

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «ХОДОВАЯ ЧАСТЬ – ПУТЬ»

Д.А. ФОКЕЕВ
E.mail. ksucta@elcat.kg

Рельсалардын айлануу бетинде пайда болуучу толкун сымал түз эместиктер менен пайдаланылган жылып жүрүүчү түзүмдүн жүрүү бөлүктөрүнүн параметрлери, басып өткөн жол жана жүрүү ылдамдыгынын функционалдуу байланышын аныктоо үчүн «жол жүрүү бөлүктөрү» динамикалык системасынын өздүк жыштыктарын жана вертикалдык термелүү формаларын «Mathcad» чөйрөсүндө эсептөө жүргүзүлдү.

Для определения функциональной связи образующихся волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов с параметрами ходовых частей эксплуатируемого подвижного состава, пути и скоростью движения выполнен расчет собственных частот и форм вертикальных колебаний динамической системы «ходовые части – путь» в среде «Mathcad».

It is executed the calculation of own frequencies and forms of vertical fluctuations of dynamic system «running gears – a way» in "MathCAD environment to define the functional communication formed undulation of driving rails with parameters of running gears by maintained rolling stock, a way and movement speed.

В качестве расчетной принята линейчатая схема системы, учитывающая колебания тележки, колесной пары (неподрессоренных масс), приведенной к колесной паре массы пути с учетом жесткости контакта, которая описывается системой однородных дифференциальных уравнений:

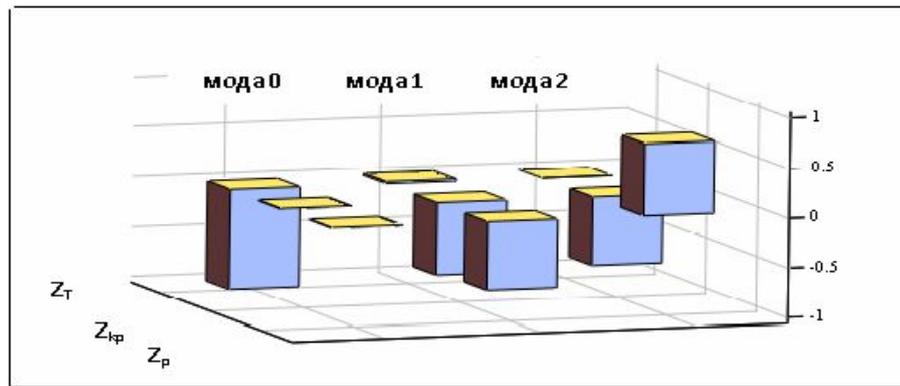
$$\begin{aligned} M_T \ddot{Z}_T + C_b Z_T - C_b Z_{kp} &= 0; \\ M_{kp} \ddot{Z}_{kp} + (C_k + C_b) Z_{kp} - C_b Z_T - C_k Z_p &= 0; \\ (1) \\ m_p \ddot{Z}_p + (C_p + C_k) Z_p - C_k Z_{kp} &= 0. \end{aligned}$$

Собственные формы вертикальных колебаний динамических моделей для моторного и прицепного вагонов электропоезда ЭР2, тепловоза 2М62У, грузового и рефрижераторного вагонов показаны на рис. 1, а соответствующие этим формам собственные (резонансные) частоты – в табл. 1. Анализ результатов модального анализа показывает, что «мода 0» определяет главную форму колебаний с собственной частотой подпрыгивания тележки (Z_T) и не оказывает влияния на вертикальные колебания неподрессоренных масс (Z_{kp}) и массу пути (Z_p). Вектор «мода 1» определяет главную форму колебаний, при которой происходят синфазные колебания неподрессоренных масс и массы пути на вертикальной жесткости подрельсового основания. Вектор «мода 2» определяет главную форму колебаний, при которой возникают противофазные колебания неподрессоренных масс на пути и приведенной массы пути. Следовательно, при исследовании динамических процессов в системе колесо – рельс определяющими являются резонансные частоты по «моде 1» и «моде 2».

