

УДК 629 - 413 - 592.112

Журавлев Д.Ю., к.т.н.

Ивано-Франковский национальный технический университет
нефти и газа

ВОЗБУЖДАЮЩИЕ ФАКТОРЫ В РОБАСТНЫХ ТРИБОСИСТЕМАХ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ (ЧАСТЬ 1)

***Аннотация.** В материалах статьи отражены возбуждающие факторы в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов, к которым отнесены: микровыступы фрикционного взаимодействия; состояния поверхностных и подповерхностных слоев полимерных накладок, закономерности изменения динамических коэффициентов трения, колебания основных деталей фрикционного узла тормоза. Приведена оценка возбуждающих факторов и установлено их влияние на энергетический баланс трибосопряжения. В дальнейшем будет выполнена оптимизация как конструктивных, так и эксплуатационных параметров фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза.*

***Анотація.** У матеріалах статті відображені збуджуючі фактори у робастних трибосистемах стрічково-колодкових гальм, до яких віднесено: мікроставупи фрикційної взаємодії; стани поверхневих і підповерхневих шарів полімерних накладок, закономірності зміни динамічних коефіцієнтів тертя, коливання основних деталей фрикційного вузла гальма. Наведено оцінку збуджуючих факторів і встановлено їх вплив на енергетичний баланс трибосопряжень. Надалі буде виконана оптимізація як конструктивних, так і експлуатаційних параметрів фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма.*

***Annotation.** In den Materialien des Artikels sind die anregenden Faktoren in robusteren System der Bandbackenebremsen widergespiegelt, auf die zugewiesen sind: der Mikrovorsprünge die Reibwechselwirkungen; die Zustände oberflächliche und unterirdische Schichten der polymeren Laschen, der Gesetzmäßigkeit der Veränderung von dynamischen Koeffizienten der Reibung, der Schwingung von den Hauptdetails des Reibungsknotens der Bremse. Die Einschätzung der anregenden Faktoren gebracht zugewiesen ist und ihr Einfluss auf das energetische Gleichgewicht der Kupplung bestimmt ist. Es wird im Folgenden die Optimierung wie konstruktiv, als auch der Betriebsparameter der Reibungsknoten der Bandbackenebremsen erfüllt sein.*

Постановка проблемы. Робастный подход к расчету и проектированию узлов ленточно-колодочных тормозов подъемно-

транспортных машин является новым направлением, поскольку включает в себя состояния их поверхностных и подповерхностных слоев, связанных с качеством фрикционных поверхностей, устойчивостью и стабилизацией эксплуатационных параметров. Кроме того, при этом осуществляется регулирование и управление эксплуатационными параметрами при электротермомеханическом трении во фрикционных узлах тормоза. В конечном итоге, выполняется оптимизация как конструктивных, так и эксплуатационных параметров фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза. Основой для проведения последней является структурно-параметрический синтез фрикционного узла тормоза, который в значительной мере зависит от возбуждающих факторов, действующих в его парах.

Анализ последних исследований. Разрозненные данные о влиянии возбуждающих факторов (колебаний микровыступов, а также в целом фрикционного узла; поверхностных и объемных температур и вызывающих градиентов в металлических фрикционных элементах, трехфазное состояние поверхностных слоев накладок, колебание динамического коэффициента трения и тормозного момента, а также других эксплуатационных параметров фрикционных узлов) требует их систематизации с соблюдением взаимной связи между собой.

Нерешенные части общей проблемы. Общей проблемой является оценка качества переходных процессов во фрикционных узлах, устойчивости, стабилизации, регулирования и управления их эксплуатационными параметрами и в конечном итоге оптимизация конструктивных и эксплуатационных параметров пар трения тормоза. Однако на перечисленные процессы, явления и эффекты в значительной степени влияют возбуждающие факторы, которые свойственны не только фрикционным узлам, но и их парам трения, а также поверхностным и подповерхностным слоям принимающим активное участие при электротермомеханическом трении в трибосопряжениях.

