

Частина III. ГІРНИЧА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 622.625-28-83-592.112

А. Н. Коптовец, канд. техн. наук, А.А. Бобылев, канд. физ.-мат. наук, В.В. Яворская, В.Д. Киринос, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Введение. Отсутствие методик для динамических расчетов тормозных систем с контактным возбуждением фрикционных колебаний, разработка их на эмпирической основе сдерживает развитие, увеличивает сроки проектирования и внедрения подвижного состава высокого технического уровня. Это явилось результатом того, что при разработке конструкции не использованы действующие закономерности фрикционного взаимодействия в тормозе. Принята динамическая модель с жесткими звеньями, зависимость силы (коэффициента) трения от скорости движения.

Математический анализ при проектировании подвижного состава позволяет установить рабочие процессы тормоза и ускоряет выбор оптимальных вариантов из множества возможных. По спецификации в проектной документации шахтный локомотив состоит из 800 деталей, из которых конструктивные параметры упругих и диссипативных свойств могут быть обосновано выбраны лишь при динамическом расчете ориентировочно 300 деталей.

Цель работы – разработка вычислительных алгоритмов моделирования динамических процессов нагружения тормоза как трибологической системы с контактным возбуждением фрикционных колебаний для исследования рабочих процессов, проектирования тормозного оборудования, управления, в том числе адаптивного силой трения по величине и в функции скорости скольжения.

Результаты исследований. Для верификации разработанной методики моделирования процессов колебаний в тормозных механизмах проведена серия вычислительных экспериментов по решению ряда модельных задач.

При выполнении расчетов принимались следующие значения параметров математической модели:
масса колодки – (2...7) кг;
скорость основания – (0...5) м/с;
коэффициент трения – (0,20...0,75);
амплитуда шероховатости колодки – (0,50...150,00) мкм;
амплитуда шероховатости колеса – (0,20...15,00) мкм;
шаг шероховатости колодки – (0,40...5,00) мкм;
шаг шероховатости колеса – (0,10...0,95) мкм;
сдвиг фаз шероховатостей – (0...25)°;
коэффициент жесткости шероховатостей (коэффициент контактной жесткости) – $(7...16) \cdot 10^9$ кН/м³;
длина площадки контакта – (0,1...0,5) м;
ширина площади контакта – (0,06...0,15) м;
жесткость конструктивной связи-1 – $(3...25) \cdot 10^7$ Н/м;
коэффициент вязкости конструктивной связи-1 – (1...100) кН·с/м;
угол наклона конструктивной связи-1 – $(180 \pm 10)^\circ$;
жесткость конструктивной связи-2 – $(0,01...10) \cdot 10^7$ Н/м;
коэффициент вязкости конструктивной связи-2 – (1...100) кН·с/м;
угол наклона конструктивной связи-2 – $(90 \pm 20)^\circ$;
начальное усилие сжатия конструктивной связи-2 – (4...12) кН.

Характерным вариантом решений модульных задач являются результаты, которые представлены на рис. 1 – 14.

На рис. 1 приведены зависимости во времени компонент перемещений колодки тормозного механизма. Кривая 1 соответствует тангенциальным перемещениям, а кривая 2 – нормальным перемещениям. Здесь и далее по оси абсцисс отложен номер точки на временной оси. Произведение номера точки на шаг по времени определяет текущее время.

На рис. 2 приведены зависимости во времени компонент скорости колодки тормозного механизма. Кривая 1 соответствует скорости в тангенциальном направлении, а кривая 2 – скорости в направлении, нормальном к поверхности контакта.

На рис. 3 приведены зависимости во времени компонент ускорений колодки тормозного механизма. Кривая 1 соответствует ускорению в тангенциальном направлении, а кривая 2 – ускорению в направлении, нормальном к поверхности контакта.

На рис. 4 изображена фазовая диаграмма для тангенциальных перемещений, а на рис. 5 – фазовая диаграмма для нормальных перемещений.

На рис. 6 приведены зависимости во времени кинетической энергии колодки тормозного механизма, на рис. 7 – зависимости во времени потенциальной энергии упругой деформации двухсторонних связей, а на рис. 8 – зависимости во времени мощностей диссипативных сил в двухсторонних связях (1, 2 – номер связи).

На рис. 9 изображены зависимости во времени кинетической, потенциальной и полной энергии колебаний колодки тормозного механизма, на рис. 10 – зависимости во времени сил контактного взаимодействия, возникающих в тормозном механизме.

