

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



К.Н. Войнов

**ТРИБОТЕХНИКА И НАДЁЖНОСТЬ
МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2014

УДК 531.8

Войнов К.Н. Триботехника и надёжность механических систем: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 74 с.

Изложены основы трибологии, триботехники и надёжности механических систем. Приведены термины, определения, некоторые формулы и расчёты практических примеров.

Предназначено для студентов, обучающихся по программам подготовки бакалавров направлений 141200, 190600, 220700, 151000, 140700.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Арет

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, 2014

© Войнов К.Н., 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Трибология/триботехника: немного истории	5
Ряд часто встречающихся терминов.....	18
О надёжности механических систем	30
Список литературы.....	71

ВВЕДЕНИЕ

В достаточно ограниченном объёме трудно и практически невозможно подробно осветить две дисциплины: трибологию и надёжность, которые содержат свои специфические термины, определения, законы и формулы. Прикладная часть трибологии – триботехника, в которой в основном рассматриваются приложения теоретических положений. Наличие в лабораториях и у учёных современных научных приборов позволяет детально исследовать физико-химические процессы при трении/ изнашивании, определять химический состав и структуру материалов, образующих пары трения, анализировать динамику изменения шероховатости поверхностей трения, сил и моментов трения, определять значения коэффициентов трения движения и покоя, исследовать роль смазочных материалов и др.

Весьма широкой по своим разделам является и теория надёжности систем, содержащая свои термины, законы, правила, методы расчёта и прогнозирования. Как и в предыдущем случае, здесь много интереснейших задач в теоретическом плане, в вопросах прогнозирования, в оценке остаточного ресурса работы деталей и пар трения, в диагностике технического состояния механических, электрических или электронных систем. Математическая теория надёжности охватывает многие вопросы: достаточность наблюдений, доверительные интервалы/границы, законы распределения для описания появляющихся отказов постепенного и внезапного типа, критерии проверки правомочности принятия к вычислениям конкретного вида распределения, моделирование и пр.

В обеих дисциплинах никак нельзя обойтись без современной компьютерной техники, позволяющей быстро и корректно решать многие сложные задачи, осуществлять перебор большого числа вариантов с нахождением наиболее рационального решения и соответственно с получением более точного ответа.

Хочется надеяться, что материал данной работы будет востребован читателями для его практического использования, поможет разобраться в обширных возможностях этих двух дисциплин и пробудит желание самостоятельно продолжить исследования в понравившихся направлениях как в теоретическом, так и в прикладном планах.

ТРИБОЛОГИЯ/ТРИБОТЕХНИКА: НЕМНОГО ИСТОРИИ

Трибология – наука, изучающая трение и процессы, сопровождающие трение. Химмотология – техническая отрасль знаний, изучающая смазочные материалы и особенности их применения в технике. Трение – процесс, который распространён повсеместно, а формы его проявления весьма разнообразны.

Швейцарский физик Шарль Гильом (лауреат Нобелевской премии 1920 г. и создатель сплавов «инвар» Fe + Ni и «элинвар» Fe+Ni+Cr, W, Mn и др.) писал, что за редким исключением не приходится его (трение) призывать на помощь, так как оно приходит к нам само. Трение поглощает до 40% всей вырабатываемой в мире энергии. На ремонт техники из-за износа уходит до 5 % валового национального дохода. И это всё плохо. Вместе с тем русский учёный-триболог Н.П. Петров примерно уже 100 лет назад отмечал, что без трения фактически нет движения на Земле. О трении и его роли писали в своих книгах Жюль Верн и Джеймс Виллард Шульц, историк Цзинь Кэ, художник Леонардо да Винчи (вторая половина XV века) и др.

В октябре 1964 г. Технический комитет при Институте стали и чугуна и группа специалистов по износу и смазке машин при Институте инженеров-механиков Великобритании организовали конференцию в Кардиффе для анализа триботехнических проблем. После доклада профессора Питера Джоста 9 марта 1966 г. науку о трении начали называть «трибология» («трибос» – трение; «логос» – наука /греч./). В первой половине XX века начали появляться первые профессиональные объединения: Американское общество инженеров-смазчиков (American Society of Lubrication Engineers, 1944 г.). В нашей стране Научный совет по трению и смазкам Академии наук начал работать с 1960 г.

Обычно рассматривается в совокупности следующая триада (или по частям, связанным с трением): 1 – взаимодействие поверхностей с учётом влияния среды; 2 – изменение поверхностных слоёв в результате их взаимодействия; 3 – разрушение поверхностей.

Внешнее трение – сопротивление относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зоне их соприкосновения по касательной к ним. Непременным следствием процесса трения

является износ, то есть постепенное изменение размеров и формы сопряжённых тел. При этом происходит нагрев поверхностей с образованием или разрушением поверхностных плёнок.

Проблемами трибологии занимаются учёные во многих странах мира, что подтверждается многочисленными статьями/публикациями с изданием специализированных журналов и книг: например, «Трение и износ», «Эффект безызносности и триботехнологии», “Wear”, “Tribology International”, “Journal of Engineering Tribology”, “Tribology Transactions”, “Journal of lubrication technology” и др. [1–10].

Получение огня примитивными способами ещё на заре человечества осуществлялось за счёт трения путём сверления, выскабливания, высекания, то есть преобразованием работы трения в теплоту. Шедевром античной технической мысли было использование трения качения по сравнению с трением скольжения при транспортировке гигантских колонн храма Артемиды Эфесской в VI веке до н.э. Найдено древнее изображение транспортировки на лыжах статуи для гробницы Ти (2400 г. до н.э.), причём показано, что под полозья льют жидкость (воду или масло). В другой фреске изображено перетаскивание статуи массой 60 т на деревянных санях. Нарисованы 172 человека, которые тянут статую. Если положить коэффициент трения f для дерева со смазкой равным 0,16, то по закону Амонтона сила трения $F = fP$, где P – нагрузка (масса статуи, равная 60 т). Следовательно, если считать, что человек средней физической силы создаёт усилие в 54 кг, то можно определить количество людей, необходимое для перетаскивания такой статуи: $0,16 \cdot 60000/54 = 179$ человек. Следы смазочного материала были найдены на оси колесницы (1400 г. до н.э.). По мнению учёных, смазкой могли быть составы растительного, животного и нефтяного происхождения, а также и просто в виде сока после сдирания коры со стволов, подкладываемых под транспортируемые тяжёлые предметы.

Архимед, Аристотель, Марк Витрувий, Галилей, Плиний Старший, Кардано и многие другие изучали и применяли в своей практике некоторые законы трибологии. Например, итальянец Леонардо да Винчи заметил, что для перетаскивания корабельного каната, лежащего на земле или скатанного в бухту, требуется примерно одно и то же усилие. Поэтому им был сделан вывод, что сила трения не зависит от площади контакта трущихся тел. Кроме

того, он установил, что для достаточно гладких тел трение не зависит от номинальной площади контакта. По мнению учёного, тяжёлое тело, движущееся без качения (причём трущаяся поверхность гладкая), будет иметь силу трения, равную $\frac{1}{4}$ своей тяжести. Таким образом, Леонардо впервые после Архимеда представил количественное исследование явления, опередив на два века открытие основных законов трения: пропорциональности силы трения нормальной нагрузке и независимости её от номинальной площади контакта. Наконец, он же предложил состав смазки, состоящей из трёх частей меди и семи частей олова (антифрикционный рецепт), обогнав на много лет работы Р. Гука (который, среди прочего, предложил антифрикционный сплав для подшипников скольжения с составом из меди и олова, но последнее во много раз большей концентрации, чем используется в бронзах), Л. Альберти, А. Баббита. Последний, в частности, в 1839 г. предложил легкоплавкий антифрикционный сплав на основе олова (82...84 % Sn – олово, 5...6 % Cu – медь, 11...12 % Sb – сурьма).

