

УДК 624.82./85(075.8)

В. В. Кондратов

ООО «Мостовые сооружения и путь»

Г. И. Богданов

Петербургский государственный университет путей сообщения

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ РАЗВОДНЫХ МОСТОВ РАСКРЫВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ

Рассматриваются особенности динамической работы разводных пролетных строений раскрывающейся системы в наведенном положении. Отмечается существенное отличие динамической работы разводных пролетных строений и балочных пролетных строений неразводных мостов, что связано с различием в статической схеме – наличием у разводных пролетных строений противовеса значительной массы. Приводятся результаты экспериментальных исследований и расчетно-теоретических оценок динамических характеристик пролетных строений.

разводной мост, раскрывающаяся система, крыло, противовес, частота колебаний, период колебаний, динамический коэффициент.

Введение

В практике проектирования разводных мостов находят применение однокрылые раскрывающиеся системы без подклинки противовеса. В этом случае при наличии противовеса большой массы, по своей величине примерно в два раза превосходящей массу крыла разводного пролетного строения, основная частота собственных колебаний такой конструкции оказывается существенно ниже основной частоты собственных колебаний обычно применяемых балочных пролетных строений. При определенных режимах эксплуатации мостовых сооружений значительное снижение основной частоты собственных колебаний разводного пролетного строения может отрицательно повлиять на его напряженное состояние. Рассмотрим этот случай на примере эксплуатируемого однокрылого пролетного строения под железнодорожную нагрузку расчетным пролетом 45,2 м, имеющего противовес массой около 500 т.

1 Особенности силового воздействия на пролётные строения от поездов, состоящих из однотипных вагонов

Применяемые в железнодорожных мостах типовые однопутные пролетные строения расчетной длиной 45,0 м в незагруженном состоянии имеют основной период собственных вертикальных колебаний от 0,2 с (решетчатые пролетные строения с ездой понизу на деревянных поперечинах) до 0,3 с (сплошностенчатые сталежелезобетонные с ездой поверху на балласте). Рассматриваемое разводное пролетное строение в наведенном состоянии, как показали результаты испытаний, имеет основной период собственных колебаний в незагруженном состоянии 0,37 с. Такое увеличение основного периода собственных колебаний разводного пролетного строения обуславливает и его динамическую реакцию на силовое воздействие поезда. Особенность силового воздействия поезда на мостовые конструкции связана с так называемым эф-

фектом скорости, или кинематическим возбуждением [1]. Суть указанного режима взаимодействия моста и поезда состоит в передаче на пролетные строения экипажами поездов через колесные пары переменного силового воздействия. Особо ярко выраженное периодическое силовое воздействие на мосты оказывают поезда, сформированные из однотипных вагонов. В этом случае период воздействия поезда $T = l/v$ (l – длина вагона по осям автосцепки, v – скорость движения поезда).

Диаграммы переменных силовых квазистатических воздействий на балочное пролетное строение длиной 45,0 м от поездов, составленных из некоторых однотипных обращающихся и перспективных вагонов и транспортеров (табл. 1), показаны на рисунках 1 и 2. Переменность воздействия веса поезда на пролетное строение имеет место не только в переходном режиме входа поезда на мост, но сохраняется и при полном загрузении поездом пролетного строения.

Для количественной оценки величину переменного силового воздействия поезда $Q(t)$ на мостовую конструкцию можно представить в виде ряда:

$$Q(t) = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{д}} \sin(\varphi_{\text{вк}} t), \quad (1)$$

где $Q_{\text{ст}}$ – средняя величина переменного силового воздействия поезда на пролетное строение (рис. 1); $Q_{\text{д}}$ – амплитуда обобщенной переменной силы при воздействии поезда на пролетное строение (рис. 2); $\varphi_{\text{вк}} = 2\pi k v/l$; k – номер гармоники; t – время.

