

# Одинарная цепная подвеска для высокоскоростной линии сети Синкансен

Озабоченность общества проблемами глобального потепления и утилизации промышленных отходов вызывает необходимость заботиться о сохранении окружающей среды и уменьшении воздействия на нее железных дорог. В числе мер, принимаемых в этом направлении, — увеличение срока службы контактного провода и повышение эффективности его утилизации. С учетом указанных факторов в результате изучения работы контактной подвески, расчета ее характеристик на основе моделирования и проведения ходовых испытаний была разработана подвеска нового типа. Это одинарная цепная подвеска с контактным проводом, изготовленным из медного сплава с закалкой осаднением (РНС). На заключительной стадии разработки созданная подвеска с целью оценки ее характеристик была смонтирована на участке линии, находящейся в коммерческой эксплуатации.

Одинарная цепная подвеска со сталемедным контактным проводом, характеризующаяся недорогой конструкцией и удовлетворительными показателями при высокой скорости движения, была разработана для применения на перспективных высокоскоростных линиях сети Синкансен. Подвеска этого типа использована на участках линии Хокурику Синкансен от Такасаки до Нагано, линии Тохоку Синкансен от Мориоки до Хатинохе и линии Кюсю Синкансен от Син-Яцусиро до Кагосима-Тюо. Проведенные на участке линии Тохоку Синкансен ходовые испытания показали, что используемая контактная подвеска обладает адекватными характеристиками для скорости движения поездов до 300 км/ч, максимальной на линиях Синкансен. Однако назревшая необходимость повышения скорости движения потребовала разработки контактной подвески, рассчитанной на скорость

движения более 300 км/ч и соответствующей современным экологическим требованиям.

## Описание разработанной подвески

### Конструкция подвески

На рис. 1 представлена схема разработанной одинарной контактной подвески (далее РНС-подвеска). Для изготовления контактного провода использован сплав на основе бескислородной меди с добавками хрома и

циркония, упрочненный по методу осаждения (метод РНС). Несущий трос сечением 150 мм<sup>2</sup> выполнен из медной твердотянутой проволоки. Прочность контактного провода на растяжение сопоставима с аналогичным показателем для сталемедного контактного провода, а проводимость — с проводимостью контактного провода из бронзы. В табл. 1 приведены характеристики основных типов контактного провода.

Показатели скорости распространения колебаний одинарной РНС-подвески улучшены благодаря использованию провода сечением 110 мм<sup>2</sup> с силой натяжения 19,6 кН.

С учетом условий работы токоприемников на перспективных высокоскоростных линиях Синкансен (два поднятых токоприемника, расположенных на расстоянии 50 м друг от друга) и результатов проведенного ранее моделирования, а также результатов ходовых испытаний при движении с высокой скоростью необходимо было снизить уровень вибрации одинарной контактной подвески на втором токоприемнике в диапазоне скорости выше 300 км/ч. Для этого в новой контактной подвеске использованы демпферные струны (по четыре в зоне точек подвеса несущего троса).

### Параметры демпферной струны

На рис. 2 показаны параметры демпферной струны, состоящей из пружины и демпфирующего механизма трения. На линии установлены образцы демпферных струн двух типов — А и В.

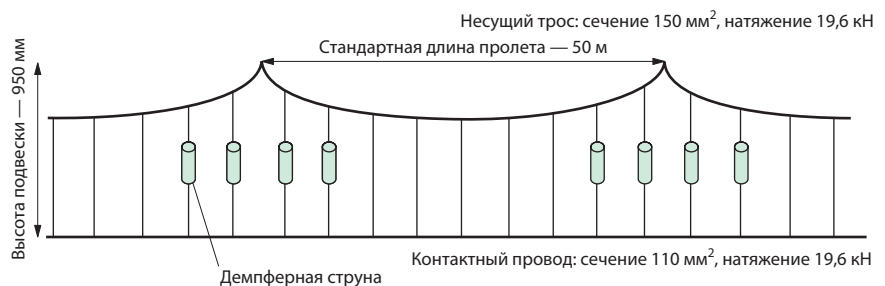


Рис. 1. Схема разработанной одинарной РНС-подвески

Таблица 1

Характеристики контактного провода

Тип провода (сечение 110 мм <sup>2</sup> )	Масса 1 м, кг	Проводимость, %	Прочность на растяжение, кН	Скорость распространения колебаний, км/ч	Предельное значение остаточного диаметра, мм
GT 110	0,988	97,5	38,2	–	–
GT-Sn 110	0,982	70	40,2	–	–
CS 110	0,935	60	65,1	521	8,34
PHC 110 (опытный образец)	0,989	80,6	64	506	8,2

## Условия работы смонтированной одинарной РНС-подвески

### Статическая высота новой подвески

В табл. 2 представлены основные технические данные одинарной РНС-подвески, которая была смонтирована на эксплуатируемой линии. Речь идет об участке линии Тохоку Синкансен, где запланированы эксплуатационные испытания подвески в течение 4 лет. Здесь использованы струны трех типов: традиционные, типа А и В.