Основной материал. Алгоритм синтеза фрикционного узла формируют в соответствии с техническими условиями на пару трения тормоза, в которых должны учитываться для материалов пары составляющие их поверхностных и подповерхностных слоев, рассматриваемые на нано-, микро- и миллиуровнях. При этом необходимо обратить внимание на: работу выхода электронов и их дебаевскую длину пробега, уровни Ферми, тип контакта (омический, нейтральный и блокирующий) и его электро- и теплопроводность, а также условия снижения трибозффекта. Производят следующим образом предварительный выбор пары трения, включающий:

- по справочным данным, пользуясь критерием НВ (твердость по Бринеллю) и δ_p (линейное удлинение при разрыве), подбирают

наиболее износостойкий материал контртела (сопротивление изнашиванию пропорционально этому критерию);

- на основании сопоставления кривых фрикционной теплостойкости в виде зависимостей динамического коэффициента трения f и интенсивности изнашивания I от максимальной температуры поверхности трения ϑ_{\max} (ниже и выше допустимой температуры для материалов фрикционной накладки) $f=f(W_T, N, \vartheta_{\max})$ и $I=I(W_T, N, \vartheta_{\max})$ (где W_T - работа трения; N - нормальное прижимное усилие; p - удельные нагрузки) определяют пару трения, отвечающую техническим условиям;

- выбирают конструкцию фрикционного узла (одно- или многопарный) и вид нагружения (апериодический, циклический или длительный), обеспечивающий импульсный или длительный подвод теплоты к фрикционным поверхностям, коэффициент взаимного перекрытия $k_{вз}$ и конструктивные размеры пары трения, а также продолжительность их косвенного охлаждения;

- в тех случаях, когда готовые конструкции фрикционной пары не удовлетворяет техническим условиям или разрабатывается новая конструкция, производят при отборе ряда опытных материалов как модельные так и промышленные испытания пар трения ленточно-колодочного тормоза.

На рис. 1 *а, б, в* проиллюстрировано контактно-импульсное взаимодействие микровыступов на различной стадии торможения парой трения "полимер - металл" при ее нагружении нормальной силой N .

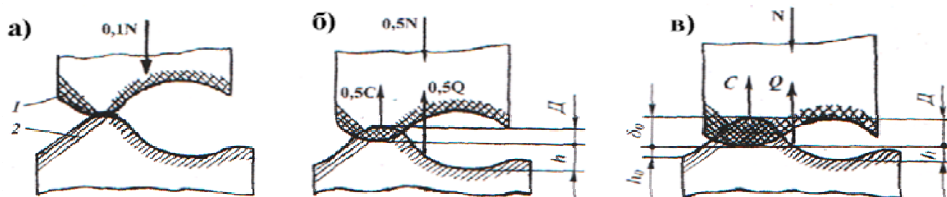


Рисунок 1 *а, б, в* – Схема контактирования металлополимерных пар трения: 1 - фрикционная накладка; 2 - тормозной шкив; при условии: *а* - 0,1 N; *б* - 0,5 N; *в* - N

Различная величина N на каждой стадии торможения пропорциональна площади контакта. На первой стадии контактирования (рис. 1 *а*) происходит импульсное взаимодействие микровыступов, способствующее генерированию элементарного электрического тока за счет микро-конденсаторов (накопителей зарядов) и термобатарей [1] с мгновенным их переключением при изменении площадей пятен контактоа микровыступов при соблюдении условий на первой стадии фрикционного взаимодействия ($A_{\phi} < A_n$), исходя из того, что фактическая площадь контактирования (A_{ϕ}) мала по сравнению с номинальной (A_n) и при этом производится суммирование составляющих генерируемых токов, а при условии

$A_n = A_\phi$ фиксируется трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентом механических свойств его материалов.

В дальнейшем, на второй стадии (рис. 1 б) электрический ток якобы гасится, и превращается в аккумулируемую теплоту. На третьей стадии взаимодействия микровыступов импульсная нормальная сила N является максимальной (рис. 1 в), площадь контактирования поверхностей увеличивается, а, следовательно, наблюдается рост трибоэффекта, т.е., поверхностной температуры контакта. Суммирование элементарных электротоков, генерируемых на микровыступах (первая стадия торможения), позволило сформировать электрическое поле на взаимодействующих поверхностях контактов. Формируемое тепловое поле на второй и третьей стадии развивается с ростом, и как следствие, приводит к увеличению тепловых токов, циркулирующего между рабочими парами трения.