Учитывая характер изменения прогибов пролетного строения при проходе по мосту нагрузок с условными номерами 1, 2, 3, 5 (см. табл. 1 и рис. 1), переменная составляющая воздействия их на конструкцию приближенно аппроксимировалась одной гармоникой. Связь между деформациями пролетного строения $f(t)$ и соответствующим переменным силовым воздействием $Q(t)$ описывается зависимостью:

ТАБЛИЦА 1. Основные характеристики поездажной нагрузки

№ п/п	Наименование, тип и грузоподъемность вагона	Нагрузки		Схема
		осевая, тс	погонная, тс/м	
1	8-осный полувагон габарита Т (перспективный)	25	12,5	
2	Крытый вагон с ручным тормозом для цемента, 62 т	21	6,87	
3	Полувагон с люками в полу и торцовыми дверями с тормозной площадкой грузоподъемностью 125 т (модель 12-541)	21,38	8,45	
4	Специализированный хоппер 8 А для зерна	21,75	5,91	
5	Транспортер 6-осный, 80 т	21,78	7,59	

$$Q(t) = Cf(t), \quad (2)$$

где C – приведенная жесткость конструкции.

Если период силового воздействия поезда T совпадает с основным периодом собственных вертикальных колебаний загруженного

поездом пролетного строения $T_{пр}$, то возникает состояние резонанса. Резонансная, или критическая, скорость движения поезда при этом $V_{кр} = l/T$.

При эксплуатации современных железнодорожных мостов с обычно применяемыми

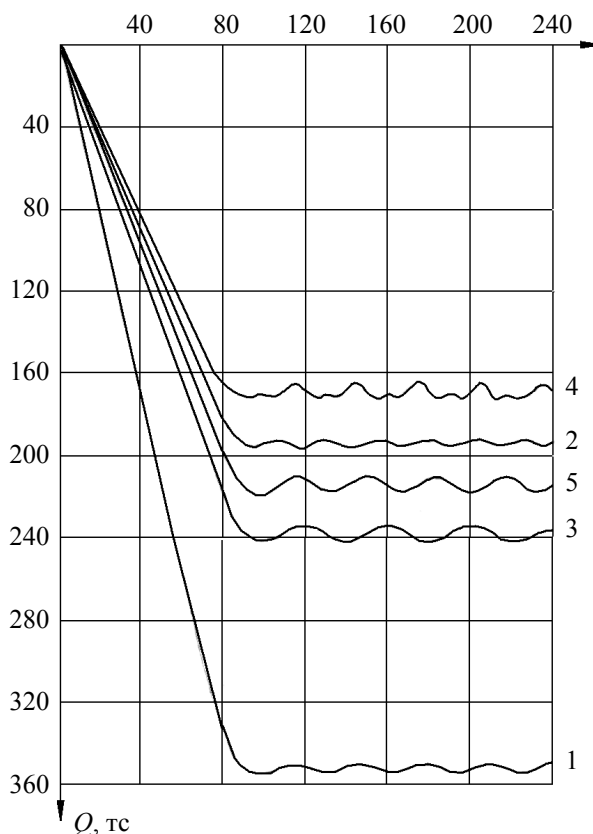


Рис. 1. Характер изменения силового воздействия на пролетное строение в зависимости от типа нагрузки (1–5 – условные номера нагрузок)

