

Войтов В.А.
Литовка С.В.

Харьковский национальный техниче-
ский университет сельского хозяй-
ства имени Петра Василенка

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И
НАГРУЗКИ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ НА ЧАСТОТУ
ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

УДК 621.891:620.179

Проведено теоретическое исследование частоты импульсов акустической эмиссии как функции скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжениях гидропривода лесозаготовительных машин. Показано, что при увеличении скорости скольжения трибосопряжений прямопропорционально увеличивается частота импульсов акустической эмиссии. При увеличении нагрузки в трибосопряжении частота импульсов на начальном этапе увеличивается интенсивно и далее наступает момент насыщения.

Ключевые слова: трибосопряжения, акустическая эмиссия, частота импульса, скорость скольжения, нагружение.

Введение. Ресурс аксиальнопоршневых гидроагрегатов лесозаготовительных машин во многом определяется интенсивностью изнашивания их трибосопряжений. Из анализа существующих методов и подходов к оцениванию трибологических свойств подвижных сопряжений известно, что для оценки параметров изнашивания наиболее пригодными являются разновидности акустического метода, а именно метод акустической эмиссии (АЭ). Этот метод диагностики по сравнению с традиционными обладает рядом преимуществ, связанных с возможностью дифференциальной оценки в пространстве и времени аномалий структуры материала поверхности и смазочного материала [1-3].

Анализ публикаций. Параметры АЭ, отражающие динамику изменения напряженно-деформированного состояния, позволяют отслеживать различные стадии эволюции трибологической системы. Вследствие этого, для разработки методик диагностики подвижных сопряжений необходимо знать взаимосвязь и представлять характер изменения этих параметров от управляемых внешних факторов.

Как показывает анализ публикаций, наибольший прогресс в развитии метода АЭ связан прежде всего с возможностью обнаружения появления и развития дефектов на самой ранней стадии функционирования трибосистемы. Кроме того, метод позволяет получать информацию об объекте исследования *in situ*, а не *post factum*, как это происходит в случае применения большинства других исследовательских методов [1-3].

Экспериментальные исследования сигналов АЭ посвящены поиску закономерностей изменения акустико-эмиссионных параметров при изменении внешних характеристик трения [4-6]. В этих исследованиях отмечается, что характер процессов изнашивания и степень их влияния на фрикционные параметры трибосопряжений во многом определяется свойствами дискретного контакта, к которым чувствительны параметры АЭ.

Разработка моделей АЭ имеет важное значение и позволяет определять закономерности изменения параметров трибосистемы в процессе эксплуатации с учетом наличия влияющих факторов. В первую очередь, это относится к моделям сигналов АЭ, которые базируются на физических представлениях механики разрушения. Подобные модели рассмотрены в ряде работ [7-9].

Однако анализ моделей сигналов АЭ, учитывающих параметры разрушения материала, не позволяет дать однозначного ответа о процессах АЭ при взаимодействии шероховатых поверхностей сопряжений в процессе трения.

Цель работы. Целью данной работы является установление функциональной зависимости между скоростью скольжения, нагружением в трибосопряжении и частотой импульсов АЭ.

Основная часть. В процессе трения контакт микронеровностей поверхностей существует конечное время, которое определяется скоростью скольжения и нагрузкой. Динамика пятен контакта создает флуктуирующее по глубине и во времени поле механических напряжений. Поэтому трение твердых тел можно рассматривать как поверхностный динамический процесс одновременного возникновения и распада множества пятен контакта [9].

При моделировании акустических свойств фрикционного контакта при трении без смазочного материала в основу было положено утверждение, что акустические сигналы возникают в результате силового взаимодействия микронеровностей контактирующих тел (рис. 1).

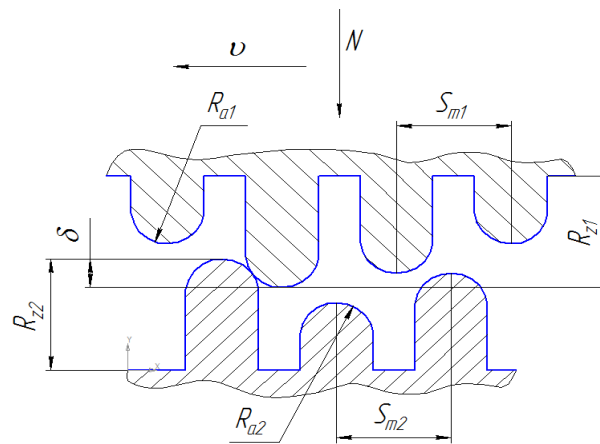


Рисунок 1 - Схема модели контакта микронеровностей трибосопряжения

При выборе расчетных соотношений делаем следующие допущения: модель шероховатых поверхностей состоит из полусферических сегментов радиусом R_a , расположенных на стержне суммарной высоты R_z , закрепленных на жестком основании; сближение двух поверхностей определяется нагрузкой N в трибосопряжении; ближайшие контакты не влияют друг на друга; распределение сферических сегментов таково, что воспроизводится реальное распределение материала по высоте шероховатого слоя; нагрузка прикладывается нормально относительно основания микронеровностей; в процессе взаимодействия выступов микронеровностей друг с другом происходит упругая деформация последних.