На рис. 11 рассмотрены графики автокорреляционных функций для компонент перемещений колодки тормозного механизма. По оси ординат отложены нормированные значения автокорреляционной функции, а по оси абсцисс – сдвиг по времени.

На рис. 12 рассмотрены спектры компонент перемещений колодки тормозного механизма, на рис. 13 – спектры компонент скорости колодки, а на рис. 14 – спектры компонент ускорений колодки. По оси абсцисс отложены номера гармоник колебаний, по оси ординат – амплитуды гармоник перемещений, скоростей и ускорений колодки соответственно.

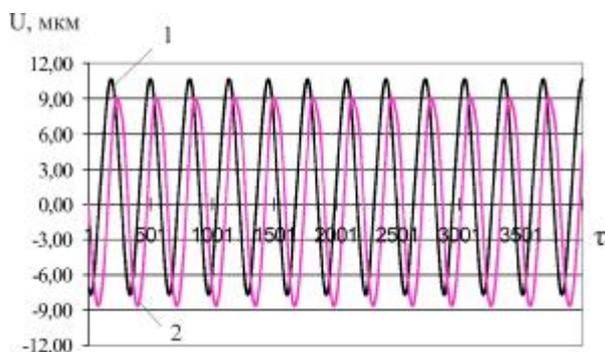


Рис. 1. Диаграммы перемещения колодки тормозного механизма

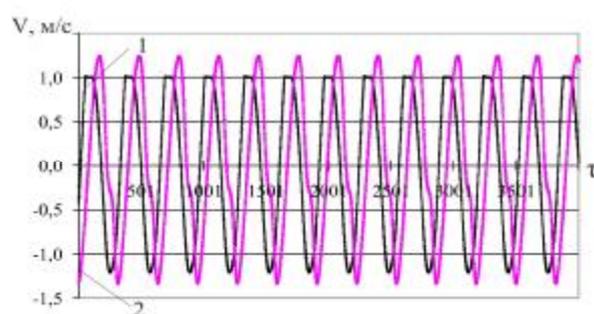


Рис. 2. Компоненты скорости перемещений колодки

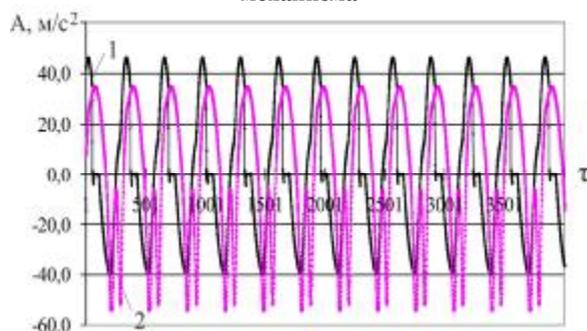


Рис. 3. Компоненты ускорения колодки тормозного механизма

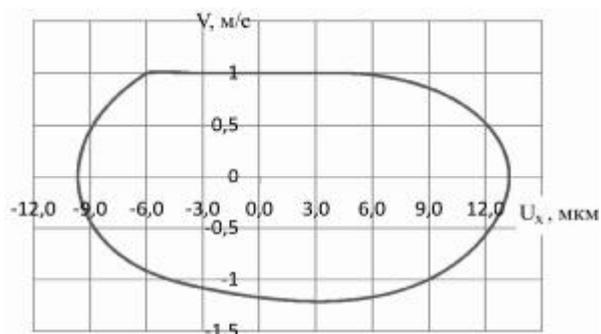


Рис. 4. Фазовая диаграмма тангенциальных перемещений и скоростей колодки

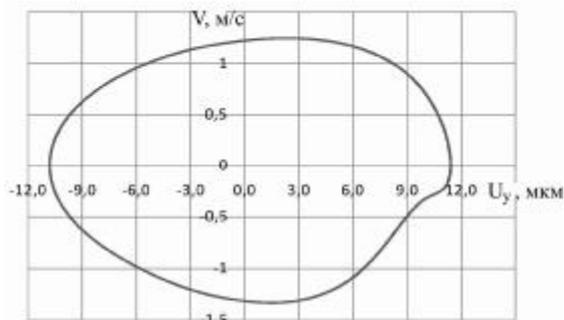


Рис. 5. Фазовая диаграмма нормальных перемещений и скоростей колодки

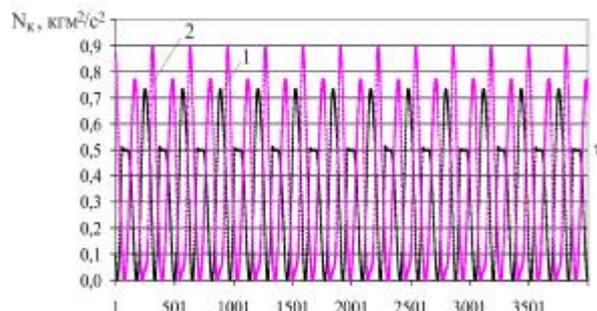


Рис. 6. Диаграмма кинетической энергии колодки тормозного механизма

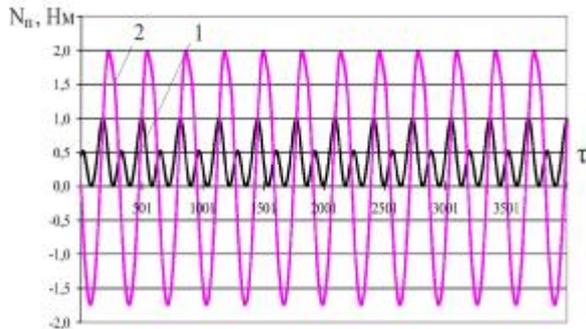


Рис. 7. Диаграмма потенциальной энергии двухсторонних связей

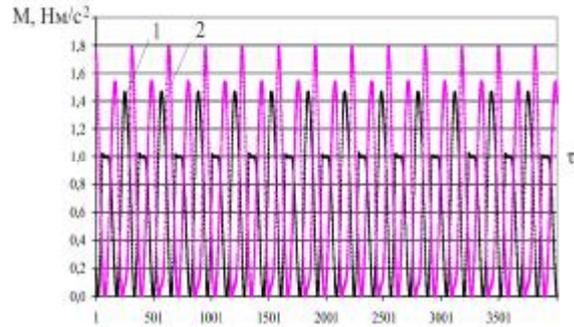


Рис. 8. Диаграмма мощности диссипативных сил двухсторонних связей

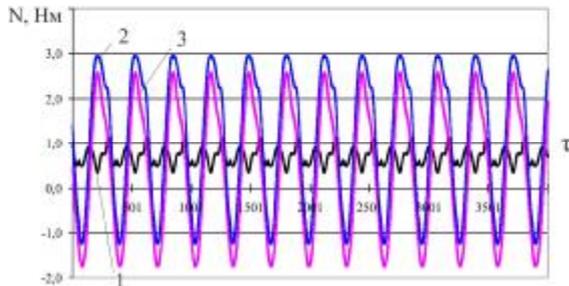


Рис. 9. Энергия колебаний колодки тормозного механизма

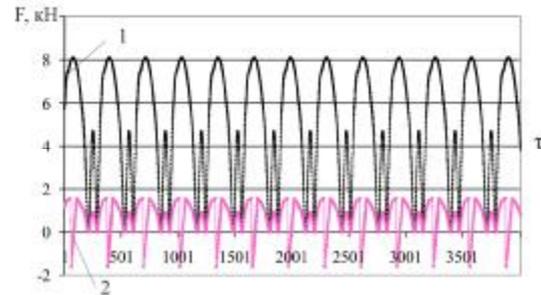


Рис. 10. Силы контактного взаимодействия

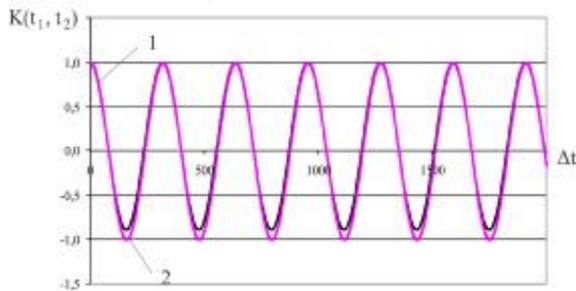