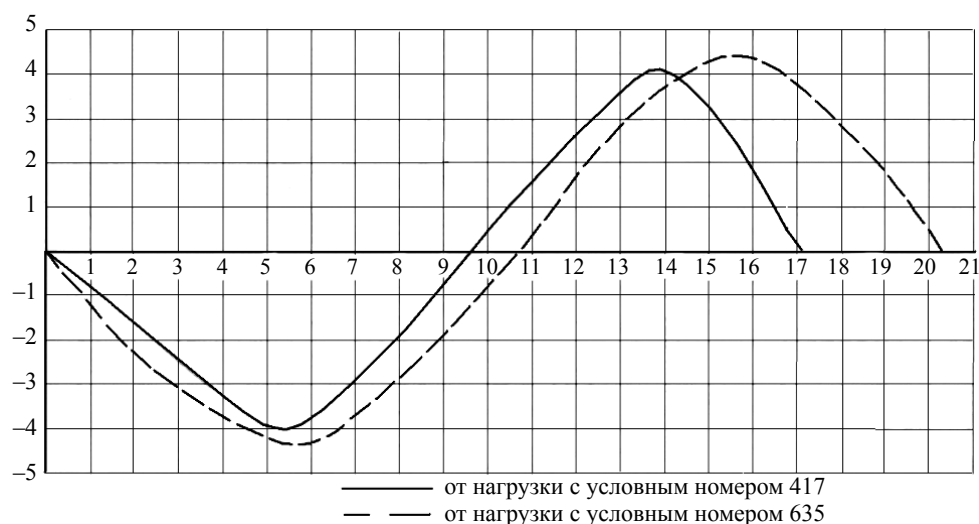


Рис. 2. Графики периодического изменения обобщенной переменной силы Q_d

системами пролетных строений указанный выше эффект скорости не приводит к опасным колебаниям мостовых конструкций, так как пролетные строения длиной до 50 м, для которых неравномерность силового воздействия поезда может быть ощутимой, имеют относительно малые величины периодов собственных колебаний $T_{пр}$. Вследствие этого критические скорости $V_{кр}$ для этих конструкций достаточно высоки и значительно превышают эксплуатационные скорости движения поездов. При длине пролетных строений более 70 м практическая возможность резонанса сочетается с очень малой неравномерностью силового воздействия поезда. Существенное увеличение периодов собственных вертикальных колебаний железнодорожных пролетных строений длиной до 50 м приводит к практической возможности реализации резонансных явлений. Величины $V_{кр}$ попадают в область реализуемых в современных условиях или предусмотренных в перспективе скоростей движения поездов.

2 Определение динамических характеристик системы мост–поезд

Динамические характеристики системы мост–поезд, критические скорости движения поезда и величины динамического коэффициента при воздействии экипажей поезда на разводное пролетное строение в зависимости от типа нагрузки были определены следующим образом. В основу проведенных исследований были положены вычисленные частоты и формы собственных колебаний указанной системы, схема которой приведена на рисунке 3.

Исходная система мост–поезд заменена эквивалентной системой с конечным числом

степеней свободы. С этой целью консольная часть и конструкция разводного пролетного строения между опорными узлами разбивалась на участки, характеризующиеся постоянной жесткостью и равномерным распределением массы. Массы, моделирующие инерционные свойства пролетного строения, сосредоточивались на границах участков. При этом неподдресоренные массы экипажей поезда суммировались с массой разводного пролетного строения на участке между опорными узлами. Кузова экипажей поезда моделировались системой поддресоренных масс, приведенных к узлам сосредоточения масс пролетного строения.

Первые три формы и соответствующие им периоды собственных колебаний пролетного строения, нагруженного нагрузкой № 3, приведены на рисунке 4. Полученные частоты и формы собственных колебаний системы использованы для исследования её вынужденных колебаний в случае резонанса на основе более простой модели с одной степенью свободы (рис. 5). Параметры жесткости и инерции модели с одной степенью свободы определялись на основе вариационного принципа Рэлея, заключающегося в том, что форма колебаний, соответствующая основной собственной частоте ω , сообщает дроби Рэлея минимальное значение:

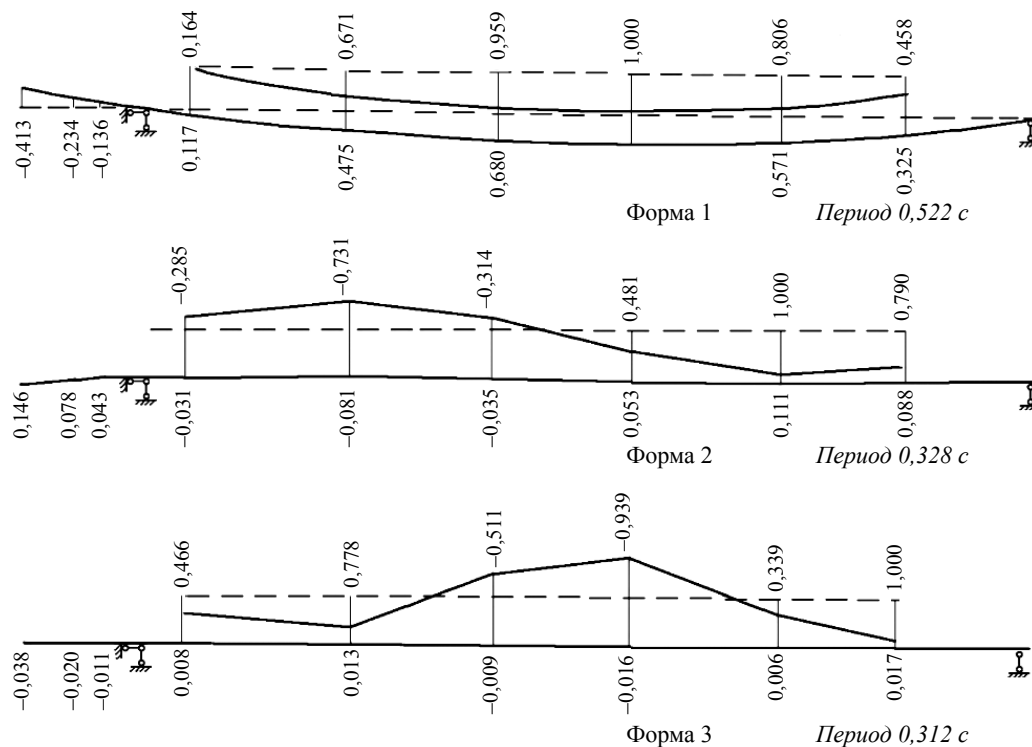
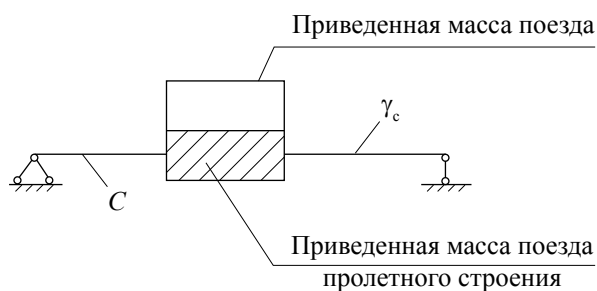
$$\omega^2 = \min \left(\frac{v^T K v}{v^T A v} \right), \quad (3)$$

где K и A – соответственно матрицы жесткости и инерции системы; v – вектор собственной формы колебаний системы, соответствующий её основной частоте.

Числитель формулы (3) с точностью до 1/2 равен максимальному во времени значению потенциальной энергии системы при



Рис. 3. Динамическая модель системы мост–поезд

Рис. 4. Формы колебаний системы *мост–поезд*Рис. 5. Расчетная схема системы *мост–поезд* с одной степенью свободы

свободных колебаниях по соответствующей форме. Потенциальная энергия деформации системы U складывается из потенциальной энергии деформации пролетного строения U_6 и потенциальной энергии деформации рессорных комплектов подвижного состава U_B :

$$U = U_6 + U_B; \quad (4)$$

$$U_6 = 0,5qR^T Yq = 0,5qC_6q; \quad (5)$$

$$U_B = 0,5q(Z - Y_y)^T K_B(Z - Y_y)q = 0,5qC_Bq, \quad (6)$$

где q – обобщенная координата системы; $C_6 = R^T Y$ – обобщенная жесткость пролетного строения, соответствующая первой форме собственных колебаний системы; Y – вектор перемещений узлов пролетного строения по первой собственной форме колебаний; R – вектор, элементы которого r_j эквивалентны реакциям связей, наложенных на каждый j -й узел при перемещении его по первой собственной форме колебаний; C_B – обобщенная жесткость рессорного подвешивания подвижного состава, соответствующая первой собственной форме колебаний системы *мост–поезд*; K_B – матрица жесткости упругих элементов, моделирующих рессорное подвешивание подвижного состава; Y_y – усеченный вектор перемещений узлов пролетного строения по первой форме собственных колебаний системы (элементами вектора являются перемещения точек пролетного строения, расположенных между его опорными узлами); $(Z - Y_y)$ – вектор абсолютных деформаций упругих элементов, моделирующих рессорное подвешивание подвижного состава.

Для определения приведенного коэффициента диссипации системы с одной степенью

свободы использовались данные о затухании свободных колебаний балочных стальных пролетных строений и об эквивалентном сопротивлении колебаниям кузовов вагонов. На основе гипотезы внутреннего демпфирования коэффициент диссипации системы B_c принят пропорциональным её жесткости C :

$$B_c = B_6 + B_B = \gamma_6 C_6 + \gamma_B C_B = \gamma_c C, \quad (7)$$

где B_6 и B_B – соответственно коэффициенты диссипации пролетного строения и подвижного состава; γ_6 и γ_B – соответственно коэффициенты неупругого сопротивления пролетного строения и подвижного состава; γ_c – приведенный коэффициент неупругого сопротивления всей системы.