Моделирование проводится для пары «кольцо – кольцо», поверхности взаимодействуют торцовыми сторонами.

При сближении контактирующих поверхностей, т.е. с увеличением нормальной силы, увеличиваются контактные деформации, соответственно часть выступов, которые ранее в контакт не вступали, теперь будут контактировать. По мере сближения поверхностей средний интервал времени между отдельными импульсами сокращается в зависимости от законов распределения вершин микронеровностей на контактирующих поверхностях.

Частота импульсов АЭ пропорциональна среднему количеству контактов в единицу времени, которая определяется по формуле [10]:

$$n_r = n_c \int_0^\delta \left[\int_0^{R_{z1}} \varphi_1(x) dx \right] \cdot \varphi_2(x) dx, \quad (1)$$

где n_c – общее число выступов микронеровностей на номинальной площади контакта по меньшей поверхности трения F_{\min} определяется через средний шаг неровностей по вершинам [10]:

$$n_c = \frac{F_{\min}}{S_{m2}^2}; \quad (2)$$

R_{z1} – максимальная высота вершин микронеровностей, м; δ – сближение поверхностей, м; $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$ – плотности вероятностей законов распределения вершин микронеровностей первого и второго тел; S_{m2} – средний шаг микронеровностей по вершинам (принимается меньший), м.

Плотность вероятностей законов распределения вершин микронеровностей первого и второго тел хорошо описывается нормальным законом распределения, особенно для поверхностей с нерегулярным профилем [11]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где M – математическое ожидание отклонения профиля, м; σ – среднее квадратическое отклонение профиля, м.

Для наиболее часто используемой модели эквивалентной шероховатой поверхности сближение рассчитывается по формуле [12]:

$$\delta = R_p \cdot \left(\frac{N}{\alpha \cdot H_m \cdot F_c \cdot t_m} \right)^{\frac{1}{v_m}}, \quad (4)$$

где N – нагрузка в трибосопряжении, Н; F_c – контурная площадь контакта, м²; R_p – радиус кривизны вершин острия микронеровности, м; α – коэффициент, учитывающий вид контакта; H_m – твердость по Майеру, Па; v_m , t_m – параметры опорной кривой [13].

При расчете необходимо учитывать свойства более мягкого материала и шероховатость более твердого.

Контурная площадь контакта, моделируемая сферическими сегментами шероховатых волн, определяется на основании выражения [12]:

$$F_c = 1,84 \cdot F_{\min} \cdot K_w \left(\frac{r_w}{R_w} \right)^{\frac{2}{4+2\delta_w}} \cdot \left(\frac{N}{F_{\min}} \cdot E \right)^{\frac{2}{2+2\delta_w}}, \quad (5)$$

где K_w и δ_w – коэффициенты, зависящие от свойств материала и от соотношения высоты волн и шероховатости [13]; r_w – радиус кривизны волны, м; R_w – высота волны, м; E – приведенный модуль упругости, Па⁻¹.

Индексы 1 и 2 при аббревиатурах величин соответствуют указанию на поверхности трения.

Приведенный модуль упругости определяется как [13]:

$$E = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (6)$$

где μ_1, μ_2 – коэффициент Пуассона материала, соответственно первой и второй поверхности; E_1, E_2 – модули упругости материалов поверхностей, Па.

Частота импульсов АЭ для моделируемой пары «кольцо – кольцо» определяем по формуле:

$$f = n_r \cdot \frac{v_{ck}}{S_{m2}}, \quad (7)$$

где v_{ck} – скорость скольжения микронеровностей, м/с.

Подставляя в выражение (7) зависимости (1), (2) и (3) получаем формулу, описывающую функциональную зависимость частоты импульсов АЭ от скорости скольжения и нагрузки в трибосопряжении:

$$f(v_{ck}, N) = \frac{v_{ck}}{S_{m2}} \cdot \frac{F_{\min}}{S_{m2}^2} \cdot \int_0^{\delta(N)} \left[\int_0^{R_{z1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \cdot e^{-\frac{(x-M_1)^2}{2\sigma_1^2}} dx \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \cdot e^{-\frac{(x-M_2)^2}{2\sigma_2^2}} dx \cdot (8)$$

Для расчета в первом приближении предполагаем, что радиус кривизны вершины острия микронеровности равен среднеарифметическому отклонению профиля R_a .