Французский архитектор и физик Гильом Амонтон провёл опыты, в результате которых установил, что сила трения зависит от приложенной нагрузки и не зависит от площади пар трения. Этот вывод несколько позднее перепроверил и подтвердил другой учёный – Филипп де ля Гир.

В итоге проведённых экспериментов Амонтон установил следующее:

1) сила трения F пропорциональна нагрузке N ($F = fN$) при коэффициенте трения f ; при постоянной нагрузке сила трения не зависит от площади касания трущихся поверхностей;

2) при трении смазанных поверхностей железа, кожи, свинца и дерева сила трения примерно одинаковая;

3) сила трения составляет приблизительно $\frac{1}{3}$ от нормальной нагрузки (то есть $F = (\frac{1}{3}) N$ или $f \approx \frac{1}{3}$);

4) сила трения находится в сложной зависимости от нормального давления, времени и скорости скольжения.

Многие учёные и практики, пожалуй, основную причину трения видели в шероховатости поверхностей. Если неровности жёсткие, то трение происходит по их уклонам (подъём–спуск). Если материал достаточно пластичен, то неровности сминаются движущимся телом, что требует такое же по величине прикладываемое усилие.

В 1704 г. француз Антуан Паран в своём докладе и в научных трудах показал, что реакция поверхности с учётом трения отклонена от нормали к ней на некоторый угол.

Наибольшее значение этого угла теперь называют углом трения (им он был назван как угол равновесия). Тангенс этого угла равен коэффициенту трения, то есть $\operatorname{tg} \varphi = f$ (рис. 1). Условие равновесия тела на плоскости под действием внешней силы Q требует, чтобы эта сила проходила внутри или по поверхности конуса, имеющего своей осью нормаль к поверхности в точке пересечения линии силы с поверхностью; угол φ между осью и образующей равен углу трения.

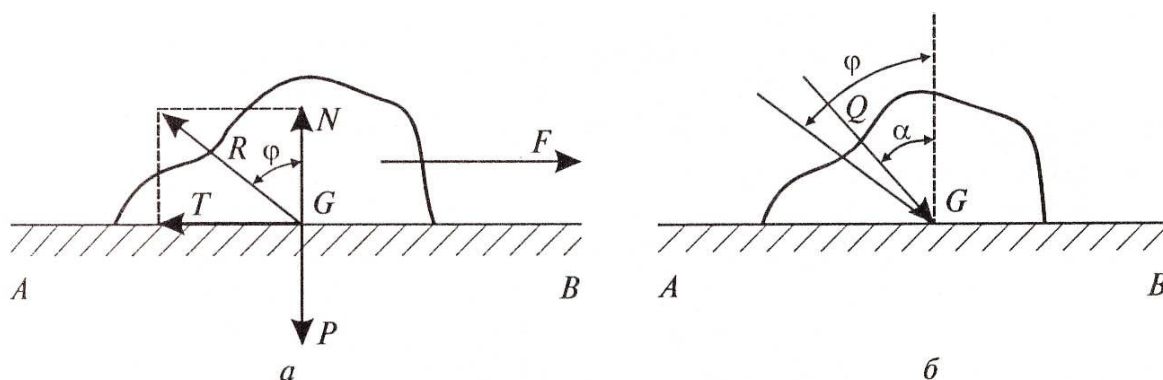


Рис. 1. Движение тела по плоскости А–В (а) и равновесие при наличии трения (б):

T – сила трения; G – масса тела; P – нагрузка на плоскость А–В;
 N – нормальная реакция поверхности;
 R – результирующая; F – движущая сила

Джон Теофил Дезагюлье установил, что на процесс трения оказывает влияние адгезия (прилипчивость) контактирующих тел. В частности, при плотном сжатии свинцовых шаров получалось прочное соединение. Аналогично было установлено, что для отполированных поверхностей трение увеличивается из-за их чрезмерного сближения и адгезионного схватывания. Кроме того, одноимённые поверхности обладают большим трением, чем сделанные из разных материалов.

Янош Андрош Сегнер (1704–1777) ввёл понятие о трении покоя и трении движения. Российский академик швейцарец математик Леонард Эйлер вывел уравнение для расчёта коэффициента трения

при равноускоренном (равнозамедленном) проскальзывании тела с наклонной плоскости:

$$f = \operatorname{tg} (2S/(gt^2 \cdot \cos\alpha)),$$

где g – ускорение свободного падения; S – путь, проходимый телом по наклонной плоскости за время t .

Петербургский академик С.К. Котельников в 1774 г. выпустил книгу о равновесии и движении тел, одна из глав которой называлась «О трении в машинах». Новым в его работе было представление о диссипации энергии при трении. Кстати, гранитный постамент массой 2500 т из Финляндии в Петербург для памятника Петру I был доставлен технически грамотно инженерами России на шарах, катящихся по желобам. Повороты осуществлялись на круге в виде огромного шарикового подшипника.

Французский инженер Шарль Кулон (1736–1806) представил (среди прочих исследований) работу «Теория простых машин», которая была удостоена двойной премии Академии. В первой части речь шла о трении скользящих плоских поверхностей, а во второй – о жёсткости канатов и трении вращающихся деталей. Кулон на деревянном столе (длина почти 2,5 м) исследовал трение как гладких, так и шероховатых поверхностей, воспроизводил разное давление (от 0,1 до 3000 Па) и скорости движения; учитывал время пролёживания (неподвижного контакта) тела по отношению к контртелу (до четырёх суток). Испытания проводил с разной смазкой, с водой, жиром, оливковым маслом, тавотом, сажой. Результаты таковы: в основном трение почти пропорционально нагрузке и мало зависит от размера контактирующих поверхностей. Кулон всё же понял, что одна составляющая силы трения не зависит от нагрузки, что определяется сцеплённостью по площадкам касания, а вторая зависит от нагрузки, связанная с зацепляемостью неровностей между собой и не зависит от площади касания (согласно закону Амонтона). Математически это записывается двучленной формулой вида

$$F = A + P/\mu,$$

где F – сила трения; A – составляющая, характеризующая сцеплённость поверхностей; P – нагрузка; μ – величина, обратная коэффициенту трения (безразмерной величине).

Известному учёному Кулону удалось получить следующее уравнение для расчёта силы F сопротивления перекачиванию/ качению:

$$F = \lambda N/R,$$

где N – нагрузка; R – радиус катка; λ – коэффициент, имеющий размерность длины. Коэффициент трения качения – размерная величина (см).

Учёный Янош Сегнер различал силу трения первого рода, когда одни и те же точки движущегося тела соприкасаются с разными точками покоящегося тела, а также трение второго рода, когда различные точки движущегося тела соприкасаются с различными точками покоящегося тела. Он отмечал, что трение первого рода больше, чем трение второго рода.

Английский профессор Эдинбургского университета Джон Лесли (1766–1832) пытался доказать связь между работой трения и выделяющейся теплотой, то есть впервые оценить механический эквивалент теплоты. Он же выдвинул идею о расклинивающем действии смазки при наличии микротрещин. Другой английский учёный Ренни также изучал трение. Его опытная установка имела стол с образцами, который можно было наклонять под разными углами. А вот некоторые данные о значениях коэффициентов трения, которые получил этот учёный: сталь–лёд – 0,014; лёд–сталь – 0,028; твёрдое дерево–твёрдое дерево – 0,129; латунь–мягкое железо – 0,135; латунь–чугун – 0,140; латунь–сталь – 0,139; чугун–чугун – 0,163; мягкая сталь–мягкое железо – 0,189; кожа–железо – 0,250; шерстяная ткань–шерстяная ткань – 0,435.