Таблица 1

Собственные частоты колебаний динамических моделей, Гц

Мода 0	3,9	5,4	2,9	5,1	5,4
Модал	Электрпоезд ЭР2	Тепловоз	Вагон	Вагон	Вагон
Модал	моторный	прицепный	2М62У	грузовой	рефрижератор



eigenvecs(F)

Рис. 1. Моды колебаний динамических моделей «ходовые части – путь»

Если при движении собственные частоты вертикальных колебаний неподрессоренных масс по модам 1 и 2 совпадают с частотами прохода смежными колесами неровностей из образующейся суперпозиции стоячих волн в упруго деформированном рельсе, то в нем возникают дополнительные резонансные явления с образованием резонирующих стоячих волн. Скорости движения, на которых происходит образование в рельсе резонирующих стоячих волн, являются резонансными. На длине этих резонирующих стоячих волн, сравнительно с другими длинами стоячих волн в рельсе, в зоне контакта увеличиваются динамические силы и напряжения, которые увеличивают пластическую деформацию на поверхности катания рельса. Динамическая система, состоящая из смежных колес тележки и заключенного между ними упруго деформированного рельса, представляет собой колебательную систему с резко выраженными резонансными свойствами /1/.

Резонансные явления в рельсе между смежными колесами тележек при динамическом взаимодействии ходовых частей с верхним строением пути возникают всегда, но они являются лишь необходимым, но не достаточным условием образования и дальнейшего развития волнообразных неровностей при эксплуатации. Достаточным условием для образования волнообразных неровностей рельсов является эксплуатация на участке пути однотипного подвижного состава в узком диапазоне скоростей движения, включающем резонансные скорости движения.

Резонансные скорости движения определялись на основании рассчитанных для мод 1 и 2 собственных частот колебаний динамической модели «ходовые части – путь», известных длин стоячих волн λ_i , которые кратны базам тележек подвижного состава, и эксплуатационного диапазона скоростей движения на данном участке пути. Резонансные скорости движения определялись как:

$$V_{pi} = f_{cn} \cdot \lambda_i, \quad (2)$$

где f_{cn} – собственная частота вертикальных колебаний динамической модели «ходовые части – путь»; $n = 1, 2, \dots$ – номер моды колебаний; λ_i – длина волны неровности, соответствующая i -й моде колебаний рельса.

Амплитудный спектр волнообразных неровностей для одной из рельсовых нитей на участке пути, где эксплуатируются только электропоезда серии ЭР2, представлен на рис. 2, а полигон скоростей движения – на рис. 3. Резонансные скорости движения электропоездов ЭР2, рассчитанные по формуле 2, приведены в табл. 2. Из анализа амплитудного спектра неровностей следует, что неровности с длинами волн 0,65 м и 0,6 м, а также неровности с длинами волн 0,104 м и 0,10 м образовались при многократном проходе по данному участку пути электропоездов с резонансной скоростью 75,5 км/ч (20,9

м/с). При движении с этой скоростью собственные частоты вертикальных колебаний в динамической системе «ходовые части – путь» по первой и второй модам совпадают с частотами прохода смежными колесами неровностей, длины которых из образующейся суперпозиции стоячих волн в упруго деформированном рельсе соответствуют четвертой моде. При этом неровности с длинами волн 0,65 м и 0,104 м образовались при взаимодействии с путем ходовых частей моторных вагонов, а неровности с длинами волн 0,6 м и 0,10 м – ходовых частей прицепных вагонов электропоезда. Подобный анализ для неровностей с длинами волн 0,52 м и 0,48 м, а также неровностей с длинами волн 0,084 м и 0,079 м показывает, что эти неровности образовались при многократном проходе на этом участке пути электропоездов с резонансной скоростью 60,4 км/ч (16,7 м/с).