Величина коэффициента неупругого сопротивления мостовой конструкции γ_6 была принята равной 0,02 в соответствии с экспериментальными данными [2], накопленными при испытаниях металлических мостов (рис. 6).

Для оценки величины коэффициента неупругого сопротивления колебаниям подвижного состава γ_B использовалось известное соотношение, приводящее силы сухого трения в клиновых (фрикционных) гасителях колебаний грузовых вагонов к эквивалентному вязкому трению с параметром

$$\beta = \frac{4F}{\pi\theta\Delta}, \quad (8)$$

где F – сила трения во фрикционных носителях; θ – частота колебаний кузова экипажа; Δ – амплитуда колебаний кузова экипажа.

Величина коэффициента трения ψ в клиновых гасителях принималась равной 0,05. При этом коэффициент неупругого сопротивления для подвижного состава

$$\gamma_B = \frac{4g\psi}{\pi\theta^2\Delta}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения.

Величина коэффициента неупругого сопротивления колебаниям подвижного состава была принята равной 0,2 и 0,7, что соответствует амплитудам колебаний экипажей подвижного состава 1,50 см и 0,43 см.

Такой подход к оценке коэффициента диссипации грузовых вагонов определяется следующими обстоятельствами. Решение задачи динамического взаимодействия моста и экипажей грузового поезда в точной постановке достаточно сложно, поскольку это приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям, о чем свидетельствует гиперболическая зависимость между демпфирующими свойствами рессорных комплектов экипажей и их перемещениями. При этом также остаются неизвестными начальные условия при входе каждого экипажа на рассматриваемое разводное пролетное строение, что и обусловило необходимость задаваться определенными амплитудами колебаний нагрузки при проходе её по пролетному строению.

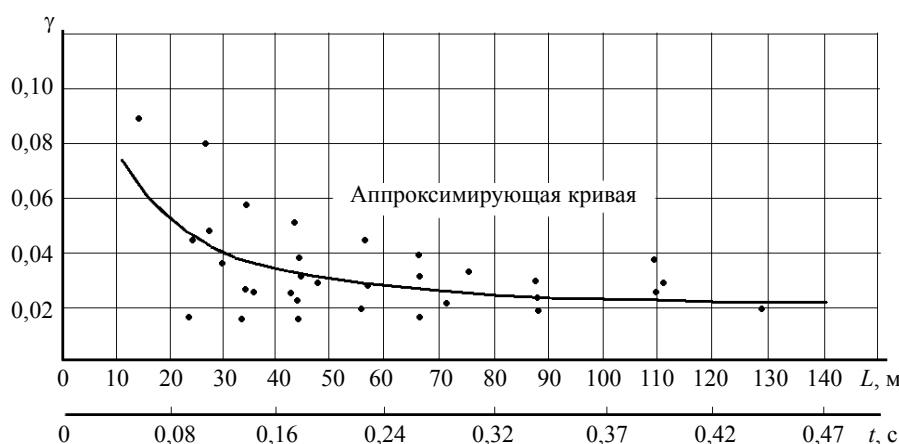


Рис. 6. Зависимость коэффициента неупругого сопротивления γ_c от величины пролета l (периода колебаний T)

Обобщенные параметры жесткости и инерции системы, а также её динамические характеристики, вычисленные по формулам (4)–(8) в зависимости от типа нагрузки, приведены в таблице 2. На основе полученных характеристик системы определены критические скорости подвижного состава для рассматриваемого пролетного строения и соответствующие значения динамического коэффициента к поездной нагрузке.

3 Расчётная оценка динамического воздействия на пролётное строение от поездов, состоящих из однотипных вагонов

Известно, что амплитуда колебаний одно-массовой системы определяется из выражения [3]:

$$A = \frac{Q_d k^2}{C \sqrt{(k^2 - p^2)^2 + \gamma_c^2 k^2 p^2}}, \quad (10)$$

где Q_d – амплитуда переменной обобщенной силы; k и p – соответственно круговые

частоты собственных колебаний системы и переменного силового воздействия; C и γ_c – соответственно жесткость и коэффициент неупругого сопротивления одномассовой системы.