Таблица 2

Технические данные опытного участка одинарной РНС-подвески

Показатель	Значение
Длина участка, м	1300
Длина пролета, м	37 – 48
Суммарная высота подвески, мм	1500
Стандартное расстояние между струнами, м	5
Отклонение, мм	100

На рис. 3 показана статическая строительная высота одинарной РНС-подвески. Условия ее работы признаны удовлетворительными. Диапазон вертикальных колебаний контактного провода в любом пролете не выходил за пределы 20 мм.

### Результаты измерений, выполненных с использованием вагона-лаборатории

На рис. 4 представлены результаты измерений параметров новой контактной подвески с использованием вагона-лаборатории. Приведены также параметры обычной контактной подвески, расположенной вблизи участка, оборудованного новой подвеской. По результатам измерений можно оценить динамические показатели

	Тип А	Тип В
Постоянная жесткости пружины	1500 Н/м	
Постоянная демпфирования	50 Н·с/м	
Рабочая длина цилиндра		
	Контактный провод	Контактный провод

Рис. 2. Параметры демпферной струны

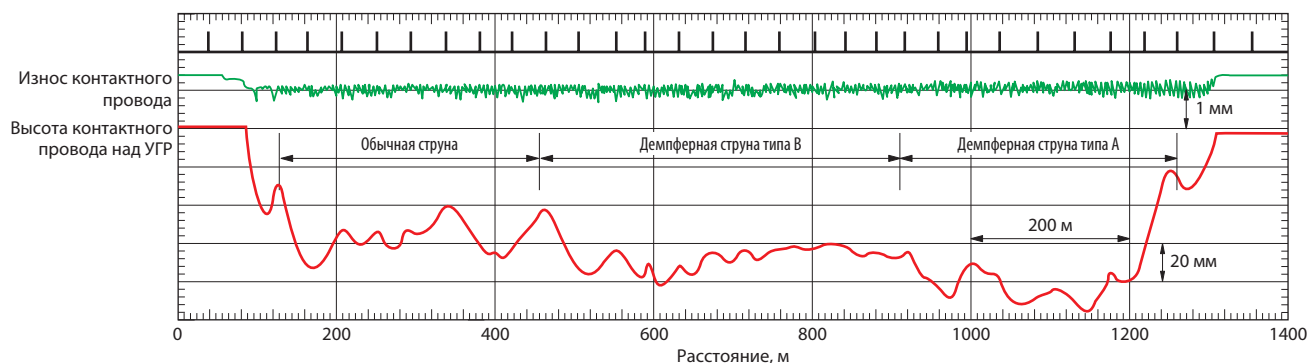


Рис. 3. Статическая высота одинарной РНС-подвески

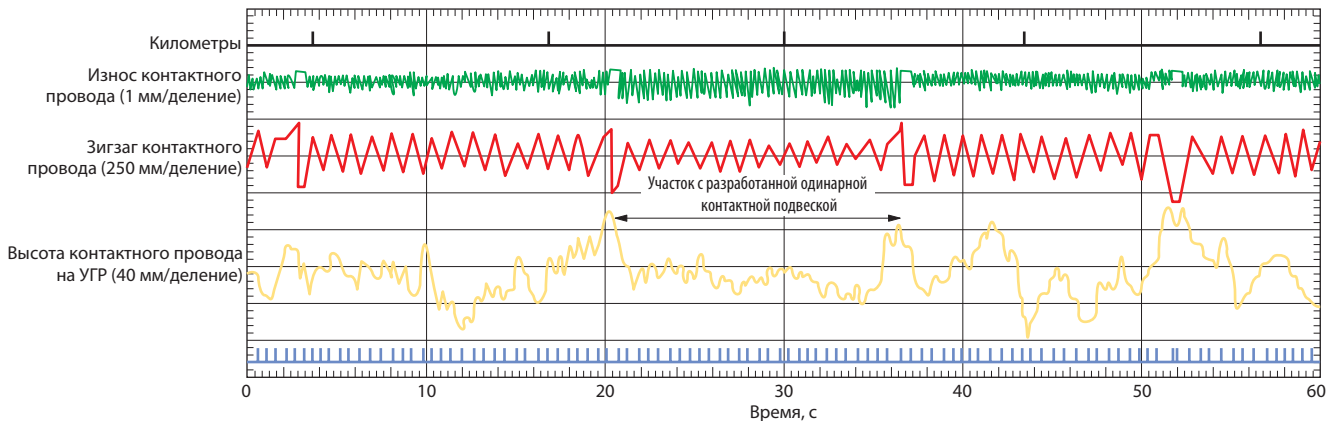


Рис. 4. Вертикальная динамика токоприемника на участке с новой РНС-подвеской и на смежных участках

ли последней. Зигзаг контактного провода новой контактной подвески находится в пределах 150 мм, стандартная величина отклонения высоты токоприемника составила 12,7 мм. Поскольку стандартная величина отклонения для разработанной контактной подвески была меньше, чем для стандартной подвески прилегающих участков, можно сделать вывод, что качество монтажа одинарной РНС-подвески было выше.