Выводы были сделаны такие: сила трения более мягких тел больше, чем более твёрдых; при скольжении разноимённых тел друг по другу сила трения зависит от истирания более мягкого тела; при наличии разделяющей тела смазки сила трения зависит от характеристик смазочного материала; для волокнистых тел сила трения растёт с увеличением площади и продолжительности контакта и уменьшается с увеличением давления и скорости.

Здесь мы отметим, что коэффициент трения – весьма непостоянная величина, что может приводить к неверным выводам при выполнении соответствующих расчётов, если этот коэффициент брать константой. Это будет пояснено на нескольких примерах далее.

Отечественный учёный Н.П. Петров выполнил очень важные работы по гидродинамической теории смазки для подшипников скольжения (1883 г.). Его знаменитая формула для силы трения для подшипника (вал–втулка) со смазкой такая:

$$F = (\eta \cdot v \cdot S) / (h + \eta/f_1 + \eta/f_2),$$

где F – сила трения; η – динамическая (абсолютная) вязкость смазочной жидкости; v – скорость скольжения; S – площадь поверхности скольжения (сдвига); h – толщина зазора между валом и втулкой (шипом и подшипником); f_1 и f_2 – коэффициенты внешнего трения жидкости о вал и подшипник соответственно. Если коэффициенты столь велики, что величина $h \gg (\eta/f_1 + \eta/f_2)$, тогда $F = \eta(vS/h)$, или коэффициент трения $f = \eta v / (hP)$, где P – удельная нагрузка.

Сопротивление относительно перемещению твёрдых тел происходит как за счёт деформирования поверхностных слоёв, так и за счёт адгезии твёрдых тел в результате их межмолекулярного взаимодействия. Согласно молекулярной теории трения Б.В. Дерягина, сопротивление перемещению одного тела по гладкой поверхности другого определяется как подъёмом этого тела по молекулярным выступам, так и адгезией контактирующих тел. Первая составляющая силы трения зависит от нагрузки (чем она больше, тем труднее телу подняться на высоту молекулярной шероховатости); вторая зависит от фактической площади контакта (чем большая площадь «прилипает» к другой, тем большее требуется усилие для перемещения), то есть:

$$F = f(N + A_r p_0),$$

где p_0 – удельная сила молекулярного притяжения на единицу площади фактического контакта (не следует путать с геометрической площадью номинального контакта, которая обычно на несколько порядков больше). При большом деформировании площадь фактического контакта будет практически равна 100%. Выполненные опыты показали следующее (рис. 2).

Истинное значение коэффициента трения можно определить как тангенс угла α наклона прямой. В установившемся режиме трения (после приработки) шероховатость поверхности трансфор-

мируется в некоторую весьма кратковременную равновесную шероховатость (термин предложен И.В. Крагельским).

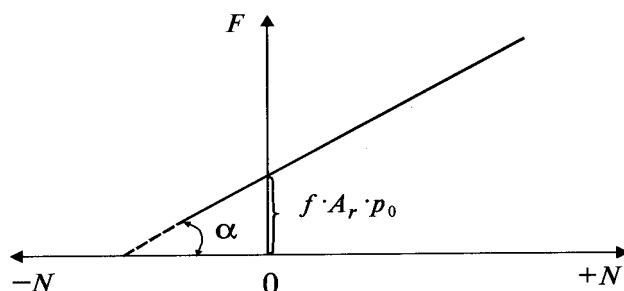


Рис. 2. Зависимость силы трения F от нагрузки N (по Б.В. Дерягину) при независимости фактической площади контакта от нагрузки

В общем случае сила трения движения

$$F = (1/v) dA/dt,$$

где v – скорость относительного перемещения сопряжённых поверхностей трения; dA/dt – мощность фрикционных потерь, связанных с механическими (деформирование, адгезионное взаимодействие), физическими (адсорбция, звуковые, электромагнитные и др.), химическими (хемосорбция, химическое модифицирование поверхностного слоя), диссипативными процессами; A – работа трения, то есть энергия диссипации.

При трении в вакууме из-за затруднительного образования защитных адсорбционных слоёв обычно возникает более сильное трение.

Материалы относят к антифрикционным, если коэффициент трения $f = 0,12 \dots 0,15$ без смазки и $0,10 \dots 0,05$ при смазке, которые используются в опорах скольжения; к фрикционным с $f = 0,30 \dots 0,60$, используемым во фрикционных устройствах типа тормозов, муфт с передачей момента трением. Значение коэффициента трения скольжения f определяется суммой адгезионной f_a и деформационной f_d составляющих, то есть $f = f_a + f_d$. Соотношение между адгезионной и деформационной составляющими для металлов таково, что с погрешностью 1% иногда значением f_d можно пренебречь. Прочность адгезионной связи определяется выражением

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r,$$

где p_r – фактическое давление, представляющее собой частное от деления нагрузки P на суммарную площадь пятен фактического дискретного фрикционного контакта, воспринимающих нагрузку; τ_0 и β – параметры, характеризующие свойства материала поверхностных слоёв.

Откуда

$$f_a = \tau / p_r = \tau_0 / p_r + \beta.$$

Параметры τ_0 и β определяют вдавливанием образца сферической формы из твёрдого материала по нормали к поверхности плоского контробразца с силой, вызывающей пластическую деформацию последнего. Далее приводят образец во вращение. Затем измеряют моменты сил трения, разгружают образцы и измеряют размеры отпечатка на контртеле. Наконец, повторяют испытание с нагрузкой на два порядка меньше.

На рис. 3 показан пример возможного контактирования двух тел – тела и контртела.

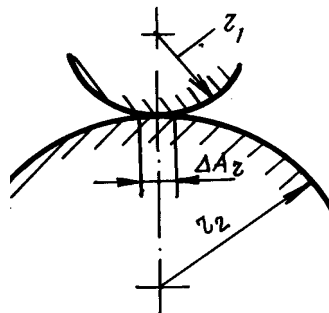


Рис. 3. Пример контактирования упругих тел

Касание твёрдых тел между собой всегда происходит в отдельных пятнах. Даже для весьма тщательно отполированной оптической поверхности высота выступов бывает не менее 100 \AA (ангстрем 10^{-10} м). С ростом давления площадь касания возрастает. Диаметры микроскопических выступов изменяются от долей микрона до 50 мкм при высоте до 80 мкм. Фактическая площадь касания A_r представляет собой сумму реально малых фактических площадок контакта тел. Если считать, что формы выступов близки к сфере, то для расчёта упругой деформации применимы формулы Герца. В частности, при нагрузках на контактах P_i площадь контакта ΔA_r и деформация a будут равны:

$$\Delta A_r = 2.6 \left(\frac{r P_i}{E_3} \right)^{2/3};$$

$$a = \frac{0.825}{r^{1/3}} \left(\frac{P_i}{E_3} \right)^{2/3},$$

где E_3 – эффективный модуль упругости, определяемый из равенства

$$\frac{1}{E_3} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2},$$

r – приведённый радиус,

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2},$$

причём $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2, r_1, r_2$ – модули упругости, коэффициенты Пуассона и радиусы вершин для первой и второй сфер поверхностей (см. рис. 3).

Напомним также, что коэффициент Пуассона есть отношение поперечного сжатия к продольному растяжению и находится в пределах от 0 до 0,5. При пластической деформации $\Delta A_r = P_i / \text{НВ}$, где НВ – твёрдость материала. Но так как $\Delta A_r = 2\pi r a$, то $a = P_i / 2\pi r \text{НВ}$.