Вследствие значительного увеличения массы разводного пролетного строения основной период его собственных вертикальных колебаний в нагруженном состоянии, как показывают расчеты, может достигать величины $T = 0,584$ с (см. табл. 2), а резонансные колебания разводного пролетного строения при движении по мосту поездов, составленных из рассмотренных типов вагонов, – происходит при скоростях 86–127 км/ч (табл. 3).

Динамический коэффициент к воздействию определенной поездной нагрузки на разводное пролетное строение в случае резонанса при $k = p$ определялся по формуле:

$$1 + \mu = \frac{A + A_{ст}}{A_{ст}} = 1 + \frac{Q_d}{Q_{ст} \gamma_c}, \quad (11)$$

где $A_{ст}$ – прогиб пролетного строения при статическом воздействии поездной нагрузки.

ТАБЛИЦА 2. Динамические характеристики системы *мост–поезд*

Условный номер нагрузки	Приведенная масса, т	Приведенная жесткость, кН/м	Период колебаний, с	Частота колебаний, Гц	Характеристики демпфирования системы в зависимости от величины рассеяния энергии в подвижном составе					
					при $\gamma_b = 0,2$			при $\gamma_b = 0,7$		
					B_b	B_c	γ_c	B_b	B_c	γ_c
1	227,8	26 360	0,584	1,71	472	952	0,036	1650	2130	0,081
2	167,0	25 300	0,51	1,96	260	240	0,029	910	1390	0,055
3	184,1	25 600	0,572	1,75	320	800	0,031	1120	1600	0,062
5	174,9	25 430	0,521	1,92	286	766	0,030	1000	1480	0,058

ТАБЛИЦА 3. Значения динамического коэффициента пролетного строения и критические (резонансные) скорости движения поездов

Условный номер нагрузки	$Q_d / Q_{ст}$	μ	γ_{c1}	$1 + \mu$ при γ_{c1}	γ_{c2}	$1 + \mu$ при γ_{c2}	$V_{кр}$, км/ч
1	0,0065	0,0065	0,036	1,18	0,081	1,08	99
2	0,00632	0,00632	0,029	1,22	0,055	1,11	86
3	0,0184	0,0184	0,031	1,59	0,062	1,29	127
5	0,0176	0,0176	0,030	1,59	0,058	1,30	118

Критические (резонансные) скорости движения поездов и соответствующие значения динамического коэффициента к поездным нагрузкам приведены на рисунке 7. Для построения амплитудно-частотной характеристики системы рассмотрен случай движения поезда со скоростью, составляющей 90% от резонансной при различных значениях коэффициента неупругого сопротивления системы.

$$\frac{\mu_{p=k}}{\mu_{p=0,9k}} = \frac{0,0361 + 0,81\gamma_c^2}{\gamma_c}. \quad (12)$$

Как видно, они свидетельствуют о значительном снижении величин динамического коэффициента в случае движения поездов по пролетному строению со скоростями, отличными от критических.

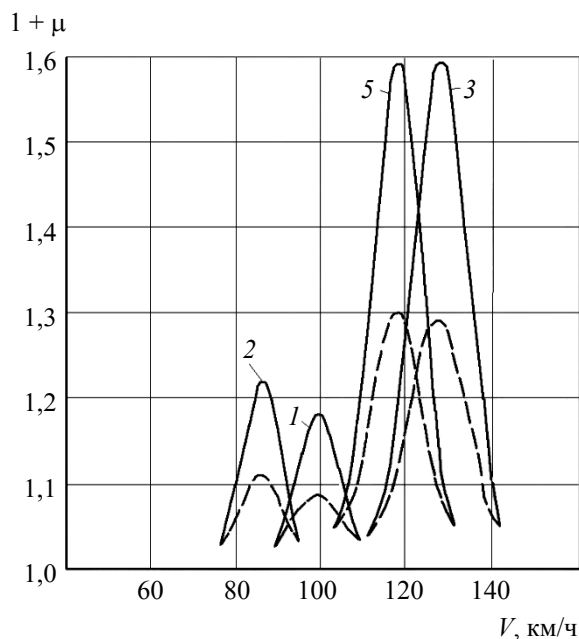


Рис. 7. Графики изменения динамического коэффициента пролетного строения в зависимости от типа нагрузки

Результаты расчетов, выполненных на основе зависимости (11) по формуле (12), приведены на рисунке 8.

