

13. Лебедев В.М. Повышение износостойкости и антифрикционных свойств ПА-покрытий / В.М. Лебедев, А.Я.Башкарев, А.А.Ашейчик, В.В. Букреев // Пластические массы. – 1980. – №10.

14. Чулкин С.Г. Использование композитных материалов в узлах трения нефтяного оборудования – шаровой запорной арматуры и в кабелях-толкателях / С.Г.Чулкин, А.А.Ашейчик, С.Н.Селин // Вопросы материаловедения. – 2012. – №4 (72).

15. Алероев Р.В. Исследование физико-механических свойств эластомеров для изготовления уплотнений: выпускная квалификационная работа магистра: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта; научный руководитель А. А. Ашейчик. — Санкт-Петербург, 2023. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2023/vr/vr23-663.

R.V. Aleroev¹, Mohseni Emad², A.D. Breki¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, r.aleroev@gmail.com

²Mahallat Higher Education Center, Iran

DEVELOPMENT OF A FINITE ELEMENT MODEL OF A RUBBER FIXED SEAL AND CALCULATION BY THE FINITE ELEMENT METHOD OF LUBRICANT LEAKS THROUGH THE SEAL

Abstract

In order to meet the stringent requirements for seal tightness, hundreds of new rubber formulations for seal manufacturing are developed annually worldwide. Laboratory testing of all these elastomers is necessary to determine their physical and mechanical properties, particularly relaxation properties. Based on the results of these tests, the most suitable elastomers are identified and subjected to long-term bench testing of assemblies containing seals manufactured from these materials. However, these long-term tests are highly costly and cannot be conducted for the entire life cycle of a product. Therefore, various techniques are employed to predict the lifespan and potential for leaks of seals based on short-term testing results.

Keywords: rubber, modulus of elasticity, relaxation, finite element method, leakage.

УДК 519.257

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-257

М.С. Складнова, М.Н. Ерофеев
ФГБУН Институт машиноведения им А.А. Благонравова
Российской академии наук,
Москва, Россия, skladnova.m@yandex.ru

МЕТОДЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

Аннотация

В работе рассмотрены основные методы анализа данных, включая вероятностные модели, корреляционный анализ, регрессионный анализ и машинное обучение для изучения характеристик трения и износов материалов. В работе представлены результаты исследований и их применимость для повышения

эффективности и надежности триботехнических систем.

Ключевые слова: трибология, статистика, машинное обучение, цифровые двойники.

Введение

Трибология является одной из самых актуальных областей в современном обществе, присутствуя практически во всех аспектах нашей жизни. [1] Разработки в области трибологии востребованы в машиностроении, часовом деле, медтехнике, космической механике. Основными явлениями и процессами в трибосистемах являются трение, износ и смазка, определяющие эксплуатационные характеристики и ресурс деталей, механизмов и машин в целом. Понимание трибологических процессов может проложить путь к новым решениям технических проблем, благодаря совершенствованию конструктивных трибосистем и применению новых высокоэффективных материалов для деталей узлов трения, современные машины нового поколения отличаются высокой надежностью и увеличенным сроком службы. [2, 3] Среди стремительно развивающихся направлений отмечают развитие цифровых технологий, в которое входят: искусственный интеллект, машинное обучение, интернет вещей, анализ больших данных, технологии распределенного реестра и блокчейн, робототехнику, квантовые технологии, виртуальную и дополненную реальность, предиктивную аналитику, нейротехнологии и фотонику. [4]

Особое внимание привлекают цифровые двойники, которые являются не только технологией, но и результатом применения этой технологии. В трибологии цифровые двойники представляют собой виртуальное представление реальной системы, включая ее структуру, параметры и поведение. Использование цифровых двойников позволяет сократить расходы на тестирование новых материалов, смазок или конструкций, а также улучшить обслуживание и прогнозирование возможных отказов.

Создание цифровых двойников изделий - это важный этап в исследовании и проектировании новых продуктов, а также в области обслуживания и мониторинга состояния оборудования. Сбор и анализ данных о трении и износе являются первоочередным шагом в создании цифровых двойников изделий. Статистические методы используются для обработки и интерпретации этих данных, а также для выявления закономерностей и взаимосвязей между различными параметрами, влияющими на процессы отказов механизмов и выхода из строя деталей. [5, 6] Машинное обучение предоставляет эффективные инструменты для построения предиктивных моделей, способных предсказывать поведение трибологических систем в различных условиях эксплуатации. [7]

Кроме того, трибология характеризуется тем, что пока невозможно полностью описать лежащие в ее основе процессы математическими терминами, например, дифференциальными уравнениями. Современные методы машинного обучения или искусственного интеллекта предоставляют возможности для изучения сложных процессов в трибологических системах и классификации количественной оценки их поведения эффективным способом или даже в режиме реального времени. Преимущества и потенциал методов машинного обучения и искусственного интеллекта является их способности справляться с многомерными задачами и наборами данных, а также адаптироваться к изменяющимся условиям с разумными усилиями и затратами. Они позволяют идентифицировать соответствующие связи и

