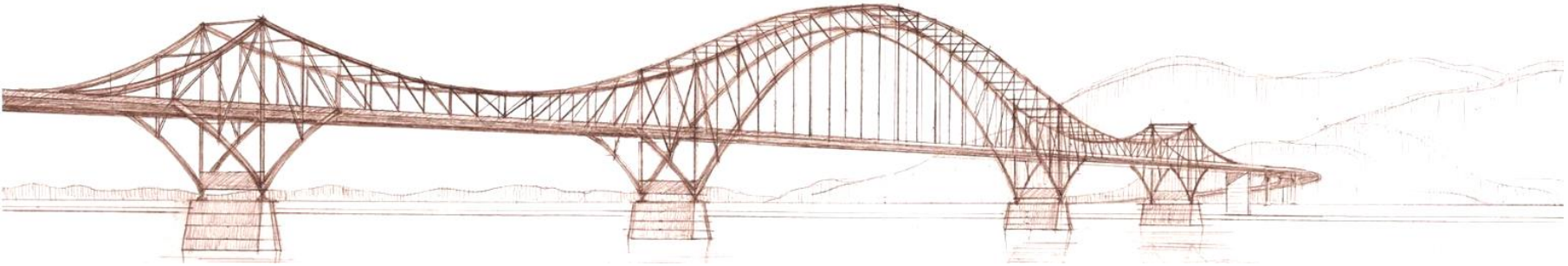
- Мощные инструменты для выполнения различных видов расчетов
- Огромные возможности по автоматизации расчетов при помощи встроенного языка программирования CADINP и доступа к базе данных через SOFiSTiK API
- Возможность описания расчетной схемы и всех возможных видов расчетов при помощи языка CADINP
- Удобные инструменты для формирования отчетов, автоматически обновляющихся после повторных расчетов

Недостатки:

- Неудобная лицензионная политика SOFiSTiK
- Отсутствие некоторых важных особенностей в справке

Опыт расчета мостов на динамическое воздействие от высокоскоростных поездов на ВСМ Москва-Казань с использованием SOFiSTiK

Докладчик: Уткин А.А.

27 мая 2016 Санкт-Петербург

Расчеты строительных конструкций зданий и мостов, геотехнический анализ