### Износ контактного провода новой подвески

Для оценки износа контактного провода в разработанной подвеске была измерена величина его остаточного диаметра после 4 лет эксплуатации. На рис. 5 показаны характеристики износа контактного провода новой подвески и стале-медного провода соседних участков. Из рисунка видно, что интенсивность износа контактного провода одинарной РНС-подвески составила  $0,054 \text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов токоприемника за 4 года эксплуатации, что меньше аналогичного показателя для стале-медного провода. Поскольку на рис. 4 не отмечено локальных всплесков износа контактного провода новой подвески, можно предположить, что показатели износа для него являются удовлетворительными.

### Струна повышенной проводимости

Локальный износ может быть вызван колебаниями статической высоты расположения контактного провода или нагрузкой от металлических элементов арматуры контактной сети, например фиксаторов или электрических соединителей. Результатом локального износа является увеличение частоты замены контактного провода. Снижение интенсивности локального износа может быть достигнуто при помощи регулировки статической высоты контактного провода или путем использования более легких металлических элементов арматуры. Поскольку в одинарной контактной подвеске контактный провод непосредственно присоединен струнами к несущему тросу, вследствие чего электрические соединители имеют большие размеры, чем в двойной или тройной контактной подвеске, его износ имеет тенденцию к увеличению. В связи с этим была разработана струна повышенной проводимости, одновременно выполняющая функции обычной струны и электрического соединителя.

### Характеристики проводящей струны

В каждом пролете новой контактной подвески установлены четыре демпферных струны, осталь-

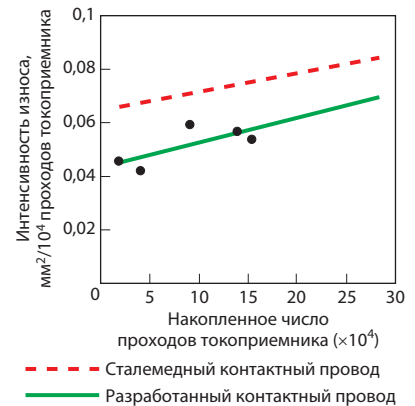


Рис. 5. Интенсивность износа нового и традиционного стале-медных контактных проводов

ные струны — повышенной проводимости (далее — проводящие струны). Основные технические данные проводящей струны соответствуют стандартам обычной струны и электрического соединителя для линий Синкансен. В табл. 3 представлены параметры проводящей струны, а в табл. 4 — ее основные технические характеристики.

Поскольку ток, подведенный к контактному проводу по одному электрическому соединителю, разветвляется по нескольким проводящим струнам, электрические характеристики соединителя для проводящей струны более чем достаточны. В связи с этим допустимое значение тока, протекающего через четыре проводящие струны, приняли равным 500 А (в течение 9 с) исходя из степени их нагрева

Таблица 3

Основные параметры проводящей струны

Параметр	Значение
Максимальная длина пролета, м	60
Стандартная высота подвески, мм	950
Стандартное расстояние между струнами, м	5
Минимальная длина струны, мм	400
Максимальная длина струны, мм	950

Таблица 4

Основные характеристики проводящей струны

Виды испытаний	Характеристики
Вибрационные испытания <sup>1</sup>	Более 2·10 <sup>6</sup> раз
Испытания на растяжение <sup>2</sup>	3000 Н в течение 1 мин
Испытания на крутящий момент <sup>2</sup>	2500 Н·см в течение 1 мин
Испытания на скольжение <sup>2</sup>	1000 Н в течение 1 мин
Испытания на растяжение струны <sup>2</sup>	Отсутствие явно выраженной деформации при воздействии силы, равной 1500 Н, в течение 1 мин
Испытания струны на изгиб <sup>2</sup>	Более 16 раз
Коэффициент устойчивости <sup>2</sup>	До 1,0
Допустимая температура <sup>2</sup>	Не выше допустимого значения температуры контактного провода, несущего троса или питающего провода
Допустимое значение тока	500 А (в течение 9 с); 120 А (длительный)

<sup>1</sup>Амплитуда ± 25 мм, частота 3 – 5 Гц.

<sup>2</sup>В случае установки на контактном проводе после вибрационных испытаний.

и величины тока на токоприемнике соответствующего поезда. Допустимое значение тока, протекающего по каждой из этих струн, приняли равным 120 А исходя из технических данных питающего провода. Этой величины вполне достаточно, чтобы пропускать максимальный

ток, потребляемый вспомогательным оборудованием поезда во время стоянки (30 А).