существующие знания по имеющимся данным. Кроме того, характеристики трения и износа представляют собой не точные данные, а необратимые величины потерь, зависящие от времени и условий испытаний. [9]

Методы и материалы

Применение методов теории выборок в трибологии направлено на разработку более эффективных материалов, обработки поверхностей и смазочных материалов, что способствует повышению производительности, уменьшению износа и продлению срока службы механизмов и оборудования. Это также позволяет сократить расход ресурсов и снизить негативное воздействие на окружающую среду за счет оптимизации процессов и использования более долговечных и эффективных материалов. Для исследования процессов трения и изнашивания требуются данные показателей различных характеристик, например, показатели качества поверхности, показатели износостойкости пар трения. Не всегда можно провести исследования всех рассматриваемых триботехнических объектов и тогда используются вероятностные оценки подобных характеристик.

Выборочные характеристики в статистике — это числовые значения, которые описывают различные аспекты выборки данных, такие как среднее, медиана, дисперсия и стандартное отклонение. [4, 5] Они помогают анализировать данные из выборки и делать выводы о всей совокупности характеристики. Генеральной совокупностью является совокупность всех возможных объектов исследования, относительно которых предполагается делать выводы при постановке гипотезы.

На практике чаще всего вычисляют выборочное среднее число исследуемых случайных величин

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n y_i$$

И выборочную дисперсию

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{1}^n y_i \right)^2 \right]$$

По выборочным характеристикам судят о генеральных характеристиках, о генеральном среднем μ исследуемых случайных величин y_i и генеральной дисперсии σ^2 .

Рандомизация в статистике - это процесс случайного распределения характеристик выборки или элементов исследования между различными группами или условиями. Рандомизация также помогает уменьшить возможные искажения результатов исследования, связанные с субъективным выбором характеристик объектов исследования. Она является важным методом контроля в экспериментальных исследованиях, позволяя сделать выводы о причинно-следственных связях между переменными. Рандомизация может быть осуществлена различными способами, например, случайный выбор элементов для анализа и случайное назначение условий эксперимента.

Значительные ошибки, которые могут исказить результаты анализа данных могут возникать из-за ошибок в сборе, записи или обработке данных, а также из-за выбросов или некорректных значений. [6] Удаление крайних элементов выборки в статистике - это процесс исключения самого маленького и самого большого значения из набора данных. Этот метод может использоваться для уменьшения

влияния выбросов или ошибок на статистические анализы. Однако необходимо учитывать, что удаление крайних элементов может изменить статистические характеристики выборки и привести к искаженным результатам. Поэтому этот метод следует применять осторожно и с учетом особенностей конкретного исследования.

В трибологических исследованиях метод корреляционного анализа может использоваться для выявления связей между различными параметрами, такими как сила трения, износ, скорость и температура. Благодаря согласованному изменению двух или большего количества признаков можно определить закономерность при изменении переменной. Например, корреляционный анализ может помочь выявить, как изменение скорости влияет на износ материалов или какая зависимость между силой трения и температурой при работе механизмов. [7] Это позволяет лучше понять и оптимизировать трибологические процессы для улучшения эффективности и долговечности механизмов и оборудования.

Корреляционный анализ определяет задачу измерения тесноты связи между варьирующими переменными и оценивание факторов, оказывающих наибольшее влияние на результативный признак. Регрессионный анализ предназначен для выбора формы связи и типа модели для определения расчетных значений зависимой переменной. Например, метод регрессионного анализа может использоваться для определения влияния скорости движения на износ материалов или для прогнозирования коэффициента трения при различных условиях эксплуатации. Это помогает лучше понять физические процессы, происходящие в типологических системах, и оптимизировать их работу для повышения эффективности и долговечности оборудования. [8] Для осуществления установления связей между переменными можно использовать построение функциональной модели связи входных параметров триботехнических систем.