Весьма интересным является вопрос о действии еще одного источника ЭДС, роль которого, как правило, не учитывается при определении температуры поверхностных слоев методом естественной термометрии. Речь идет о так называемом акустоэлектрическом эффекте, т. е. о появлении ЭДС вследствие увлечения носителей электрических зарядов волнами вызванными механическими напряжениями. В квантовой теории, как известно, этим волнам сопоставляются фононы. Впервые, рассматривая этот вопрос применительно к трению, Л.А. Лебедев исходил из того положения, что «деформируемые» участки пятен контактов микровыступов являются источниками упругих и пластических волн. Качественный анализ задачи он проводил на примере распространения плоских волн от границы раздела без учета явлений отражения и интерференции. Воспользовавшись феноменологической формулой Г. Вайнрайха для напряженности акустоэлектрического поля получаем

$$E = \mu \alpha_{II} I / \gamma v, \quad (1)$$

и считая, что интенсивность плоских волн (I) убывает в направлении их распространения по закону

$$I(x) = I_0 e^{-ax}, \quad (2)$$

получено следующее выражение для разности потенциалов между точками с координатами x_1 и x_2 :

$$U_{12} = \frac{\mu \alpha_{II}}{\gamma v \alpha} \cdot I(x_1) [1 - e^{-a(x_2 - x_1)}], \quad (3)$$

где μ - подвижность носителей заряда; α_{II} - коэффициент затухания волн при взаимодействии с носителями заряда; γ - электропроводность материала; v - скорость волн; a - коэффициент затухания волн в материале.

Поскольку при трении возникают колебания и волны имеют различные частоты, то разности потенциалов, определенные для всех

составляющих спектра с учетом изменений акустоэлектрических свойств материала, должны быть, конечно, алгебраически просуммированы. Аналогичный подход предлагается использовать и при расчете разности потенциалов между сопряженными телами, т. е. фактически акустоЭДС ξ_a [2].

Рассмотрим теперь акт взаимодействия пары трения «полимер - металл» в присутствии электропроводной жидкости, образовавшейся в связи с выгоранием связующих компонентов из поверхностных слоев полимерной наклейки. Участие электролита в качестве щелевой капиллярной прослойки приводит к образованию скачков потенциала на границах «металл - раствор» (рис. 2). Как правило, величины φ_{III} и φ_{II} таковы, что их алгебраическая сумма не равно противоположной контактной разности потенциалов φ_{II} . Другими словами, имеем короткозамкнутый гальванический микроэлемент, что создает потенциальную возможность для протекания на его электродах окислительно-восстановительных реакций. Электродвижущая сила элемента

$$e_g = \varphi_{III} - \varphi_{II} \quad (4)$$

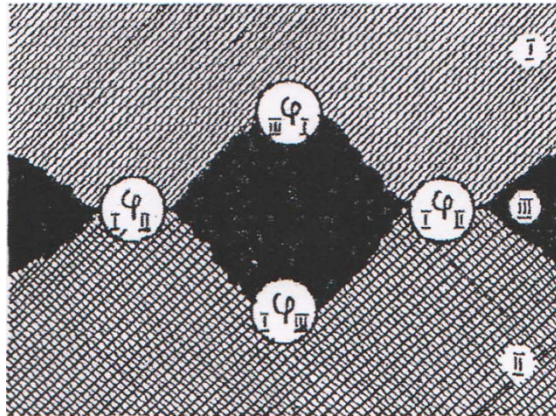


Рисунок 2 – Замкнутый участок системы «металл (I) - электролит (III) - наклейка (II)»

При относительном скольжении металлической поверхности наряду с гальваноЭДС будет действовать и термоэлектродвижущая сила (рис. 2), оказывающая, по-видимому, влияние на скорость электродных реакций, межфазовое (поверхностное) натяжение и т. д.

При одинаковом электрохимическом поведении металла по всей поверхности и наличии контактирующих островков ЭДС гальваноэлемента имеет зависимость

$$\xi_g = \xi^0 + \frac{kT}{F} \ln \frac{a_2^{1/n_2}}{a_1^{1/n_1}}, \quad (5)$$

где $\xi^0 = \xi_2^0 - \xi_1^0$ - ЭДС элемента при активности ионов $a_1=a_2=1$; n_1, n_2 - заряды ионов, k - постоянная Больцмана; T - температура; F - свободная энергия активации переноса через границу фазы.

Усредненная величина ξ_g определяется как разность электродных потенциалов с учетом неоднородности их процессов на смежных участках поверхностей. О значениях этой величины можно судить по справочной литературе [3].