### Описание опытного образца

На рис. 6 показан опытный образец проводящей струны, имеющей параметры и характеристики, приведенные в табл. 3 и 4. Поскольку верхняя часть струны должна иметь достаточную прочность, чтобы выдерживать вибрации контактной подвески, было решено применить для ее изготовления фосфористую бронзу, используемую также для обычных струн. Однако поскольку фосфористая бронза имеет низкую проводимость, для изготовления нижней части проводящей струны было решено применить хромо-циркониево-медный сплав (MCZ/TL). Этот сплав обладает более высокой проводимостью по сравнению с фосфористой брон-

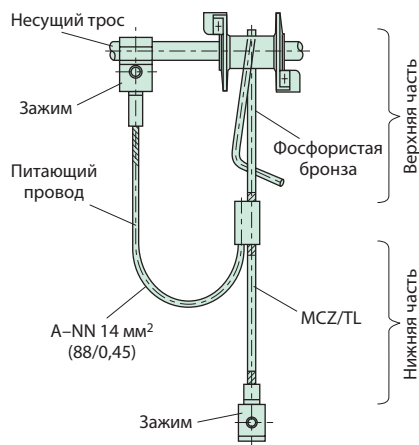


Рис. 6. Опытный образец проводящей струны

зой, но равной с ней прочностью. При изготовлении питающего провода был использован многожильный провод из сплава меди с оловом и индием, что обеспечило достаточную прочность и проводимость. Кроме того, для изготовления зажимов для подсоединения струн к несущему тросу и контактному проводу применен упрочненный осадением медный сплав CRM-B из-за его высокой проводимости и других свойств, требуемых для изготовления металлических деталей арматуры контактной сети.

### Эксплуатационные испытания проводящей струны

С целью оценки характеристик опытный образец проводящей струны установили на одном из участков линии, находящейся в коммерческой эксплуатации. Смонтированные здесь ранее электрические соединители были удалены, а обычные струны заменены на проводящие за исключением демпферных струн, установленных в двух пролетах. Измерения проводили до установки проводящих струн и после нее. Измеряли отжатию контактного провода под фиксатором, относительное удлинение его под фиксатором и у проводящих струн, продольную нагрузку и натяжение стержней верхней части проводящих струн, а также ток, протекающий через электрический соединитель и проводящую струну в целом. В табл. 5 показаны максимальные измеренные значения параметров при проходе по участку со скоростью 210 и 270 км/ч электропоездов, находящихся в повседневной эксплуатации.

Измеренное значение отжатию контактного провода составило менее 100 мм. Это значение находится в допустимых пределах для контактной сети линий Синкансен. Измеренное значение натяжения проводящей струны было больше, чем обычной, но меньше 1500 Н, что является основным показателем прочности

струны на растяжение. Допустимое значение натяжения стержня струны в соответствии с характеристиками материала составляет 2000 Н, поэтому измеренное значение натяжения стержня проводящей струны достаточно мало. Поскольку ток проходит по нескольким проводящим струнам, то в одной такой струне он меньше, чем ток электрического соединителя, его значение составило 123 А. С учетом соответствующих условий движения поезда ток проводящей струны не должен превышать 500 А, даже если на протяжении пролета имеется только одна проводящая струна. Можно заключить, что характеристики проводящей струны являются удовлетворительными для линии, находящейся в коммерческой эксплуатации.

*Износ контактного провода, подвешенного при помощи проводящей струны*

В ходе испытаний была проведена оценка степени уменьшения локального износа контактного провода в результате замены обычных струн с электрическим соединителем одинарной контактной подвески проводящими струнами. При этом измеряли диаметр контактного провода новой подвески перед началом испытаний и остаточный диаметр — через 20 мес. В табл. 6 приведены значения среднего износа контактного провода новой подвески. Отмечено, что износ провода с обычными струнами и электрическим соединителем измеряли в шести точках, а в схеме с проводящими струнами — в десяти.

Износ провода в первом варианте подвески (с электрическим соединителем) составил в среднем 0,15 мм, что в 1,27 раза больше, чем в подвеске с проводящими струнами. В подвеске с обычными струнами без электрического соединителя в пролете износ контактного провода составил 0,1 мм, что меньше, чем в варианте с проводящими струнами. Масса проводящей стру-

ны на 0,49 кг больше массы обычной струны, а эквивалентная масса контактного провода с проводящими струнами на 0,15 кг больше соответствующего показателя подвески с обычными струнами. Поскольку по результатам измерений высота контактного провода в разработанной контактной подвеске была удовлетворительной, можно было сделать вывод, что различие между значениями износа контактного провода в вариантах с проводящими и обычными струнами вызвано разницей их масс. Однако поскольку износ провода в подвеске с проводящими струнами оказался меньше, чем в варианте с электрическим соединителем, был сделан вывод, что локальный износ провода в последнем варианте подвески может быть одной из причин использования проводящих струн.