На рис. 4 и 5 показаны варианты внедрения жёсткого тела в контртело. Расчёты показывают, что при пластическом контакте площадь сечения ΔA_p примерно равна площади контакта ΔA_{ri} , а при упругом – $\Delta A_r = 0,5\Delta A_p$. В общем случае $\Delta A_{ri} = \alpha \Delta A_p$; при упругом контакте $\alpha = 0,5$; при пластическом $\alpha = 1$, а при упругопластическом $0,5 < \alpha < 1$.

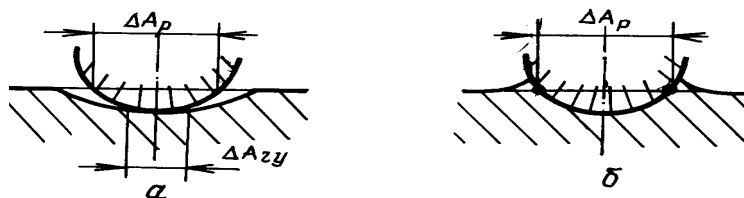


Рис. 4. Внедрение жёсткой сферы в упругое (а) и в пластическое (б) полупространство (обычно вариант а предпочтительнее)

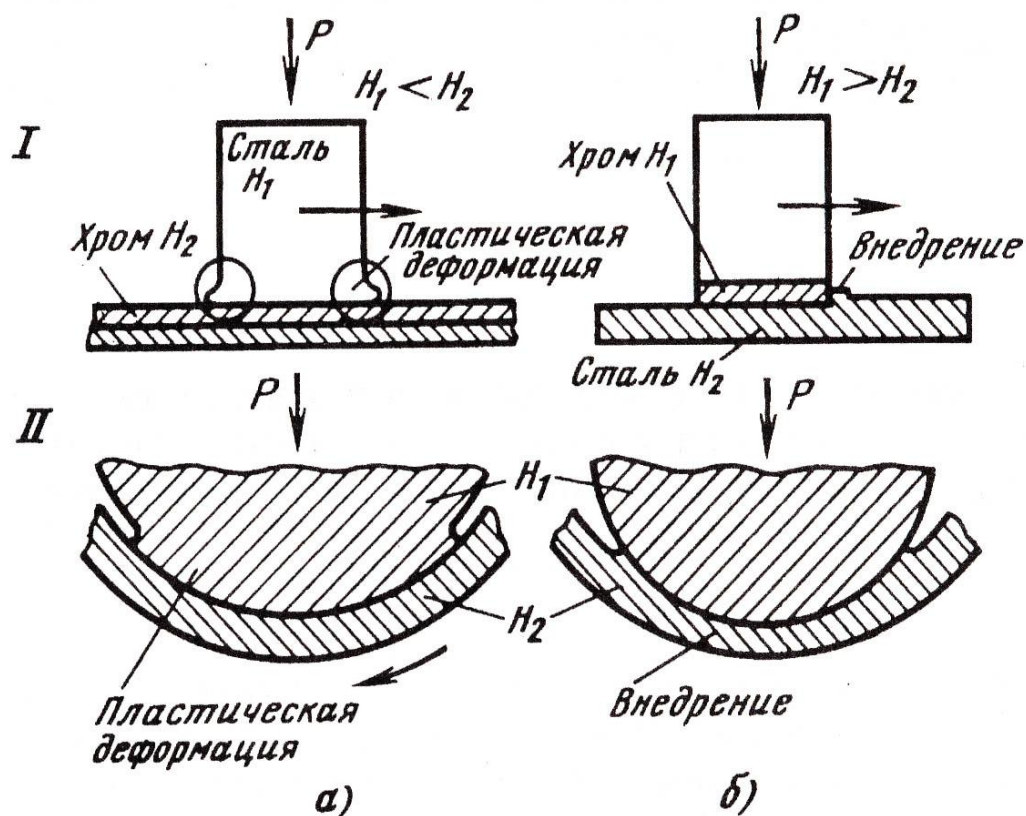


Рис. 5. Схемы обратных (а) и прямых (б) кинематических пар (I – с поступательным и II – с вращательным движением; H_1, H_2 – твёрдость)

Площадки фактического контакта сгруппированы на вершинах деформированных волн в отдельных зонах, образующих контурную площадь контакта (рис. 6).

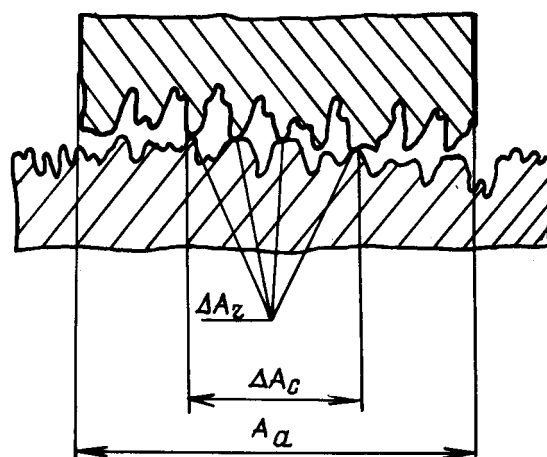


Рис. 6. Схема номинальной A_a , контурной A_c и фактической A_r площадей контакта ($A_c = \Sigma \Delta A_c$ и $A_r = \Sigma \Delta A_r$) при фрикционном контакте тела и контртела

Фактическая площадь контакта от номинальной составляет десятые и сотые доли процента, а контурная – несколько процентов. Величина A_c обычно растёт по мере приработки, или притирки поверхностей.

Под интенсивностью изнашивания понимают отношение значения износа к обусловленному пути трения, на котором происходило изнашивание, или к объёму выполненной работы. При этом различают мгновенную и среднюю интенсивность изнашивания.

По повторяемости использования смазочных материалов, которые широко применяются во многих парах трения, имеется три группы:

– *циркуляционное смазывание*, то есть смазывание, при котором смазочный материал после прохождения зоны трения вновь подаётся в эту область механическим способом;

– *ресурсное смазывание*, являющееся одноразовым и выполняемым перед сборкой и началом работы сопряжения;

– *одноразовое проточное смазывание* – смазывание, при котором смазочный материал периодически или непрерывно подводится к поверхностям трения и не возвращается в смазочную систему.

По способу подачи смазочного материала в зону трения обычно используют следующую классификацию:

1) *смазывание под давлением*, при котором смазочный материал подводится в зону трения под давлением, «стараясь раздвинуть» поверхности трения;

2) *смазывание погружением* – смазывание, при котором поверхность трения частично, постоянно или периодически погружена в ванну с жидким смазочным материалом;

3) *смазывание кольцом* – смазывание, при котором смазочный материал подаётся к поверхностям трения кольцом, увлекаемым во вращение валом (при этом само смазывание может быть реализовано свободным или закреплённым на валу кольцом);

4) *капельное смазывание* – смазывание, при котором смазочный материал подаётся в зону трения в виде капель через равные промежутки времени;

5) *смазывание масляным туманом* – смазывание, при котором смазочный материал подаётся к поверхности трения в виде лёгкого или густого тумана, образуемого путём введения смазочного состава в струю сжатого воздуха или газа;

б) *смазывание набивкой* – смазывание, при котором жидкий смазочный материал подаётся на большом участке поверхности трения с помощью соприкасающегося с ней смазочного материала, обладающего капиллярными свойствами;

7) *фитильное смазывание* – смазывание, при котором жидкий смазочный материал подаётся в зону трения с помощью фитиля;

8) *ротационное смазывание* – смазывание, при котором на поверхность детали наносится твёрдый смазочный материал, отделяющийся от специального смазывающего твёрдого тела, прижимаемого к поверхности;

9) *смазывание твёрдым покрытием* – смазывание, при котором на поверхность трения до начала работы детали наносится смазочный материал в виде твёрдого покрытия.