Наблюдаемая упругопластическая деформация поверхностных слоев на площадках фактического контакта, приводящая к их постепенному охрупчиванию за счет электроимпульсного прошивания волнистости и шероховатости поверхностей, а также к диспергированию за счет водородного износа позволяет представить процесс изнашивания в виде малоциклового усталости материалов поверхностных слоев, расположенных в зоне деформирования.

В течение незначительного времени не наблюдается разрушение поверхности трения и отделения частиц износа, т.е. имеет место существование латентной фазы, но при этом происходит накопление энергии, микродефектов, развитие и эволюция вторичных структур. При достижении предельного состояния материалов поверхностного слоя, обусловленного появлением определенной концентрации микроповреждений, наступает стадия разрушения поверхностного слоя [4, 5].

Перечисленные поля взаимодействуют между собой, находясь при этом в едином энергетическом поле, и для их описания необходимо использовать неоднородную систему нелинейных функциональных зависимостей. Вид дифференциальных уравнений зависит не только от того какие фрикционные материалы используются в узле трения, при каких импульсных нагрузках и скоростях скольжения они контактируют друг с другом, какой подвод теплоты реализуется в парах трения, какое долевое распределение теплоты между фрикционными элементами, какое внешнее управляющее воздействие реализуется в трибосистеме, но и в каком механическом и тепловом поле функционирует узел трения.

Как известно, возникновение вибраций деталей ленточно-колодочного тормоза обусловлено рабочими процессами в фрикционных узлах, т.е. изменением закономерностей контактирования микровыступов пар трения, а также неодинаковыми деформациями ветвей тормозных лент.

На рис. 3 а, б представлены линейная и нелинейная фрикционные характеристики в зависимости от импульсной удельной нагрузки, действующей в парах трения тормоза. Принимаем, что при возникновении колебаний участки контактирования накладок будут перемещаться по синусоидальному закону (рис. 3 б) и на основании

графических зависимостей (рис. 3 а, б) построим диаграммы работы возбуждающей силы.

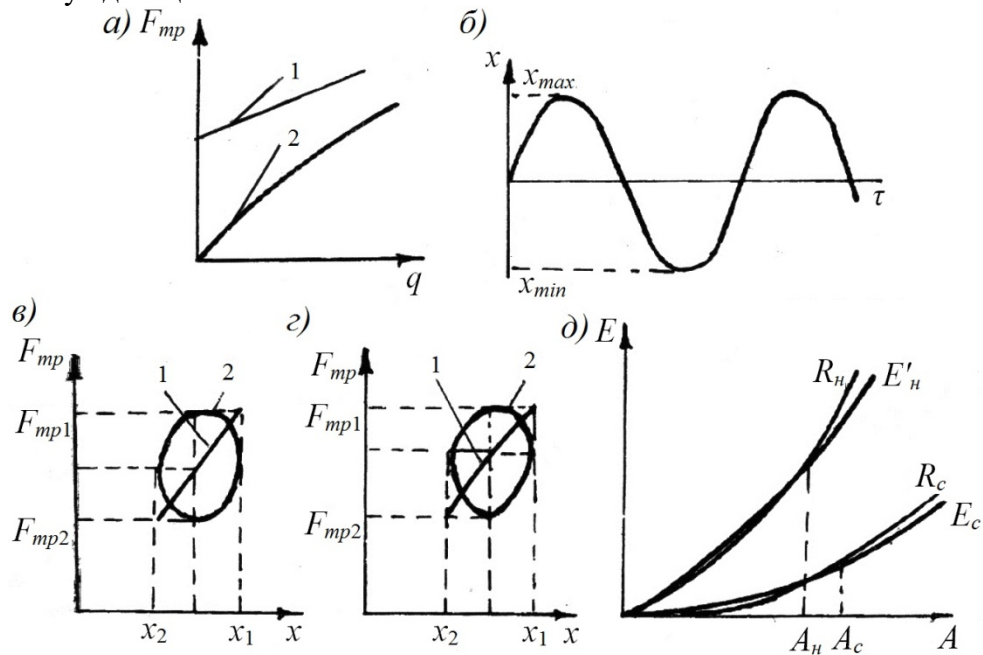


Рисунок 3 а, б, в, г, д – Энергетический баланс деталей ленточно-колодочного тормоза с различными фрикционными характеристиками: а - линейной (1) и нелинейной (2); б - перемещение деталей при колебаниях; в, г - диаграммы работы деталей в колебательном процессе; д - зависимость энергии колебания деталей от амплитуды