**Характеристики контактной подвески при испытаниях**

На линии Тохоку Синкансен были проведены ходовые испытания с использованием измерительно-

го вагона высокоскоростного поезда Синкансен. Результаты испытаний подтвердили высокие качества РНС-подвески при скорости движения поездов выше 300 км/ч.

*Результаты измерений, выполненных на стационарном оборудовании контактной сети*

Измерения отжатия контактного провода и натяжения в точках подвеса были проведены на участках с традиционными и демпферными струнами, а также на участке с проводящими струнами (рис. 7). Проводились также измерения хода поршня демпферной струны.

Испытания проводили с токоприемниками двух типов (А и В), применяемыми на высокоскоростных электропоездах. Схема состава поезда представлена на рис. 8. Скорость его движения с двумя поднятыми токоприемниками типа А составляла 275–315 км/ч, с одним токоприемником типа А — 325–355 км/ч и с одним токоприемником типа В — 275–355 км/ч. При испытаниях поезда, двигавшегося в сторону Морио-

Таблица 5

**Сравнение максимальных измеренных значений показателей при применении обычной и проводящей струны**

Показатели	Тип струны	
	Обычная	Проводящая
Отжатие под фиксатором, мм	41	41
Относительное удлинение контактного провода под фиксатором ( $\times 10^{-6}$ )	330	360
Относительное удлинение контактного провода в точке крепления проводящей струны ( $\times 10^{-6}$ )	251	246
Осевая нагрузка стержня проводящей струны, Н	143	190
Относительное удлинение стержня проводящей струны ( $\times 10^{-6}$ )	445	432
Ток электрического соединителя, А	157	–
Ток проводящей струны, А	–	123

Таблица 6

**Среднее значение износа контактного провода разработанной контактной подвески на линии, находящейся в коммерческой эксплуатации (в течение 20 мес)**

Элементы подвески	Средний износ, мм	Отношение
Электрический соединитель (6 точек)	0,15	1,27
Проводящая струна (10 точек)	0,12	1
Обычная струна (110 точек)	0,1	0,87

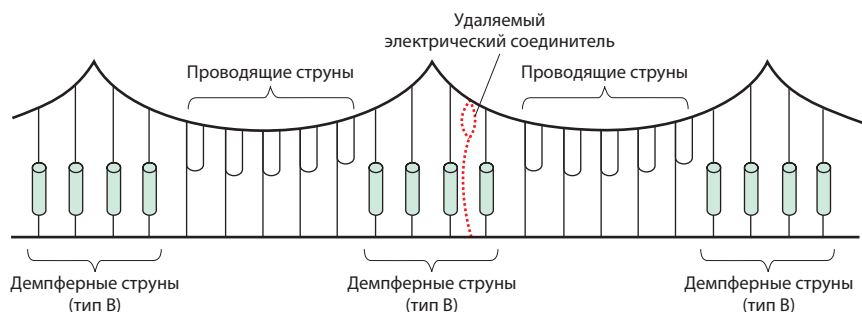


Рис. 7. Установка проводящих струн в одинарной цепной контактной подвеске

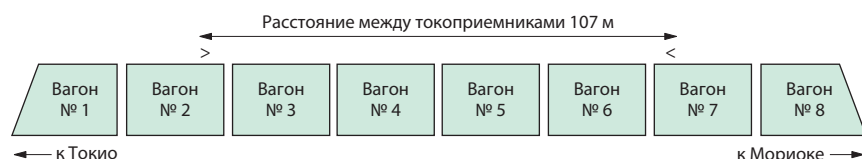


Рис. 8. Схема состава поезда, использованного при испытаниях

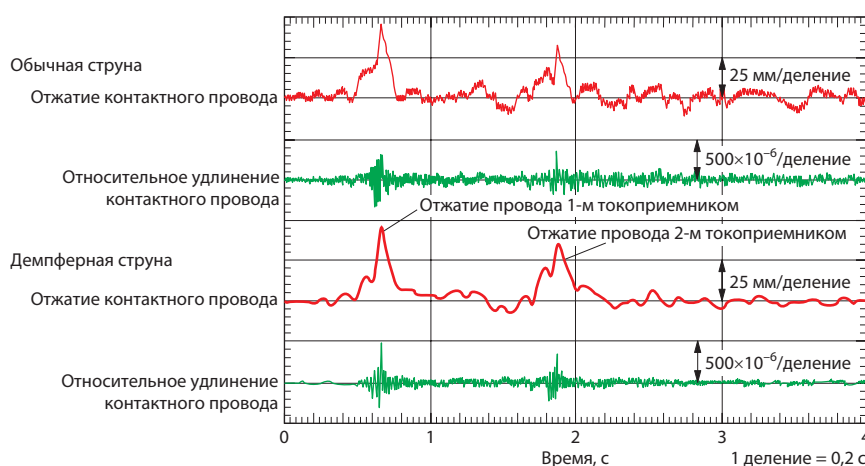


Рис. 9. Осциллограмма, полученная при движении поезда со скоростью 315 км/ч

ки, токоприемник был поднят только над вагоном №2, а в направлении Токио — над вагоном №7. Максимальная скорость на участке, оснащённом новой РНС-подвеской, с учетом состояния пути составила 355 км/ч.