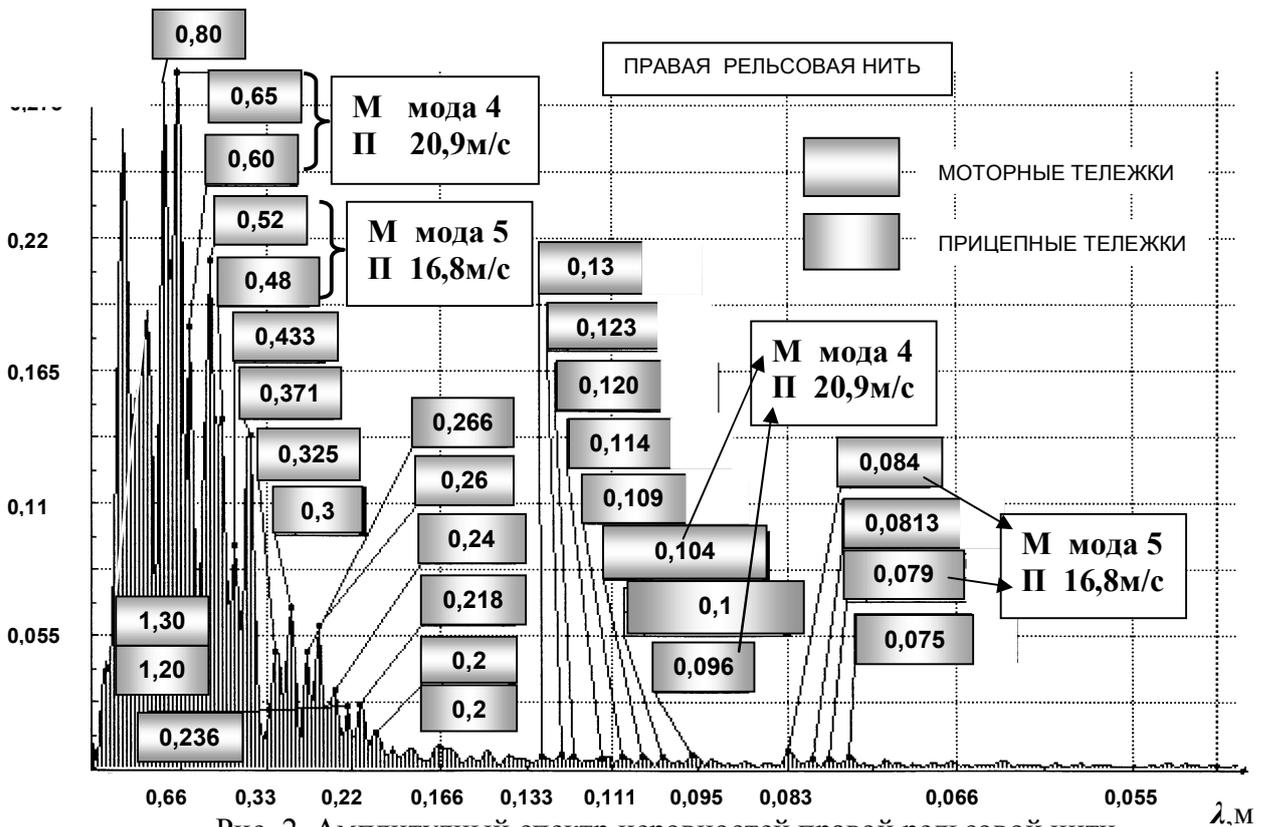


Рис. 2. Амплитудный спектр неровностей правой рельсовой нити

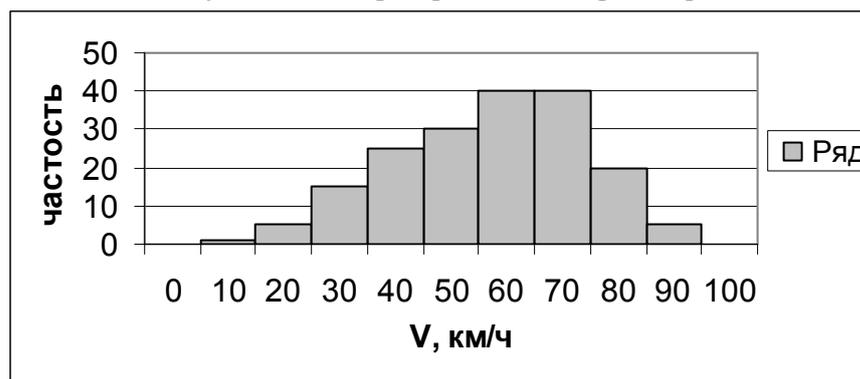


Рис. 3. Полигон скоростей движения электропоездов ЭР2

Анализ представленных данных показывает, что параметры образовавшихся на поверхности катания рельсов волнообразных неровностей связаны с базой тележек подвижного состава, динамическими свойствами системы «ходовые части – путь» и со скоростями движения на участке пути. Это подтверждается также результатами

исследований, полученными на участках пути с грузовым движением на Московской окружной железной дороге.