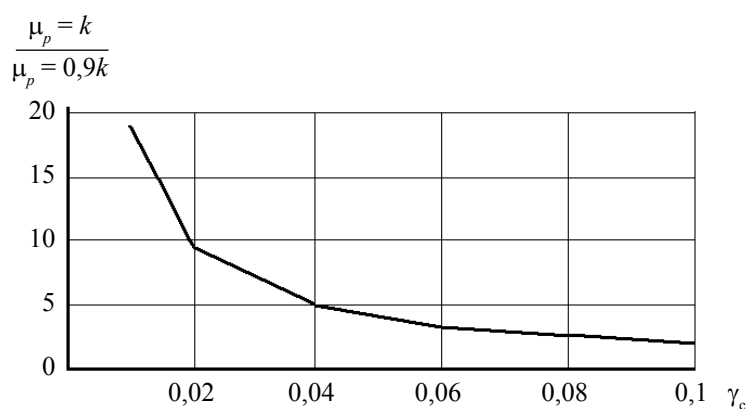


Рис. 8. Зависимость относительного уменьшения динамической добавки μ от снижения резонансной скорости движения нагрузки на 10%

Заключение

Полученные результаты подтверждают сложный характер работы пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы в наведенном положении под действием временной нагрузки. Основной причиной является наличие неподключенного противовеса большой массы, достигающей 150–200 процентов от массы крыла, прикрепленного к его хвостовой части, работающей по консольной схеме. В определенных условиях возможно совпадение частот и возникновение резонансных колебаний при проходе по разводному пролетному строению временной нагрузки.

Библиографический список

1. Особенности динамического воздействия на мосты поездов, сформированных из одноплатных вагонов / Ю.Г. Козьмин, В.В. Кондратов // Вопросы статической и динамической работы, оценки грузоподъемности и эксплуата-

ционной надежности мостов : межвуз. сб. научн. трудов. – Днепропетровск : Транспорт, 1988. – С. 167–173.

2. **Учет** взаимодействия сооружения с грунтом при расчете металлических пролетных строений мостов на вертикальные сейсмические воздей-

ствия / А. М. Уздин, В. В. Кондратов // Сейсмостойкое строительство : научно-техн. реф. сб. – Сер. 14, вып. 4. – М. : ЦИНИС, 1982. – С. 18–23.

3. **Вибрации** в технике : справочник. Т. 1. Колебания линейных систем. – М. : Машиностроение, 1978. – 352 с.

УДК 656.254.16:656.21

Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов

Московский государственный университет путей сообщения

А. Б. Чегуров

ЗАО «Нейроком»

М. Е. Бакин

Московский государственный университет путей сообщения

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОНТРОЛЬНОГО РЕЖИМА РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ С УЧЁТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Для рабочей полосы путевого приёмника получено выражение, по которому производится расчёт тока гармоники, приводящей к замыканию контактов исполнительного реле. Приведены блок-схемы алгоритмов определения критических характеристик контрольного режима и расчёта допустимого уровня гармоники тягового тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

тяговый электропривод, рабочая полоса частот, путевого приёмника, сигнал, путевого генератора, гармоника тягового тока, коэффициент влияния, обрыв рельсовой нити, сбоя, полином, контактный провод.

Введение

Эксплуатируемые на российских железных дорогах рельсовые цепи разработаны в то время, когда на электроподвижном составе применялся тяговый привод с коллекторным двигателем постоянного тока [1]. При этом все гармоники тягового тока были кратны 50 Гц. Рабочие полосы частот путевых приёмников защищены от воздействия гармоник тягового тока с помощью фильтров. Поэтому критерии обеспечения нормального, шунто-

вого и контрольного режимов работы рельсовых цепей разработаны при условии, что на входе путевых приёмников в рабочей полосе частот действует только полезный сигнал.

В настоящее время прослеживается тенденция применения на тяговом подвижном составе асинхронного двигателя при электроснабжении как на постоянном токе, так и на переменном [2]. Поскольку регулирование тяги осуществляется путем изменения частоты тока, потребляемого асинхронным двигателем, гармоники тока электровоза воз-