В свою очередь, *индекс вязкости* есть безразмерная величина, определяемая по установленной шкале и характеризующая изменение вязкости масла в зависимости от температуры; высокий индекс вязкости указывает на сравнительно незначительное изменение вязкости в зависимости от температуры.

Вязкость – сопротивление внутреннему трению, объёмное свойство жидкого, полужидкого или полутвёрдого вещества оказывать сопротивление при течении; вязкость уменьшается с ростом температуры.

Консистенция – свойство пластичных смазочных материалов оказывать сопротивление деформации при внешнем воздействии.

Виды смазочного материала: газообразный, жидкий, масло, пластичный, твёрдый, с присадкой, минеральный, нефтяной, растительный, животный, синтетический.

Присадка – вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или усиления имеющихся.

Депрессорная присадка – вещество, добавляемое к смазочному материалу для придания ему новых свойств или усиления существующих.

Диспергирующая присадка – присадка к жидкому смазочному материалу, повышающая дисперсность нерастворимых загрязнений и стабильность суспензий преимущественно при низких значениях температуры.

РЯД ЧАСТО ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ ТЕРМИНОВ

Трибология – наука о трении и процессах, сопровождающих трение. Охватывает экспериментально-теоретические исследования физических, химических, биологических и других явлений, связанных с трением.

Триботехника – практическое приложение знаний по трибологии при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации трибосистем (узлов трения машин, приборов, аппаратов и инструментов в технологических производствах).

«Трибос» – трение, «логос» – наука (греч.).

Материалы триботехнические – конструкционные и смазочные.

Усталостная – энергетическая теория изнашивания.

Триада И.В. Крагельского – взаимодействие поверхностей с учётом влияния среды, изменение поверхностных слоёв (как результат) и разрушение поверхностей (как итог).

Адгезионная (молекулярная) – составляющая силы трения. Об уровне адгезии судят по силе отрыва одного тела от другого или по **удельной адгезии** как отношению силы отрыва к площади отрыва (*адгезионного шва*). Термодинамической характеристикой адгезии является убыль свободной энергии на 1 см^2 поверхности адгезионного шва в изотермическом обратимом процессе.

Предельные значения адгезии наблюдаются при горячей сварке, пайке, лужении, склеивании поверхностей и при соприкосновении ювенильно чистых твёрдых тел в пластическом и эластичном состояниях, а также при образовании новой твёрдой фазы на поверхностях контакта, когда область реального контакта резко возрастает, а имеющиеся поверхностные слои десорбируются. Если разлом (разрыв) происходит по границе раздела между телами, то была адгезионная связь.

Когезия (сцепление) происходит у одинаковых полностью соприкасающихся тел. Она характеризует прочность тел, их силу сцепления между молекулами, атомами или ионами вещества в теле. Если разлом (разрушение) идёт по объёму одного из тел – это разрыв *когезионной связи* (в этом случае адгезионная связь прочнее когезионной связи более слабого материала; пример когезионного разрушения – задиры и питтинговые повреждения пар трения).

Входные основные факторы трибологического процесса: природа пар трения; исходная шероховатость и волнистость тел;

промежуточная и окружающая среда; нагрузка; скорость (скольжения, качения, верчения); исходная температура.

Выходные факторы трибопроцесса – сила (или момент трения); интенсивность износа (линейная или массовая).

Внутренние факторы, создающиеся при трении: изменения свойств поверхностных слоёв тел и плёнок, шероховатости и волнистости поверхности, температуры на микро- и макроуровне, а также разрушение поверхностей в зоне трения (износ).

Трибологический процесс – трение и износ деталей, которые вызваны трением.

Однофазная система – состоит из однофазных деталей и является однородной. **Многофазные системы** – неоднородны.

Изолированная система не обменивается с однородной средой массой или энергией, это замкнутая система.

Коэффициент трения и интенсивность изнашивания – нелинейные функции свойств материалов *пары* трения, конструктивного исполнения узла трения и режима работы, включая влияние окружающей среды.

Структурные частицы – атомы, ионы, молекулы – имеют различные по знакам электрические заряды; это не зависит от природы их взаимодействия (ионной, ковалентной, металлической или молекулярной связи).

Силы отталкивания между структурными частицами резко возрастают, когда расстояние между ними становится менее 1–2 размеров диаметра; иначе возникают **силы притяжения**.

Минимум потенциальной энергии у структурных частиц, когда силы притяжения и отталкивания равны.

Кинетическая энергия структурных частиц связана с их температурой, повышающейся при трении поверхностей деталей.

Для твердых тел минимум потенциальной энергии существенно больше величины кинетической энергии ($E_{\text{пот}} \gg E_{\text{кин}}$).

Для жидких тел потенциальная и кинетическая энергии примерно равны, и частицы совершают значительные колебания.

Для газообразных тел кинетическая энергия отталкивающихся друг от друга частиц много меньше потенциальной ($E_{\text{кин}} \ll E_{\text{пот}}$).

Энергии разрыва для разных видов связи (Эв): ионная 9,0–7,5; ковалентная 6,5–5,5; металлическая 3–2; Ван-дер-ваальсовая 0,1.

Хотя последние силы слабее предыдущих (перечисленных), они имеют значительную величину на довольно больших расстояниях (до 1 мкм) и влияют на адсорбцию, смачивание поверхностей, адгезию, формирование поверхностных слоев, устойчивость коллоидов и др.

Твёрдые тела бывают *кристаллические и аморфные*. Первые имеют единую кристаллическую решётку вещества (*монокристалл*) с определёнными расстояниями и силами взаимодействия.

Элементарная (кристаллографическая) ячейка – наименьший элемент кристалла, например: *гранецентрированная кубическая (ГЦК), объёмно-центрированная кубическая (ОЦК), гексагональная плотноупакованная (ГПУ)*. **ОЦК:** Li, Na, K, V, Mo, W, **альфа-Cr**, **альфа-Fe**. **ГЦК:** Cu, Ag (серебро), Au (золото), Al, Th (торий), Pb (свинец), Ni, Pd (палладий), Pt (платина), **гамма-Fe**, **альфа-Co**. **ГПУ:** Be (бериллий), Mg, Zn, Cd (кадмий), Tl (таллий), Ti, Zr (цирконий), Hf (гафний), Rn (радон), Os (осмий).

Анизотропия – неоднородные свойства в разных направлениях кристаллов [постоянная решетки $b < c < a$, где c – длина, a – ширина]; (противоположное – **изотропия**). Эффект анизотропии для модуля упругости Юнга монокристалла меди в трёх пространственных направлениях разный (6,67; 13,1 и 19,1)·10⁴ МПа, что даёт разные по силе плоскости скольжения.

Поликристалл образуется при произвольной ориентации сросшихся монокристаллов неопределённой формы (*кристаллитов*) с размерами частиц от 1 до 0,001 см. Примером почти полностью кристаллического полимера является фторопласт (политетрафторэтилен), обладающий антифрикционными свойствами.

Аморфные тела сохраняют взаимную ориентацию только между ближайшими частицами, межатомные связи действуют на малых расстояниях; в целом они напоминают жидкость, но имеют меньшие межатомные расстояния и подвижность атомов. Аморфные тела изотропны (однородны), например: стекло, смолы, многие полимеры. Их внутренняя энергия, энтропия и удельный объём из-за не скомпенсированных связей больше по сравнению с такой же массой кристаллических тел. Полиэтилен, поливинилхлорид, полифторэтилен, полистирол и другие подобные пластмассы относятся к термопластичным (с повышением температуры они размягчаются и ведут себя как аморфные вещества).

Часто кристаллическое состояние металлов термодинамически неустойчиво и стремится перейти в более устойчивое **аморфное (ионное)** состояние.