Таблица 2

Резонансные скорости движения электропоезда ЭР2

Резонансные скорости V_{pi} , км/ч (м/с)	Тележка моторного вагона		Тележка прицепного вагона	
	мода 1 (32,3 Гц)	мода 2 (197,7 Гц)	мода 1 (34,5 Гц)	мода 2 (209,1 Гц)
1	2	3	4	5
$V_{p3} = 100,0$ (27,7)	0,86	0,140	0,8	0,131
$V_{p4} = 75,5$ (20,9)	0,65	0,104	0,60	0,10
$V_{p5} = 60,4$ (16,8)	0,52	0,084	0,48	0,079
$V_{p6} = 50,3$ (13,9)	0,433	0,070	0,4	0,066
$V_{p7} = 43,1$ (12,0)	0,371	0,060	0,342	0,057
$V_{p8} = 37,8$ (10,4)	0,325	0,053	0,300	0,049
$V_{p9} = 33,6$ (9,33)	0,289	0,047	0,268	0,044
$V_{p10} = 30,2$ (8,4)	0,26	0,042	0,24	0,040
$V_{p11} = 27,4$ (7,6)	0,236	0,038	0,218	0,036
$V_{p12} = 25,1$ (6,97)	0,216	0,035	0,2	0,033
$V_{p13} = 23,2$ (6,46)	0,2	0,032	0,184	0,030

Резонансные скорости движения являются главным условием образования волнообразных неровностей рельсов. Однако, наряду с этим, необходимо наличие определенных условий эксплуатации, связывающих между собой способствующие образованию и последующему развитию неровностей факторы подвижного состава и верхнего строения пути.

На основании исследований предложены мероприятия, исключающие или сдерживающие образование волнообразных неровностей. Мероприятием, исключающим образование волнообразных неровностей, является эксплуатация подвижного состава в интервалах оптимальных скоростей движения, то есть в интервалах, где отсутствуют резонансные скорости. Так, для электропоездов серии ЭР2 с конструкционной скоростью 130 км/ч интервалами оптимальных скоростей движения при эксплуатации со скоростями более 50 км/ч являются следующие: 51...59 км/ч; 61...74 км/ч; 76...99 км/ч и свыше 100 км/ч. При движении со скоростями 50...30 км/ч интервалы сужаются, а при скоростях менее 30 км/ч практически отсутствуют.

Поэтому для сложившихся условий эксплуатации и невозможности выдерживать на участках пути скорости движения в оптимальных интервалах необходимо проводить мероприятия, сдерживающие образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов. К ним относятся профильное шлифование новых рельсов в пути рельсошлифовальными поездами для устранения поверхностного обезуглероженного слоя и технологических неровностей, а также профилактическое шлифование рельсов по устранению уже образовавшегося волнообразного износа; термическое упрочнение рельсов; регулярная обточка колесных пар для ликвидации дефектов на их поверхности качения. Эти мероприятия снижают уровень динамического взаимодействия ходовых частей и пути, контактные напряжения, интенсивность образования неровностей, препятствуют ослаблению промежуточных рельсовых скреплений. Сдерживающие мероприятия, касающиеся конструктивных изменений ходовых частей, тягового привода на эксплуатируемом электроподвижном составе, не представляются возможными.

С вводом в эксплуатацию высокоскоростного электропоезда «Сапсан» (Velaro RUS) производства компании Siemens AG на линии Москва – Санкт-Петербург мероприятия, исключающие или сдерживающие образование волнообразных неровностей

на поверхности катания рельсов, приобретают особую актуальность. В частности, основным мероприятием является определение интервалов оптимальных скоростей движения, исключая резонансные скорости движения и, как следствие, – условия для образования волнообразных неровностей при динамическом взаимодействии подвижного состава и пути. С этой целью для тележек моторных и прицепных вагонов электропоезда «Сапсан» определены резонансные скорости движения (табл. 3) для летних условий эксплуатации /1/.