На рис. 9 приведена осциллограмма, снятая при движении испытательного поезда со скоростью 315 км/ч. При сравнении результатов, полученных на участках с демпферными и обычными струнами, видно, что колебания значений отжатия контактного провода, имевшие волнообразный характер, продолжались на участке с обычными струнами, но значительно уменьшались на участке с демпферными струнами.

**Отжатие контактного провода.** На рис. 10 показаны результаты измерения отжатия контактного провода под фиксатором на участке с обычными струнами, а на рис. 11 — на участке с демпферными струнами согласно условиям, перечисленным в табл. 7. Максимальное значение отжатия, измеренного на участке с демпферными струнами, составило 58 мм.

На каждом участке измеренные величины находились в пределах допустимого значения, равного 100 мм, при этом еще имелся существенный запас. Увеличение аэродинамической подъемной силы первого токоприемника в первом

варианте испытаний (движение с двумя поднятыми токоприемниками) также вызвало увеличение отжатия контактного провода.

**Относительное удлинение контактного провода.** На рис. 12 представлены результаты измерений относительного удлинения контактного провода под фиксатором на участке с обычными струнами, на рис. 13 — с демпферными. Максимальное измеренное значение в первом случае составило  $713 \cdot 10^{-6}$ , во втором —  $594 \cdot 10^{-6}$ . Большее значение этой величины на участке с обычными струнами по сравнению с участком с демпферными свидетельствует о том, что применение последних способствует уменьшению относительного удлинения контактного провода. Испытания показали, что даже на участке с демпферными струнами измеренные значения превышают допустимое значение, составляющее  $500 \cdot 10^{-6}$  при скорости более 335 км/ч. Однако поскольку требования к техническим характеристикам контактного провода новой одинарной цепной подвески были пересмотрены и для контактного провода повышенной прочности установлено допустимое значение относительного удлинения, равное  $1000 \cdot 10^{-6}$ , был сделан вывод, что находящиеся в коммерческой эксплуатации поезда на участках с разработанной одинарной РНС-подвеской могут развивать скорость выше 300 км/ч. Более того, отмечено, что даже на участках с обычными струнами, где относительное удлинение контактного провода никогда не превышало своего допустимого значения при скорости до 300 км/ч, эксплуатируемые поезда могут развивать повышенную скорость на участках с РНС-подвеской, оснащенной обычными струнами.

**Динамический ход поршня в демпферной струне.** На рис. 14 представлены результаты измерений хода поршня в демпферной струне. Максимальное измеренное значение составило 45 мм, причем имелся

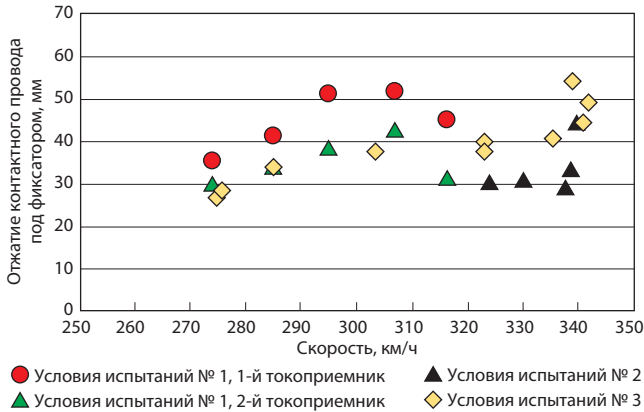


Рис. 10. Отжатие контактного провода под фиксатором на участке с обычными струнами

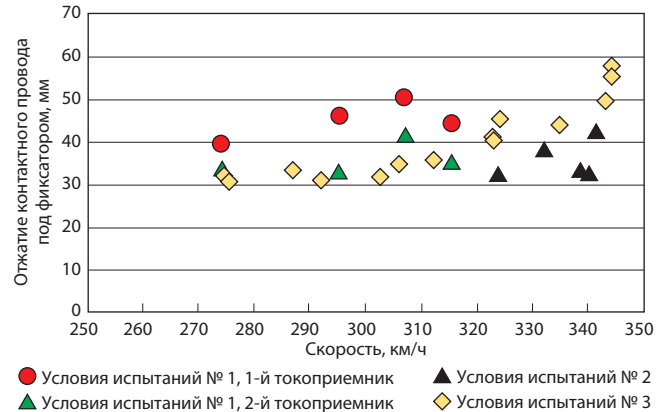


Рис. 11. Отжатие контактного провода под фиксатором на участке с демпферными струнами