Энтропия – термодинамическая функция состояния системы, характеризующая «порядок или беспорядок» внутри неё, обладает экстенсивными свойствами, то есть зависит от массы системы, имеет ту же размерность, что и теплоёмкость (Дж/моль·К).

Поверхностные (двухмерные) неоднородности – поверхностные микротрещины представляют собой поверхность границ зёрен и дефекты упаковки.

Объёмные (трёхмерные) неоднородности представляют собой межкристаллические области, внутренние поры и трещины, поверхности вблизи всевозможных включений и др.

Избыточная свободная энергия, а отнесённая к единице поверхности – **удельная поверхностная энергия**, есть у частиц поверхностного слоя из-за не скомпенсированных молекулярных сил. Наибольшая плотность свободной поверхностной энергии наблюдается во впадинах поверхностного слоя твёрдых тел.

Энергия сублимации – энергия, необходимая для перевода вещества из твердого в газообразное состояние, то есть разделения его на независимые атомы. Свободная поверхностная энергия (Дж/м²) примерно равна 1/6 энергии сублимации и составляет для Cu – 1,1; для Zn – 0,6; альфа-Fe – 1,5; Si – 1,23; Al – 0,5–0,9; Au – 1,12; N – 0,206; P (фосфор) – 1,8.

Полимеры состоят из гигантских молекул, объединяющих небольшие группы атомов (чаще всего углерода и водорода – ковалентная связь). Между макромолекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса. Примером линейного полимера является дерево (целлюлоза). Термореактивные полимеры имеют пространственную сетчатую структуру с основой из фенолформальдегидных, эпоксидных, полиэфирных и других смол, выдерживая температуру до +400 °С. Полимеры из-за плохой теплопроводности и электропроводности при трении сильно нагреваются и электризуются.

Диффузия (для газов) – явление, связанное с постепенным распространением в газе массы примесных молекул.

Вязкость газа – внутреннее трение молекул при ламинарном течении, связана с сопротивлением относительно смещению слоев газа (жидкости). Явление наблюдается, например, при плоскопа-

параллельном относительном смещении гладких твёрдых тел, удалённых друг от друга на некоторое расстояние в среде газа (жидкости). Сила внутреннего трения, возникающая в газе, по закону И. Ньютона (1687 г.) прямо пропорциональна (со знаком минус) коэффициенту внутреннего трения (или динамической вязкости системы) и градиенту скорости ($\Delta v / \Delta x$).

Жидкости занимают промежуточное положение между газами и твёрдыми телами. Диффузионные процессы идут в них медленнее, чем в газах, а вязкость значительно выше, так как молекулы располагаются в них ближе друг к другу.

Силы поверхностного натяжения жидкости стремятся втянуть молекулы из поверхностного слоя внутрь жидкости, создавая форму с минимумом свободной поверхности.

Аэрозоли – твёрдые и жидкие частицы, находящиеся в газе.

Гидрозоли – жидкости, содержащие в устойчивом взвешенном состоянии твёрдые частицы и нерастворимые в них капли других жидкостей (например, смазочные материалы).

Для повышения устойчивости аэрозолей и гидрозолей используют покрытия поверхности частиц, например поверхностно-активными веществами (ПАВ), уменьшающими межмолекулярное взаимодействие между частицами, или за счёт повышения температуры, приводящей к росту кинетической энергии частиц, или повышения плотности дисперсионной среды. (Вместе *суспензии* и *эмульсии* называют гидрозолями.)

Дисперсные частицы – твёрдые частицы и капли жидкости, а среда, в которой они находятся (газ и жидкость), – **дисперсионная среда (фаза)**. Вязкость дисперсионной (*коллоидной*) среды определяется в зависимости от вязкости дисперсной среды, а коэффициент диффузии обратно пропорционален размеру диффундирующих молекул или частиц. Скорость диффузии в коллоидных системах в сотни тысяч раз меньше, чем диффузия молекул в жидкостях или газах.

Диспергирование – разрыхление (разрушение и отделение) вещества пограничного слоя при пластическом деформировании.

Коагуляция (слипание) частиц – их укрупнение под действием имеющихся молекулярных сил.

Седиментация – процесс оседания (расслоения) дисперсионной среды, наблюдается чаще в системах с размерами частиц менее 1 мкм.

Температурные вспышки появляются в зоне механической обработки материалов или в точках контакта перемещающихся поверхностей, что нередко приводит к ионизации водородсодержащих материалов (воды и смазочных материалов) в зонах трения. Ионы водорода проникают в металл, концентрируются вблизи дефектов структуры в 2–3 раза больше (чем обычно), что создаёт процесс молизации с резким увеличением объёма газа, а следовательно, и давления в наиболее слабых элементах кристаллической решётки. Это ведёт к образованию и развитию подповерхностных трещин с охрупчиванием структуры.

Суспензии – жидкости, содержащие в себе во взвешенном состоянии твёрдые частицы; жидкости, содержащие несмешивающиеся с основной жидкостью мелкие капельки другой, – **эмульсии**.

Сорбция – процесс поглощения инородных атомов и молекул жидкими и твёрдыми веществами. Она включает в себя процесс **адсорбции**, происходящий на границе раздела фаз (твёрдое тело–газ, твёрдое тело–жидкость и жидкость–газ). Различают два вида адсорбции: *физическую* – обратимую, обусловленную действием сил Ван-дер-Ваальса, и *хемосорбцию* – необратимую и обусловленную появлением больших по величине химических связей (*валентных сил*). Теплота *физической* адсорбции близка к 4–24 кДж/моль для простых молекул и 40–80 кДж/моль для больших молекул. При *хемосорбции* она составляет 40–400 кДж/моль. *Адсорбционные* свойства поверхности разные, что создаёт разную по величине удельную поверхностную энергию твёрдого тела (**гетерогенную**). Микродефекты поверхности имеют большую способность к адсорбированию, чем гладкие участки.

Мономолекулярная адсорбция – адсорбционный слой на поверхности адсорбента в одну молекулу; в две и более молекул – **полимолекулярная адсорбция**.

Адсорбент – вещество, на поверхности которого происходит адсорбция; поглощённое из прилегающего объёма жидкости или газа вещество – **адсорбат**. Поверхность адсорбента постепенно покрывается адсорбционным слоем молекул адсорбата. При этом уменьшается свободная поверхностная энергия с выделением теплоты адсорбции.

Десорбция – процесс, обратный адсорбции, образующийся с подводом извне энергии, пропорциональной теплоте адсорбции.

Адсорбционный процесс на поверхности раздела идёт с большой скоростью, измеряемой долями секунды, а в пористых телах он завершается за 1 мин. Скорость процесса хемосорбции колеблется в широких пределах и определяется как скоростью протекания химической реакции, так и диффузией вещества через окисленный слой.

Для твёрдых тел (жидкостей) свойственна и внутренняя *сорбция* (атомов, ионов, молекул), протекающая на внутренних поверхностях твёрдых тел (на границах зёрен и дефектах структуры, обладающих свободной поверхностной энергией).

Абсорбция – процесс внутреннего поглощения веществ в газах, жидкостях и твёрдых телах.

Абсорбат – жидкость или твёрдое тело, поглощающие газ или растворённое вещество. Процесс обусловлен как диффузией абсорбатов в абсорбентах, так и процессами их растворения.

Трибомутация – абсорбционные процессы, перераспределяющие отдельные элементы вблизи поверхности трения и связанные с изменениями температур, свойствами материалов и режимами нагружения в зоне трения.

Явление переноса – ситуация, когда, двигаясь хаотично, молекулы газа переходят из одних точек пространства в другие, перенося присущую им массу, энергию и количество движения.