Для расчетов принимаем следующие данные: радиус кривизны вершин острия микронеровности $R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м; $R_{a2} = 0,125 \cdot 10^{-6}$ м; максимальная высота вершин микронеровностей, $R_{z1} = 3,2 \cdot 10^{-6}$ м, $R_{z2} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м; номинальная площадь контакта по меньшей поверхности трения, $F_{\min} = 0,015$ м²; средний шаг микронеровностей по вершинам, $S_{m2} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ м; математическое ожидание отклонения профиля, $M_1 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ м, $M_2 = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м; среднее квадратическое отклонение профиля, $\sigma_1 = 0,92 \cdot 10^{-6}$ м, $\sigma_2 = 0,15 \cdot 10^{-6}$ м; нагрузка в трибосопряжении, $N = 0 \dots 1000$ Н; радиус кривизны вершин острия микронеровности принимаем равным R_a для учета приработки поверхности, $R_p = R_{a1} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м; коэффициент, учитывающий вид контакта, при упругом контакте $\alpha = 0,5$; твердость по Майеру, для бронзовой поверхности $H_m = 800$ МПа; параметры опорной кривой, для бронзовой поверхности

$\nu = 3$, $t_m = 0,5$; модуль упругості матеріала сталь, $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; модуль упругості матеріала бронзи, $E_2 = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона матеріала сталь, $\mu_1 = 0,3$; коефіцієнти Пуассона матеріала бронзи, $\mu_2 = 0,35$; коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріала і від співвідношення висоти хвиль і шероховатості, $K_w = 1,5$; $\delta_w = 0,6$ [13]; радіус кривизни хвилі, $r_w = 50 \cdot 10^{-6}$ [12]; швидкість скользання мікронервностей, $v_{ck} = 0 \dots 5$ м/с.

Результати дослідження. Результати розрахунку частоти імпульсів АЕ в залежності від швидкості скользання і навантаження в трибосопрязненні представлені на рисунку 2.

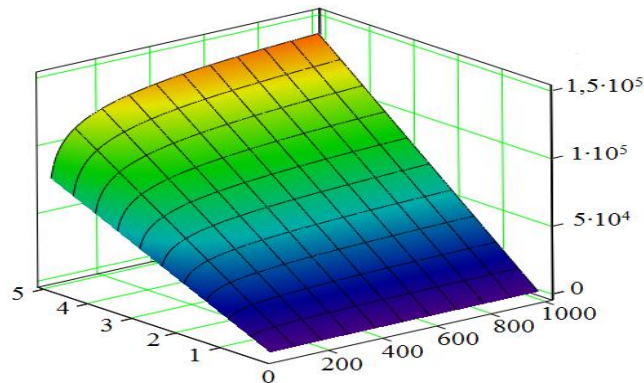


Рисунок 2 – Графік залежності частоти імпульсів АЕ від швидкості скользання і навантаження в трибосопрязненні

Із аналізу залежності (8) і графіка на рисунку 2 видно, що частота імпульсів АЕ збільшується при збільшенні навантаження і швидкості скользання поверхностей. Показано, що частота імпульсів АЕ прямопропорційно залежить від швидкості скользання і для представлених максимальних значень швидкості скользання і навантаження в трибосопрязненні досягає 140 кГц. Дані значення добре корелюють з експериментальними даними [2,4,6].

Показано, що при зміні навантаження в трибосопрязненні в діапазоні від 0 Н до 1000 Н при швидкості скользання в діапазоні від 0,5 м/с до 5 м/с частота імпульсів АЕ збільшується до 1,8 раз.

Крім цього, на графіках видно, що з збільшенням навантаження в трибосопрязненні при постійній швидкості скользання частота імпульсів АЕ на початковій стадії збільшується інтенсивно і далі інтенсивність знижується. Можливо передбачити, що настає момент насичення сигналу.

Висновки. На основі теоретичних досліджень встановлена функціональна зв'язь частоти імпульсів АЕ зі швидкістю скользання поверхностей і навантаженням в трибосопрязненні. Показано, що при збільшенні швидкості скользання трибосопрязненні прямопропорційно збільшується частота імпульсів АЕ. При збільшенні навантаження в трибосопрязненні частота імпульсів на початковій стадії збільшується інтенсивно і далі настає момент насичення сигналу.

Література

1. Рубцов В.Е. Використання акустичної емісії для аналізу процесів изнашивания при трінні скользання / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаєв, А.В. Колубаєв, В.Л. Попов //Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 4. – С. 79-84.