Однако фазы вынужденных колебаний и действия возбуждающей силы могут и не совпадать. При резонансе, когда наблюдается наибольшая амплитуда колебаний, разность фаз составляет величину $\pi/2$. Этот случай изображен на рис. 3 в, г, кривые 2, т.е. диаграмма работы изображается в виде эллипса. Так как энергия, сообщаемая колебательной системе возбуждающей силой пропорциональна площади диаграммы, она изменяется за один цикл по линейному закону. С другой стороны энергия, рассеиваемая колебательной системой пропорциональна квадрату амплитуды.

Таким образом, вносимая энергия и энергия рассеяния будут равны только в точке пересечения кривых функций для обоих видов энергии и характеризуют установившееся состояние трибосистемы.

На рис. 3 д приведены графические зависимости, характеризующие изменение вносимой колебательной энергии на сбегавшей (E_c) и набегающей (E_n) ветви ленты и энергии, демпфирующей колебания R_e и R_n указанными ветвями ленты.

Рассмотрим изменение величины возмущающей энергии и энергии рассеивания при колебании поверхностной температуры пар трения. На рис. 4 изображена зависимость динамического

коэффициента трения от поверхностной температуры для пары трения "ретиракс ФК-24А - сталь 35ХНЛ". Из рисунка видно, что в интервале температур до 200°C динамический коэффициент трения указанной пары изменяется незначительно. На диаграмме работы (рис. 5 кривая 1) этому случаю соответствует наибольшая сила трения и наименьшая амплитуда колебаний.

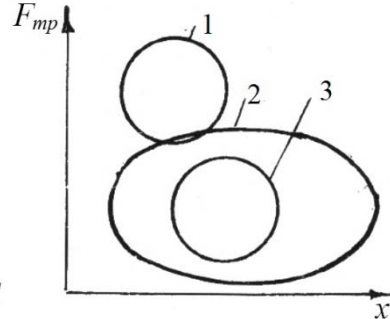
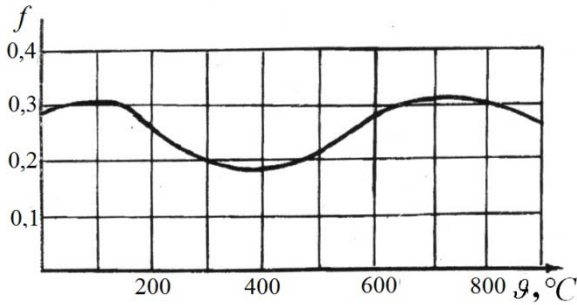


Рисунок 4 - Зависимость динамического коэффициента трения от поверхностной температуры для фрикционной пары "ФК-24А - сталь 35ХНЛ"

Рисунок 5 - Диаграммы работы пары трения "ФК-24А - сталь 35ХНЛ" в интервале температур: 1 - до 200°C; 2 - 200-350°C; 3 - 350-500°C

В интервале температур 200°C-350°C наблюдается падение динамического коэффициента трения вследствие интенсивного развития пластической деформации фрикционного материала накладки. При этом имело место снижение энергии рассеивания, в то время как величина возмущающей энергии оставалась практически постоянной. В результате точка пересечения кривых $R_{н,с}$ и $E_{н,с}$ (рис. 3 д) сместилась вправо как для набегающей, так и для сбегающей ветвей ленты, т.е. амплитуда колебаний возросла. Однако за счет размягчения поверхностного слоя накладок улучшаются демпфирующие свойства ветвей лент и рост амплитуды колебаний замедляется (рис. 6, кривая 2).