Угол смачивания определяется как угол между касательной к поверхности жидкости в точке касания её с твёрдым телом и поверхностью твёрдого тела, проведённой через слой жидкости. При этом, если этот угол меньше 90° , то считается, что поверхность твёрдого тела **гидрофильная** (*хорошо смачиваемая*), а при углах, больших 90° , – поверхность **гидрофобная** (*плохо смачиваемая*). При *малых* углах смачивания в **капиллярах** (с гидрофильной поверхностью) образуются *вогнутые мениски*, под которыми в жидкости создаётся отрицательное (меньшее) избыточное давление. С увеличением коэффициента поверхностного натяжения и уменьшением радиуса капилляра, плотности жидкости и угла смачивания высота подъёма столба жидкости возрастает, что используется при фитильном подводе смазки в зоне трения. Изогнутые мениски жидкости с мелкими частицами износа (и даже пылью) создают очень большие давления на поверхностях твёрдых тел и значительно увеличивают коэффициент трения. Но при *гидрофобных* внутренних поверхностях

капилляров мениск жидкости будет создавать избыточное положительное давление, препятствующее продвижению жидкости.

Коррозия металлов – процесс самопроизвольного разрушения металлических материалов из-за физико-химического взаимодействия их с окружающей средой (в основном в результате окисления).

Неровности поверхностей деталей разделяются на *шероховатости*, *волнистости* и *макроотклонения формы*. К *макроотклонениям* относят единичные, регулярно не повторяющиеся отклонения поверхности от номинальной формы (выпуклость, вогнутость, конусность и другие).

Волнистость – совокупность периодических, регулярно повторяющихся, близких по размерам выступов и впадин, расстояние между которыми – **шаг волны** S_v – значительно больше их высоты H_v ($S_v/H_v > 40$). *Наибольшая высота волн* – расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины волнограммы, которая должна иметь не менее пяти волн; *средний шаг волн* – среднее арифметическое расстояние между вершинами волн в пределах базовой длины l_v (значение l_v больше или равно $5 S_v$); *средний радиус кривизны вершин волн* – среднее значение кривизны волн в пределах базовой длины.

Шероховатость поверхности – совокупность неровностей с относительно малым шагом (2–800 мкм) и высотой 0,03–400 мкм. Параметры шероховатости определяются в результате снятия и обработки профилограмм с выбором не менее пяти участков поверхности. Рекомендуется снимать как поперечные, так и продольные профилограммы.

Дополнительные характеристики шероховатости

Наибольшая высота выступа (*глубина сглаживания*) R_p – расстояние между линией выступов и средней линией профиля; **средний радиус кривизны вершин выступов** – среднее значение кривизны выступов вершин, определённое для пяти наиболее высоких выступов в пределах базовой длины; **средний угол наклона неровностей профиля** – средний угол наклона боковых сторон неровностей профиля к средней линии в пределах базовой длины; **параметры опорной кривой** – два параметра степенной аппроксимации начальной части опорной кривой (от вершины до средней

линии), построенной в относительных величинах, зависящие от вида обработки.

Базовая длина l – длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, и для количественного определения её параметров.

Средняя линия – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведённая так, что в пределах базовой длины среднее квадратичное отклонение профиля от этой линии минимально.

Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

Линия впадин профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.

Кривая опорной поверхности – важная характеристика контакта, характеризующая распределение материала по высоте шероховатого слоя (обычно строится в относительных единицах с разбиванием профилограммы на ряд горизонтальных уровней, параллельных средней линии, которые затем суммируются).

Субшероховатость – шероховатость второго порядка, имеющаяся на поверхности самих выступов; находится в пределах 0,001–0,01 мкм.

Общий трибологический закон для силы сопротивления трения двух сопряжённых перемещающихся тел имеет вид суммы адгезионного и когезионного сопротивлений: $F_T = F_a + F_k$.

Статическое трение – трение в момент страгивания одного тела с поверхности другого.

Кинетическое трение – трение в процессе движения тел.

Внутреннее трение – трение элементов структуры тела (атомов, молекул) друг относительно друга, которое может быть в жидкостях, газах и твёрдых телах. При внутреннем трении жидкости адгезионная составляющая близка к нулю, а при внешнем трении идеально гладких поверхностей когезионный компонент был бы равен нулю.

Механическая теория трения учитывает в основном когезионную составляющую.

Молекулярная теория трения основное внимание уделяет адгезионным процессам. *Молекулярно-механическую теорию трения* предложили И.В. Крагельский и учёные Ф. Боуден и Д. Тейбор.

Микросмещением (или *предварительным смещением*) называется расстояние, в пределах которого неполная сила трения покоя / или сила трения покоя/ переходят в силу трения скольжения.

Контактное предварительное смещение – перемещение, обусловленное изменением напряжённо-деформируемого состояния в зоне контакта, вызванное приложением внешней тангенциальной силы.

Объёмное предварительное смещение зависит от величины внешней тангенциальной силы, размеров контактирующих тел и их механических свойств.

Коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$ есть отношение площадей трения трущихся элементов.

Релаксационные автоколебания появляются при рассмотрении колебаний систем, вызванных трением, при режимах движения с длительными остановками поверхностей трения и по форме обычно далеки от гармонических колебаний.

Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твёрдого тела или накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы тела. Количественно изнашивание характеризуется либо *скоростью изнашивания* (отношением значения износа к конкретному интервалу времени, в течение которого он возник), либо *интенсивностью изнашивания* (отношением износа к пути, на котором происходил этот процесс, или к объёму выполненной работы). Различают *мгновенную* (в определённый момент времени) и *среднюю* (за определённый интервал времени) *скорость изнашивания*.

Износ – результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объёма или массы.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания. Есть десять классов износостойкости изделий (от третьего с износостойкостью 10^3-10^4 до двенадцатого с износостойкостью $10^{12}-10^{13}$ (например, у резцов – восьмой класс, для подшипников скольжения – 8–5, цилиндропоршневая группа компрессора – десятый, у автомобиля – двенадцатый-одиннадцатый).

Механическое изнашивание бывает *абразивное, гидроабразивное (газоабразивное), гидроэрозионное (газоэрозионное), кавитационное, усталостное*, при *фреттинге*, при *заедании (схватывании)*. В целом этот тип изнашивания происходит в результате механических воздействий.

При **абразивном изнашивании** процесс износа происходит в основном из-за режущего или царапающего действия твёрдых частиц, находящихся в закреплённом или свободном состоянии.

При **гидроабразивном (газоабразивном) изнашивании** процесс происходит в результате действия твёрдых частиц, взвешенных в жидкости (газе) и перемещающихся относительно изнашивающегося тела.

Гидроэрозионное (газоэрозионное) изнашивание происходит под воздействием движущейся относительно поверхности тела и с ней соприкасающейся жидкой или газовой среды *в отсутствие абразивных частиц*.

Усталостное изнашивание – вид механического изнашивания в результате разрушения при многократном повторном деформировании микрообъёмов материала поверхностного слоя с накоплением в нём повреждений. Типичным представителем здесь является **питтинг**, возникающий при трении качения в шарико- или роликоподшипниках, катках, в опорно-поворотных устройствах и других объектах. Данный вид изнашивания характерен для узлов трения качения с начальным точечным или линейным контактом деталей. Внешне изношенные поверхности имеют вид кратеров с рваными краями и грубой поверхностью. Материал отслаивается по площади во много раз большей, чем площадь контакта в сопряжении.

Кавитационное изнашивание возникает при перемещении потока жидкости относительно поверхности твёрдого тела в случае разрыва сплошности этой жидкости, образования каверн, заполненных паром, с последующим их захлопыванием вблизи поверхности с большой скоростью, что ведёт к усталостному разрушению последней. Захлопывание пузырька происходит при увеличении внешнего давления со скоростью звука. Кавитационные полости (пузырьки) образуются в гидродинамическом потоке из-за появления в нём областей с давлением ниже давления насыщенного пара жидкости. Стали с аустенитной структурой имеют высокую износостойкость при кавитационном изнашивании, что появляется у насосов, лопастей турбин, гребных валов.