Рис. 11. Автокорреляционные функции перемещений колодки тормозного механизма

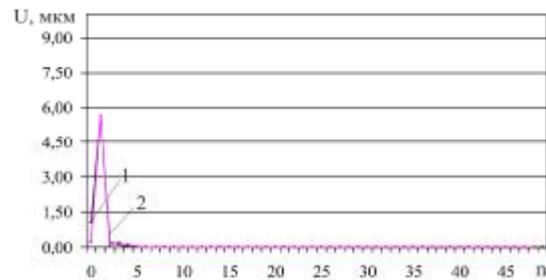


Рис. 12. Спектр перемещений колодки тормозного механизма

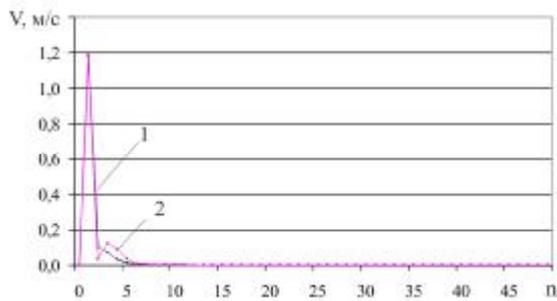


Рис. 13. Спектр скоростей перемещения колодки тормозного механизма

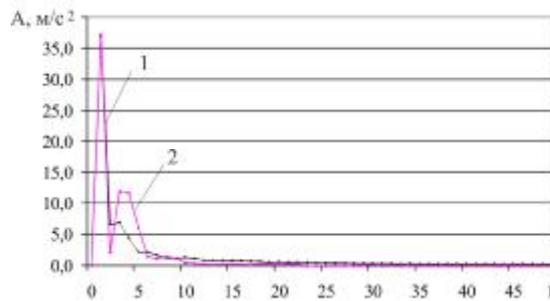


Рис. 14. Спектр ускорений колодки тормозного механизма

Выводы. Анализ полученных результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать вывод, что для заданного набора параметров тормозного механизма реализуется установившийся режим релаксационных колебаний колодки. При этом скорость колебательных перемещений колодки в тангенциальном направлении (рис. 2) равна скорости поступательного движения колеса 1 м/с (рис. 4), ускорение колодки равно 0 (рис. 3). Колодка «прилипает» к поверхности катания колеса, сила трения тормоза равна 0 (рис. 10). В результате действующее значение коэффициента трения за период торможения снижается. Для того, чтобы исключить источник релаксационных автоколебаний в рабочем процессе тормоза необходимо уменьшить скорость перемещения колодки демпфированием колебаний в тангенциальном направлении за счет повышения коэффициентов демпфирования диссипативных сил или введения дополнительных диссипативных элементов в виде демпфирующих опор подвески тормозной колодки. Сила

трения тормозной колодки также обладает демпфирующими свойствами, при этом она является источником энергии фрикционных колебаний, что исключает возможность гашения колебаний ее увеличением.