2. Маленко П. И. Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – Т.13. – № 2. – С. 164—171.
3. Баранов А.В. Ультразвуковой мониторинг работы трибосопряжений / А.В. Баранов, С.В. Тарасевич, В.А. Вагнер // Ползуновский вестник. – 2012. – Вип. 1/1– С. 23-27.
4. Рапопорт П.С и др. Исследование динамики процесса трения металлов методом акустической эмиссии. - Трение и износ. 1981, Т.2. №2. С. 304 - 309.
5. Филатов СВ. Акустическая эмиссия при абразивном изнашивании материалов // Трение и износ. – 1982. – Т.3. – №3. – С. 559 – 562.
6. Щавелин В.М., Сарычев Г.А. Исследование акустического излучения, возникающего в зоне фрикционного контакта твердых тел // Трение и износ. – 1983. – Т.4.– №5. – С. 808 - 815.
7. Иванов В.И., Белов В.М. Акусто-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. — М: Машиностроение, 1981. — 184 с.
8. Бабак В.П., Филоненко С.Ф., Калита В.М. Модели формирования сигналов акустической эмиссии при деформировании и разрушении материалов //Технологические системы, 2002. – № 1(12). — С. 26—34.
9. Бабак В.П., Філоненко С.Ф., Калита В.М. Моделювання сигналів акустичної емісії при виникненні в матеріалі тріщин //Вісник НАУ, 2002. — № 1. – С. 5 - 10.
10. Рыжов Э.В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. / Э.В. Рыжов, Ю.В. Колесников, А.Г. Сулова – Киев: Наук. Думка, 1982. – 172 с.
11. Рудзит Я.А. Статистический расчёт радиуса закругления вершин микронеровностей / Я.А. Рудзит // Вопросы механики и машиностроения. – 1968. – Т. 23, № 3. – С. 66–74.
12. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для вузов. 2-е изд. переработ, и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. - 664 с.
13. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Voitov V.A., Litovka S. Influence of sliding speed and load in the friction units on pulse frequency of acoustic emission

A theoretical study of the pulse frequency of acoustic emission as a function of sliding speed and load in the friction units of hydraulic drive forest machines has been conducted. It is shown that an increase of the sliding speed of friction units has allowed to increase in direct proportion the pulse frequency of acoustic emission. With increasing load in the friction units the pulse frequency initially increases rapidly and then comes a point of saturation of signal.

Keywords: tribomating, acoustic emission, pulse frequency, speed slides, loading.

References

1. VE Rubtsov The use of acoustic emission analysis of wear processes in sliding / VE Rubtsov, EA Kolubaev, AV Kolubaev, VL Popov // Technical Physics Letters. - 2013. - V. 39. - Vol. 4. - P. 79-84.
2. Malenko PI Study of acoustic emission friction surfaces in lubrication conditions / Condensed Matter and interphase boundaries. - 2011. - T.13. - № 2. - S. 164-171.
3. Baranov AV Ultrasonic monitoring of tribosoprjazhenij / AV Baranov SV Tarasevich, VA Wagner // Polzunovsky Gazette. - 2012. - Vip. 1/1 pp 23-27.
4. PS Rappoport et al. Study of the dynamics of the process of friction of metal acoustic emission method. - Friction and wear. 1981 Vol.2. №2. S. 304 - 309.
5. Filatov ST. Acoustic emission at abrasive wear of materials // Friction and Wear. - 1982. - Vol.3. - No. 3. - S. 559 - 562.
6. Schavelin VM, Sarychev GA acoustic emission study, appearing in the friction zone solids // Friction and Wear. - 1983. - T.4.- №5. - S. 808 - 815.
7. V. Ivanov, V. Belov Acoustic emission monitoring of welding and welded joints. - M: Mechanical engineering, 1981. - 184 p.
8. Babak VP, SF Filonenko, VM Kalita Models of formation of acoustic emission signals during the deformation and fracture of materials // Process Systems, 2002. - № 1 (12). - S. 26-34.
9. Babak VP, Filonenko SF, VM Kalita Modelyuvannya signaliv akustichnoï emisii at viniknenni in materiali trischin // News of NAU, 2002. - № 1. - S. 5 - 10.
10. Ryzhov EV Contacting the solids under static and dynamic loads. / EV Ryzhov, Y. Kolesnikov, AG Suslov - Kiev Sciences. Dumka, 1982. - 172 p.
11. YA Rudzite Statistical calculation of the radius of curvature of the vertex microroughnesses / YA Rudzite // Questions of mechanics and engineering. - 1968. - T. 23, № 3. - S. 66-74.
12. Fundamentals of tribology (friction, wear, lubrication): Textbook for universities. 2nd ed. Recycled and additional. / AV Chichinadze, ED Brown, NA Boucher et al. ; Under the total. Ed. AV Chichinadze. M. : Engineering, 2001. - 664 p.
13. KRAGELSKY IV Basics of calculations for friction and wear / IV KRAGELSKY, NM Dobychin, VS KOMBALOV. - M. : Engineering, 1977. - 526 p.