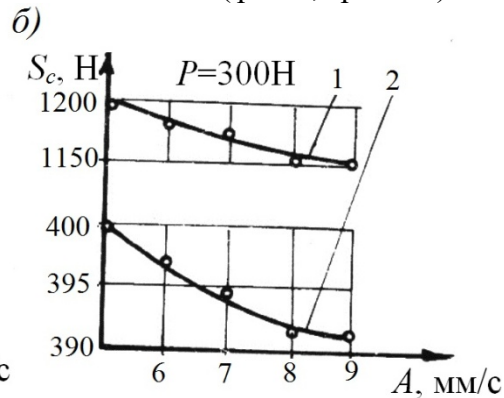
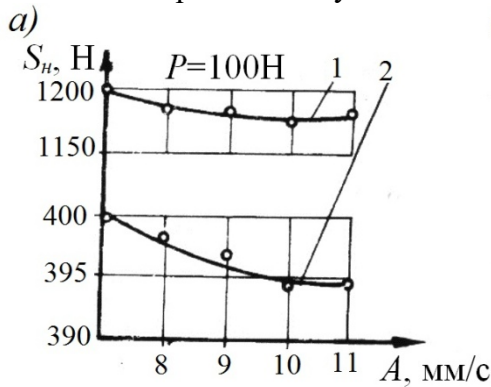


Рисунок 6 *а, б* – Зависимости натяжения набегающей ветви тормозной ленты от амплитуды радиальной вибростойкости накладок для набегающей (1) и сбегающей (2) ветви ленты

В области температур 350°C-450°C динамический коэффициент трения стабилизируется, в то время как амплитуда колебаний продолжает снижаться за счет дальнейшего размягчения поверхностного слоя накладок (рис. 6, кривая 3).

В интервале поверхностных температур 450°C-600°C наблюдалось дальнейшее снижение амплитуды колебаний, вызванное некоторым повышением динамического коэффициента трения (см. рис. 4).

Таким образом, наибольшие вибрации возникают на сбегающей ветви тормозной ленты из-за действия намного меньших импульсных удельных нагрузок в паре трения по сравнению с набегающей ветвью, что способствует, в свою очередь, развитию нелинейных характеристик пар трения трибосистем.

Проанализируем колебания, развивающиеся в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза. На рис. 6 *а, б* приведены закономерности изменения натяжения набегающей ветви ленты при изменении амплитуды радиальной вибростойкости накладок на сбегающей (*а*) и набегающей (*б*) ветвях ленты и усилий на нагрузочном устройстве 100 Н и 300 Н.

Анализ графических зависимостей показал, что с увеличением амплитуды радиальной вибростойкости натяжение набегающей ветви ленты уменьшается при постоянном натяжении ее сбегающей ветви. Увеличение амплитуды радиальной вибростойкости на сбегающей ветви ленты приводит к уменьшению натяжения ее набегающей ветви всего на 2-3% независимо от усилия натяжения сбегающей ветви.

Таким образом, в процессе экспериментальных исследований установлено, что амплитуда радиальной вибростойкости участков накладок на сбегающей ветви ленты в среднем в 1,5 - 2 раза больше, чем на ее набегающей ветви. Однако увеличение радиальной вибростойкости участков накладок на набегающей ветви ленты приводит к уменьшению усилия натяжения в 3 - 5 раз больше, чем аналогичное увеличение на сбегающей ее ветви.

На рис. 7 *а, б* приведены амплитудные спектры участков лент с накладками, полученные при различных видах импульсного нагружения и скорости вращения тормозного шкива. Анализ полученных спектров показал, что фрикционные колебания возникали

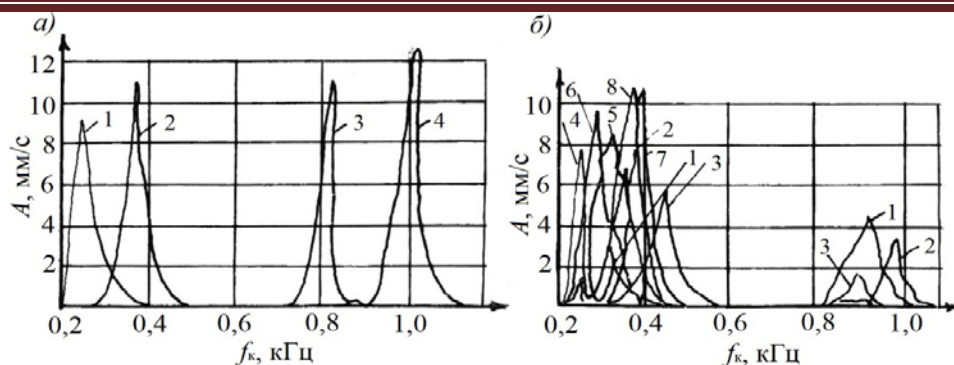


Рисунок 7 *a, б* – Амплитудные спектры радиальной виброскорости фрикционных пар: *a* - при удельной нагрузке 0,2 и 2,0 МПа (кривые 3, 4 и 1, 2) и скорости скольжения 5 и 15 м/с (кривые 3, 4 и 1, 2); *б* - от сбегающей ветви ленты к набегающей (цифры соответствуют порядковому номеру накладки) при удельной нагрузке 2,0 МПа на сбегающей ветви ленты