Наиболее простой формой связи является линейный регрессионный анализ, который сводится к оценке параметров регрессии. Например, имеется определённое число пар наблюдений (x_i, y_i) , где x_i является исследуемым входным параметром системы и y_i - независимый входной параметр системы. Для оценки параметров наблюдений строим зависимость в виде прямой линии:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1$$

Где Y обозначает предсказываемое уравнением регрессии значение отклика. Значения коэффициентов параметров регрессии находят методом наименьших квадратов:

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{\sum_1^i y_i x_i - \frac{(\sum_1^i y_i)(\sum_1^i x_i)}{i}}{\sum_1^i x_i^2 - \frac{(\sum_1^i x_i)^2}{i}} \\ \beta_0 = \frac{(\sum_1^i y_i - b_1 \sum_1^i x_i)}{i} = \bar{y} - b_1 \bar{x} \end{cases}$$

Дисперсионный анализ уравнения регрессии используется для оценки статистической значимости модели регрессии и каждого из её параметров. Он позволяет определить, насколько изменчивость в данных объясняется моделью регрессии, а также провести сравнение между несколькими моделями, чтобы определить, какая из них лучше подходит для описания данных. В трибологических исследованиях это может быть полезным для оценки влияния различных факторов на трение и износ, а также для оптимизации модели для более точного прогнозирования результатов. Дисперсионный анализ уравнения регрессии также

позволяет оценить статистическую значимость каждого коэффициента регрессии и проверить гипотезы о их значении. Он анализирует различия между фактическими значениями зависимой переменной и значениями, предсказанными моделью регрессии, чтобы определить, насколько хорошо модель соответствует данным. Это важный инструмент для оценки эффективности регрессионной модели в трибологических исследованиях и помогает улучшить понимание взаимосвязей между различными параметрами в системах трения и износа.

Нелинейная регрессионная зависимость описывает отношения между переменными, которые не могут быть адекватно представлены линейной моделью. [8] В трибологических исследованиях это может означать, что зависимость между параметрами, такими как сила трения, износ или температура, не следует линейному шаблону, а может быть криволинейной, экспоненциальной, логарифмической и т. д. Методы нелинейной регрессии используются для поиска оптимальной нелинейной функции, которая наилучшим образом соответствует данным, и для оценки параметров этой функции. Это позволяет более точно моделировать сложные взаимосвязи в трибологических системах и предсказывать их поведение при различных условиях эксплуатации.

Множественный регрессионный анализ - это статистический метод, широко применяемый в трибологии для анализа взаимосвязей между различными переменными, влияющими на трибологические характеристики материалов и поверхностей. Одной из ключевых целей множественного регрессионного анализа в трибологии является выявление влияния различных параметров на трение и износ в различных условиях эксплуатации. Эти параметры могут включать в себя такие факторы, как тип смазки, скорость нагрузки, температура окружающей среды, химический состав материалов и многие другие. Процесс множественного регрессионного анализа начинается с формулирования гипотезы о влиянии определенных переменных на исследуемый трибологический процесс. Затем собираются данные об этих переменных в ходе экспериментов или наблюдений. После этого строится математическая модель, описывающая отношения между независимыми и зависимой переменными. Одним из основных преимуществ множественного регрессионного анализа является возможность учета влияния нескольких переменных одновременно, что позволяет получить более полное представление о сложных трибологических процессах. Кроме того, этот метод позволяет оценивать значимость каждой переменной и их взаимодействия. Однако, при использовании метода множественной регрессии в трибологии необходимо учитывать возможные ограничения, такие как нелинейность отношений между переменными, наличие выбросов в данных и потенциальные проблемы с мультиколлинеарностью.

Планирование экспериментов является неотъемлемой частью идентификации и анализа трибологических систем, поскольку оно позволяет систематизировать и оптимизировать процесс исследования, обеспечивая точность и достоверность получаемых результатов. [11] Среди основных методов планирования экспериментов, используемых в идентификации трибологических систем выделяют полный факторный эксперимент (ПФЭ), дробный факторный эксперимент (ДФЭ), методы смешивания и оптимального выбора. В методе ПФЭ изменяются все факторы исследования на разных уровнях, что позволяет оценить их влияние на результат. Например, при исследовании трибологических систем факторами могут быть тип смазки, нагрузка и скорость скольжения. Полный факторный эксперимент

позволяет выявить как отдельное влияние каждого фактора, так и их взаимодействие. В случае, когда количество факторов слишком велико или проведение полного факторного эксперимента слишком затратно, применяется дробный факторный эксперимент. В этом методе рассматриваются только часть возможных комбинаций факторов, выбираемая с целью оптимизации ресурсов и сохранения информации о влиянии основных факторов. В трибологических исследованиях часто возникает необходимость оптимизации состава смесей, таких как смазочные материалы или композитные материалы. Метод смешивания позволяют систематически изменять соотношение компонентов смеси и анализировать их влияние на трение и износ. Метод оптимального выбора используются для максимизации информации, получаемой из ограниченного числа экспериментов. Они позволяют определить оптимальное распределение точек экспериментов в пространстве факторов для достижения наилучших результатов идентификации трибологических систем.