Таблица 7

**Характеристики токоприемников при испытаниях новой РНС-подвески**

№ варианта испытаний	Скорость, км/ч	Тип токоприемника	Число поднятых токоприемников
1	275 – 315	А	2
2	325 – 355	А	1
3	275 – 355	В	1

значительный запас рабочей длины цилиндра такой струны типа В (см. рис. 2). Кроме того, поскольку имеется также ее значительный запас для демпферной струны типа А, которая обладает такими же механическими характеристиками, как и демпферная струна типа В, был сделан вывод о том, что эти струны могут использоваться на коммерческих линиях со скоростью движения более 300 км/ч.

*Результаты измерений на движущемся поезде*

Для измерения коэффициента потери контакта на испытательном вагоне установили систему, позволяющую регистрировать отрывы токоприемника при высокоско-

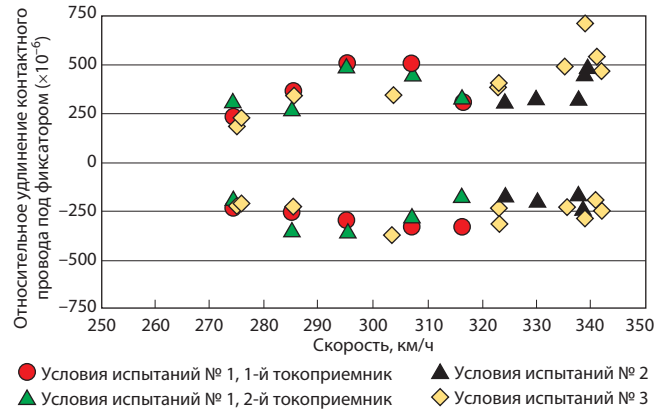


Рис. 12. Относительное удлинение контактного провода под фиксатором на участке с обычными струнами

ростных ходовых испытаниях. На рис. 15 показаны результаты измерений коэффициента потери контакта для токоприемника типа А, на рис. 16 – для токоприемника типа В. Поскольку расчетные значения этого коэффициента были определены на основе результатов измерений для каждого участка контактной сети в пределах

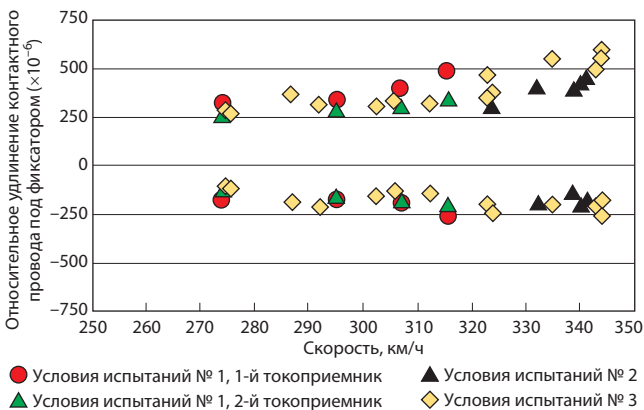


Рис. 13. Относительное удлинение контактного провода под фиксатором на участке с демпферными струнами