Таблица 3

Резонансные скорости движения электропоезда «Сапсан» для летних условий эксплуатации ($C_p = 20 \cdot 10^4$ кН/м)

Номер моды колебаний рельса	Моторный вагон			Прицепной вагон		
	резонансная скорость, км/ч (м/с)	мода 1 35,5 Гц	мода 2 219 Гц	резонансная Скорость, км/ч (м/с)	мода 1 37,4 Гц	мода 2 230,8 Гц
1	330 (91,78)	2,6	0,419	350 (97,24)	2,6	0,421
2	165 (45,9)	1,3	0,209	175 (48,6)	1,3	0,210
3	110 (30,6)	0,86	0,139	115 (32,16)	0,86	0,139
4	82,6 (22,9)	0,65	0,104	87,5 (24,3)	0,65	0,105
5	66,0 (18,3)	0,52	0,083	69,8 (19,4)	0,52	0,084

На 85 % протяженности магистрали Москва – Санкт-Петербург электропоезда будут следовать с максимальной скоростью 200 км/ч и, следовательно, попадать в интервал оптимальных скоростей движения (свыше 176 км/ч), в котором не создаются условия для образования волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов.

При эксплуатации в зимний период возрастает вертикальная жесткость подрельсового основания, что увеличивает значения собственных частот колебаний неподрессоренных масс моторных и прицепных вагонов электропоезда и, как следствие, изменяет резонансные скорости движения. Графики зависимости резонансных скоростей движения электропоезда «Сапсан» при изменении вертикальной жёсткости пути приведены на рис. 4.

Таким образом, эксплуатация подвижного состава в интервалах оптимальных скоростей движения позволит применять в меньших объемах шлифовку рельсов в пути, расходы на которую составляют 15...20 % всех затрат на его текущее содержание.

При разработке нового высокоскоростного электроподвижного состава возможна корректировка интервалов оптимальных скоростей изменением отдельных параметров ходовых частей, в частности, базы тележки. Кроме того, сдерживающими мероприятиями являются уменьшение осевых нагрузок и неподрессоренных масс ходовых частей, переход на опорно-рамный тяговый привод.

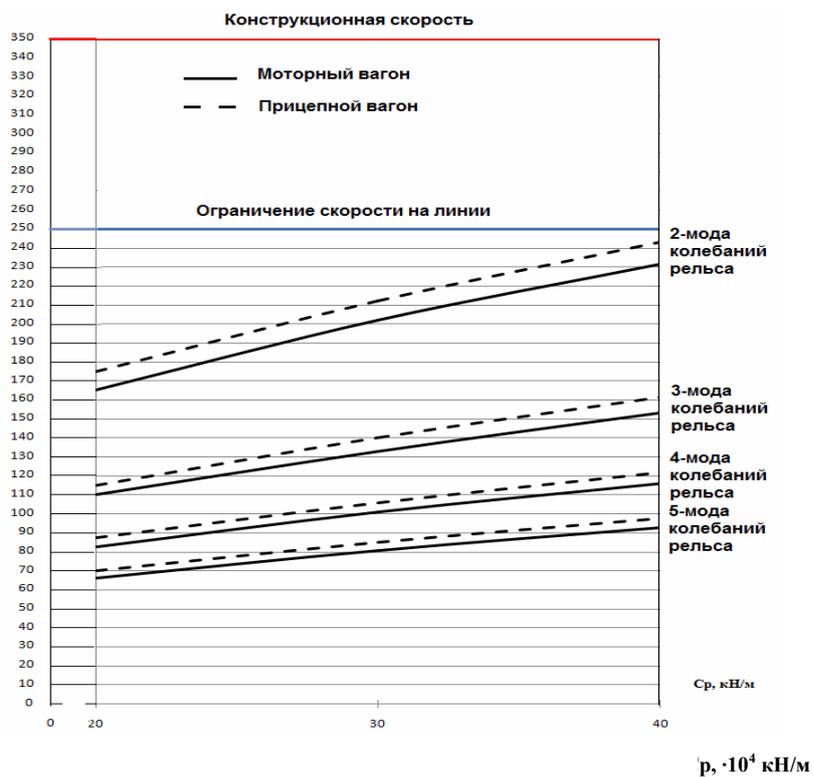


Рис. 4. Графики зависимости резонансных скоростей движения электропоезда «Сапсан» при изменении вертикальной жесткости пути

Список литературы

1. Козырев А.И., Алижан А. Динамические процессы в системе колесо-рельс тележечных экипажей // Труды международной научно-практической конференции ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки «ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ XXI ВЕКА», вып. 5. – Хабаровск: ДВГУПС, 2008. – С.145-147.