Заключение

Статистические методы играют ключевую роль в повышении достоверности и точности триботехнических систем, а также достижении максимальной адекватности математических и компьютерных моделей цифровых двойников изделий. Использование статистических данных позволяет учитывать разнообразие влияющих факторов и неопределенностей, что существенно улучшает прогностические возможности и позволяет более точно моделировать поведение объектов в различных условиях. Эти методы позволяют оптимизировать параметры и дизайн изделий, а также реализовать мониторинг и обслуживание оборудования в реальном времени. Такой подход открывает новые перспективы для создания более точных и адаптивных цифровых двойников, способствуя прогрессу в различных областях, включая трибологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holmberg, K. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / K. Holmberg, A. Erdemir // *Friction*. – 2017. – Vol. 5, No. 3. – P. 263-284. – DOI 10.1007/s40544-017-0183-5. – EDN NLGWZL
2. Скоромнов, В. М. Трибология в физике и технике / В. М. Скоромнов, Н. А. Филина, И. Е. Гусев // *Современные проблемы математики, физики и физико-математического образования: Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции, Орехово-Зуево, 22 декабря 2019 года.* – Орехово-Зуево: Издательство "Перо", 2019. – С. 77-79. – EDN DTINQE.
3. Машков, Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров / Ю. К. Машков. – Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2013. – 240 с. – ISBN 978-5-8149-1458-3. – EDN SBRST.
4. Сравнительный анализ методов построения математических моделей функционирования объекта с применением машинного обучения / В. Н. Клячкин, В. Н. Ковальников, В. В. Шеркунов, Хуссейн Мохамед // *Программные продукты и системы.* – 2023. – № 2. – С. 189-195. – DOI 10.15827/0236-235X.142.189-195. – EDN MYQYMP.
5. Клячкин, В. Н. Прогнозирование состояния технического объекта с применением методов машинного обучения / В. Н. Клячкин, Д. А. Жуков // *Программные продукты и системы.* – 2019. – № 2. – С. 244-250. – EDN VBAGKR.
6. Умархаджиев, М. Х. Р. Развитие и применение методов машинного обучения в современных информационных технологиях: анализ, тенденции и перспективы / М. Х. Р.

- Умархаджиев // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 104-14. – С. 134-136. – DOI 10.18411/trnio-12-2023-806. – EDN FYKXPZ.
7. Rosenkranz, A.; Marian, M.; Profito, F.J.; Aragon, N.; Shah, R. The use of artificial intelligence in tribology—A perspective. *Lubricants* 2021, 9, 2.
8. Мышкин, Н. К. Цели устойчивого развития и зеленая трибология / Н. К. Мышкин, Ф. А. Григорьев // Пожарная и аварийная безопасность. – 2022. – № 4(27). – С. 44-47. – EDN ZSHQLC.
9. Kügler, P.; Marian, M.; Schleich, B.; Tremmel, S.; Wartzack, S. tribAIIn—Towards an explicit specification of shared tribological understanding. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 4421.
10. Ефремов, Л. В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий / Л. В. Ефремов. – Санкт-Петербург: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН "Издательство "Наука", 2008. – 216 с. – ISBN 978-5-02-025340-7. – EDN RXZYOR.
11. Шаповалов, П. А. Современные методы расчета выборочного среднего и стандартного отклонения по известным описательным статистикам (обзор литературы) / П. А. Шаповалов, Р. Е. Лахин // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. – 2023. – № 3. – С. 118-130. – DOI 10.24412/2312-2935-2023-3-118-130. – EDN GDHWVI.
12. Бушмелева, К. И. правила сбора статистики по косвенным параметрам работы вычислительных систем / К. И. Бушмелева, Т. В. Гавриленко, А. В. Никифоров // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции, Сочи, 01–10 октября 2022 года / Под редакцией С.У. Увайсов. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2022. – С. 152-155. – EDN VKSXJR.
13. Развитие метода активных корреляций / Ю. С. Цыганов, А. Н. Поляков, А. А. Воинов, А. В. Шумейко // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 181-187. – DOI 10.1134/S2079562917060252. – EDN YUBETR.
14. Афанасьев, В. В. Применение методов математической статистики в научных исследованиях / В. В. Афанасьев // Ярославский педагогический вестник. – 2006. – № 4(49). – С. 5-12. – EDN ISVLQF.
15. Тихомиров, В. П. Трибология: методы моделирования процессов: Учебник и практикум / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2017. – 244 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-534-04911-4. – EDN ZTAKLT.

M.S. Skladnova, M.N. Yerofeyev
The A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering
Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, skladnova.m@yandex.ru

METHODS OF MATHEMATICAL AND STATISTICAL MODELING FOR THE ANALYSIS OF FRICTION AND WEAR PROCESSES

Annotation

The paper considers the main methods of data analysis, including probabilistic models, correlation analysis, regression analysis and machine learning to study the characteristics of friction and wear of materials. The paper presents the results of research and their applicability to improve the efficiency and reliability of tribotechnical systems.

Keywords: tribology, statistics, machine learning, digital twins.