Источником колебаний в нормальном направлении является дискретность контактных поверхностей колодки и колеса. Для снижения амплитуды колебаний тормозного нажатия колодки необходимо уменьшить жесткость упругих элементов привода и передачи тормозного нажатия. Тормозная колодка в виде сосредоточенной массы как гаситель колебаний повышает демпфирующее действие сил внутреннего трения в материалах деталей тормоза, конструктивного демпфирования и сопротивления рабочей среды привода тормоза.

Таким образом, при нагружении тормоза наблюдается кинематическое возбуждение колебаний в нормальном направлении тормозного механизма. За счет конструктивных связей колебания передаются в тангенциальном направлении. В этом направлении формируются также и фрикционные колебания в соответствии с амонтовым трением в рабочем процессе тормоза. В результате взаимодействия нормальных и тангенциальных колебаний возбуждаются фрикционные автоколебания. Наличие двух конструктивных связей тормозной колодки приводит к координатной взаимосвязи нормальных и тангенциальных колебаний. В зависимости от соотношения коэффициентов жесткости и демпфирования упругих и диссипативных сил связей, их углов наклона, статистических и динамических значений коэффициента трения возможно возникновение установившихся фрикционных автоколебаний. Уменьшение деформации контактной поверхности колодки приводит к соответствующему уменьшению фактической площадки контакта. Чем больше скорость движения, тем больше амплитуда колебаний. Увеличение амплитуды колебаний вследствие их асимметричности приводит к повышению среднего уровня колодки над колесом и уменьшению фактической площадки контакта, в результате этого сила трения уменьшается при увеличении скорости скольжения. Это один из факторов, объясняющих падающую кинетическую характеристику трения.

Рекомендовано до друку: проф. Блохіним С.С.