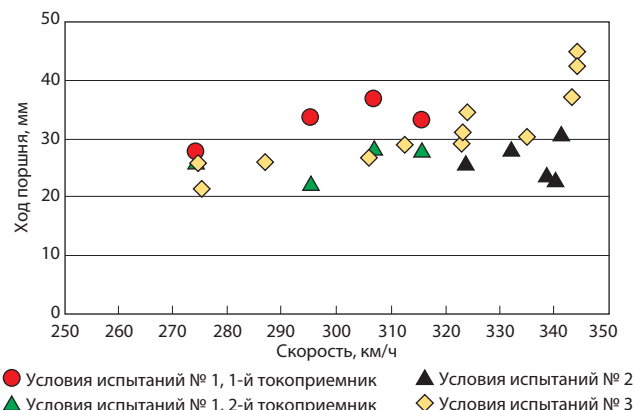


Рис. 14. Ход поршня в цилиндре демпферной струны типа В

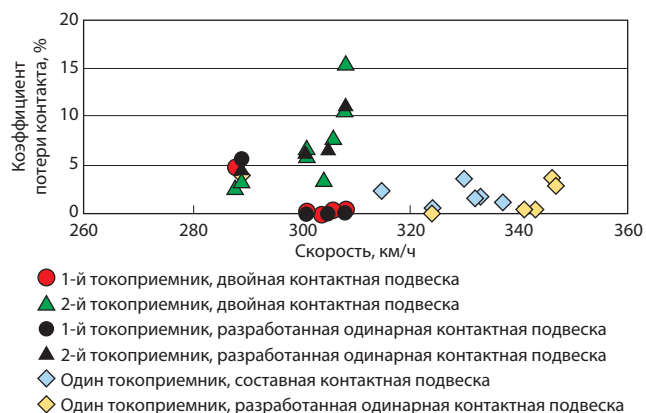


Рис. 15. Коэффициент потери контакта для токоприемника типа А

одной секции, его величину для РНС-подвески определяли на участках как с обычными, так и с демпферными струнами. Для высокоскоростной линии приведены также значения, полученные на участке с двойной контактной подвеской, смежном с участком, имеющим новую РНС-подвеску. На участке с двойной подвеской показатель скорости распространения волны был улучшен за счет использования такого же контактного провода сечением  $110\text{ мм}^2$ , как в РНС-подвеске. В ходе измерений величины токосъема были получены значения коэффициента потери контакта при прохождении поезда с двумя поднятыми токоприемниками. Для поезда с одним поднятым токоприемником такие измерения были проведены в ходе исследования частоты дугообразования.

При испытаниях с двумя токоприемниками типа А максимальное значение коэффициента потери контакта для новой РНС-подвески составило 12%, т. е. было относительно велико. При этом больше отрывов наблюдалось на втором токоприемнике. Большая величина аэродинамической подъемной силы, созданной первым токоприемником, увеличивала вибрацию контактной подвески, а второй токоприемник не мог следовать за такими колебаниями вследствие того, что на нем реализовалась меньшая величина аэродинамической подъемной силы. Максимальное значение коэффициента потери контакта составило всего 3,8% при прохождении поезда с одним поднятым токоприемником типа А, и такие характеристики токосъема были вполне удовлетворительными.

При испытаниях с токоприемником типа В имела место потеря контакта при скорости выше 300 км/ч, однако максимальное значение коэффициента потери контакта составило всего 0,5%, т. е. было меньше, чем при испытаниях с одним токоприемником типа А. Это объясняется тем, что конструкция токоприемника типа В рассчитана на движение со скоростью, превышающей 300 км/ч. Различие между величинами коэффициента потери контакта для новой РНС-подвески и для двойной контактной подвески оказалось незначительным, однако сравнить значения коэффициента потери контакта только по резуль-

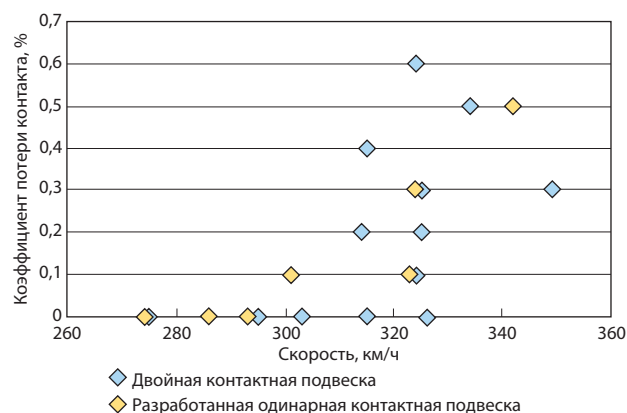


Рис. 16. Коэффициент потери контакта для токоприемника типа В

татам измерения величины отжатия контактного провода было невозможно. Как уже упоминалось, ожидается, что качество токосъема при скорости выше 300 км/ч будет высоким благодаря меньшим колебаниям величины отжатия контактного провода новой РНС-подвески.

## Выводы

Новая одинарная контактная РНС-подвеска, рассчитанная на скорость движения поездов выше 300 км/ч, по результатам опытной эксплуатации показала следующее:

- интенсивность износа контактного провода за 4 года составила  $0,054\text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов токоприемников. Поскольку локальный износ контактного провода не наблюдался, характеристики износа можно считать удовлетворительными;
- результаты испытаний опытного образца проводящей струны показали, что ее механические и электрические характеристики соответствуют принятым на эксплуатируемых железнодорожных линиях;
- относительное удлинение контактного провода на участке с обычными и демпферными струнами превышает допустимую величину, составляющую  $500 \cdot 10^{-6}$ . Поскольку требования к техническим характеристикам контактного провода были пересмотрены и для контактного провода повышенной прочности было принято значение, равное  $1000 \cdot 10^{-6}$ , можно сделать вывод о возможности движения поездов со скоростью, превышающей 300 км/ч, при использовании таких струн;
- измеренные значения отжатия контактного провода под фиксатором и хода поршня в цилиндре демпферной струны находятся в допустимых пределах;
- имели место случаи, когда коэффициент потери контакта при скорости выше 300 км/ч и движении с двумя поднятыми токоприемниками достигал 12%. При движении с одним поднятым токоприемником максимальное значение этого коэффициента составляло всего 3,8%.

S. Harada et al. Quarterly Report of RTRI, 2008, № 2, p. 96–102.