на участках во всех парах трения независимо от режима работы. Максимальные амплитуды колебаний наблюдались в полосе частот 300 - 1000 Гц в зависимости от режима нагружения и степени изношенности участков накладок. Наибольшее видоизменение спектров происходило при изменении импульсных удельных нагрузок. Если при минимальной импульсной удельной нагрузке (0,1 - 0,2 МПа) наблюдался один ярко выраженный пик в области частот 800 - 1000 Гц, то с увеличением импульсной удельной нагрузки амплитуда виброскорости на этих частотах падала, в то же время относительно возрастала низкочастотная составляющая виброскорости в диапазоне частот 300 - 500 Гц, причем при максимальной нагрузке амплитуда виброскорости на этих частотах достигала максимального значения. Такая тенденция наблюдалась от сбегающей к набегающей ветви ленты при постоянном усилии их нагружения. Таким образом, наибольшая амплитуда колебаний при небольших импульсных удельных нагрузках наблюдалась на первой фрикционной накладке (сбегающий конец тормозной ленты) лежала в диапазоне частот 800 - 1000 Гц, а при максимальных импульсных удельных нагрузках - на набегающем конце ленты (восьмая фрикционная накладка) в диапазоне частот 250 - 500 Гц. При замене неизношенных накладок изношенными указанная тенденция роста низкочастотной составляющей виброскорости при увеличении импульсной удельной нагрузки изменялась, за счет увеличения амплитуды колебаний в среднем на 20 - 30%.

Увеличение скорости скольжения с 5,0 до 15,0 м/с привело к смещению максимальных амплитуд колебаний в более высокочастотную область приблизительно на 10 - 30%. При этом несколько возросли (в среднем на 9 - 15%) максимальные амплитуды

колебаний как в высокочастотной, так и в низкочастотной областях. Так, если при скорости скольжения 5,0 м/с и импульсной удельной нагрузке 0,2 МПа на сбегающем конце ленты максимальная амплитуда виброскорости наблюдалась на частоте 810 Гц и составляла 11,1 мм/с, то при увеличении скорости скольжения до 15,0 м/с максимум амплитуды виброскорости сместился по частотной оси до 1050 Гц и составил 12,7 мм/с.

ВЫВОДЫ

Таким образом, к возбуждающим факторам в робастных трибосистемах ленточно-колодочных тормозов отнесены микровыступы их поверхностей, состояние поверхностных и подповерхностных слоев полимерных накладок, изменения динамических коэффициентов трения, колебание основных деталей фрикционного узла тормоза и уровень его энергетического баланса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диплом №462 на открытие "Закономерности изменения износо-фрикционных характеристик поверхностных слоев металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии" от 28.12.2013 г. авторов А.И. Вольченко, А.Д. Пашаева, А.Х. Джанахмедова и др. - Международ. акад. авторов научн. открыт, и изобрет. - Экспертиза заявки на открытие №А - 588 от 07.09.2013 г.

2. Диплом №476 на открытие «Закономерность реализации процесса электротермомеханического трения в рабочих слоях металлополимерных пар трения» от 17.10.2014 г. авторов А.И. Вольченко, А.Х. Джанахмедова, Д.А. Вольченко и др. - М.: Международ. акад. авторов научн. открыт, и изобрет. - Экспертиза заявки на открытие № А-609 от 26.04.2014 г.

3. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) /А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др. Под. общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение.-2003.-576 с.

4. Диплом №482 на открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» от 27.02.2015 г. авторов А.И. Вольченко, А.Х. Джанахмедова, Д.Ю. Журавлева и др. Международ. акад. авторов научн. открыт, и изобрет. - Экспертиза заявки на открытие № А-618 от 18.12.2014 г.

5. Трибология / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.Ю. Журавлев [и др.] // Киев - Краснодар. Из-во "Плай", 2015. - 371 с.