Изнашивание при фреттинге происходит при малых многократных колебательных процессах, то есть относительных перемещениях сопряжённых деталей.

Изнашивание при схватывании возникает при локальном соединении твёрдых тел вследствие действия молекулярных сил, последующего глубинного вырывания материала с одной поверхности и переноса его на другую. Процесс идёт при разрыве масляной плёнки, обнажении и взаимодействии ювенильных (однородных чистых) поверхностей с задирами и заеданиями в узлах трения деталей. Для уменьшения вероятности схватывания используют *антифрикционные сплавы* (баббиты, бронзы), легируют материалы, делают химико-термическую обработку (цементацию, азотирование, сульфидирование и др.), наносят на поверхности плёнки мягких материалов (свинца, олова), вводят в сплавы мягкие составляющие или материалы со слоистой структурой (графит, дисульфид молибдена), применяют антифрикционные полимерные покрытия, в пористую основу вводят жидкие или пластические смазочные материалы и многое другое.

Коррозионно-механическое изнашивание бывает *окислительное*, при *фреттинг-коррозии*, *электроэрозионное*. При таком виде изнашивания, кроме механического воздействия, происходит химическое и (или) электрическое взаимодействие материала со средой. **Окислительное изнашивание** – вид *коррозионно-механического изнашивания* при наличии химических реакций материалов с кислородом воздуха или окислительной средой и образованием на поверхностях окисных плёнок, которые могут защищать металл и предотвращать схватывание, сами при этом плёнки истираются и вновь образуются. При трении в условиях смазки металлическая поверхность окисляется кислородом, растворённым в масле. **Изнашивание при фреттинг-коррозии** происходит у соприкасающихся тел при вибрациях с усталостным разрушением поверхностных слоёв материала, их окислением и абразивным воздействием на поверхности продуктов окисления. Здесь происходят механические и электрохимические процессы.

Кривая изнашивания упрощённо характеризует изменение износа в течение наработки (например, за минуты, годы, тысячи километров пробега и др.). Её первый этап – *приработка*, второй этап – *установившаяся* (нормальная) *скорость изнашивания* и третий этап –

форсированное (катастрофическое) изнашивание. Впервые такую форму кривой изнашивания определил отечественный учёный В. Лоренц.

Шаржирование – процесс внедрения абразивного зерна в поверхностный слой мягкого материала с закреплением в нём.

Приработка – процесс стабилизации режимов трения и изнашивания в начальный период работы узла трения. Подбор материалов со свойствами, позволяющими ускорить этот процесс, является сущностью *материаловедческого пути повышения износостойкости*.

Предмет триботехнического материаловедения включает в себя исследование влияния структуры и состава материалов, технологических методов их обработки на износостойкость и синтез новых износостойких материалов для различных пар трения.

Изнашивание при избирательном переносе (условный эффект безызносности) связано с существенным замедлением скорости изнашивания при формировании в процессе трения на поверхности детали плёнок меди. Свойства таких плёнок, названных **сервовитными**, позволяют формироваться «третьему телу» в зоне контакта, где происходит разрыв фрикционных связей. Кроме меди, можно использовать также бронзовый порошок. В контакт пары сталь–бронза эффективно для резкого уменьшения темпа развития износа добавлять спиртоглицериновую смесь.

О НАДЁЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Не переписывая дословно все положения различных ГОСТов, связанные с надёжностью систем, например Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. ГОСТ 27.301–95, г. Минск, 16 с.; Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. ГОСТ 27.002–89, г. Москва, 38 с. и другие, приведём лишь в сокращённой интерпретации те сведения, которые, пожалуй, наиболее часто используются на практике.

Надёжность – комплексное свойство объекта/системы сохранять в заданных пределах значения основных параметров в течение назначенного периода эксплуатации с учётом условий применения, хранения и транспортирования.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять своё исправное/работоспособное состояние в определённый период времени или наработки (работы).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельно допустимого состояния при установленной системе технического обслуживания и/или ремонта.

Ремонтопригодность – свойство объекта в приспособленности к быстрому предупреждению, обнаружению и устранению как причин возможного появления отказов, так и самих отказов при техническом обслуживании техники.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять расчётные значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и/или транспортирования.

Исправное состояние – состояние объекта, при котором он соответствует требованиям нормативно-технической и/или конструкторской документации.

Неисправное состояние – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному требованию нормативно-технической и/или конструкторской документации.

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором все предъявляемые к нему требования сохраняются в установленных пределах технических допусков.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором хотя бы один назначенный для него рабочий параметр выходит за допустимые установленные пределы.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация опасна, недопустима либо восстановлению не подлежит.

Повреждение – событие, приводящее объект в нарушение его исправного состояния при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, состоящее в нарушении работоспособного состояния объекта.

Показатель надёжности – количественная характеристика для одного или нескольких свойств, составляющих надёжность системы. Легко понять, что такой показатель может быть *единичным* или *комплексным*.

Наработка – продолжительность или объём выполненной объектом работы.

Наработка до отказа – наработка от начала эксплуатации объекта до появления первого отказа.

Наработка между отказами – наработка объекта от окончания восстановления после устранения отказа до появления следующего отказа.

Технический ресурс – наработка объекта от начала эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная длительность от начала эксплуатации объекта или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и/или транспортирования объекта, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в назначенных пределах.

Примечание: следующие шесть показателей надёжности часто относят к показателям безотказности.

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в течение заданной наработки отказ объекта не возникнет (один из главных показателей безотказности).

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки системы/объекта до появления первого отказа.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка, при которой отказ не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средняя наработка на отказ T – отношение наработки отремонтированного объекта к математическому ожиданию числа его отказов за этот период наработки:

$$T = \frac{t}{M\{r(t)\}} ;$$

где t – суммарная наработка; $r(t)$ – число отказов, наступивших в течение этой конкретной наработки; $M\{r(t)\}$ – математическое ожидание этого числа.

Если в общем случае средняя наработка на отказ есть функция t , то для стационарных потоков отказов средняя наработка на отказ от t не зависит.

Статистическую оценку средней наработки на отказ вычисляют по следующей формуле:

$$\hat{T} = \frac{t}{r(t)} .$$

Эта формула допускает обобщение на ситуацию, когда объединены данные, относящиеся к группе однотипных объектов, которые работают в статистически однородных условиях. Если поток отказов является стационарным, то в приведённой формуле можно заменить t на сумму наработок всех наблюдаемых объектов и заменить $r(t)$ на суммарное число отказов этих объектов.

В отличие от предыдущей формулы для T здесь $r(t)$ – число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку t .

Комментарий. Поток называется стационарным, если вероятность попадания того или иного числа событий на элементарный участок времени зависит только от длины участка и не зависит от того, где именно на оси t (наработки) расположен этот участок. Стационарность потока означает его однородность по времени; вероятностные характеристики такого потока существенно не меняются в зависимости от времени. В частности, так называемая интенсивность (или «плотность») потока событий – среднее число событий в единицу времени – для стационарного потока должна оставаться постоянной. Это не означает, что фактическое число событий, появляющихся в единицу времени, постоянно; поток может иметь локальные сгущения или разрежения. Важно, что для стационарного потока эти сгущения и разрежения не носят закономерного характера, а среднее число событий, попадающих на единичный участок времени, остаётся примерно постоянным для всего рассматриваемого периода.

Отсутствие последствия. Поток событий называется потоком без последствия, если для любых непересекающихся участков времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой (или другие, если рассматривается больше двух участков).

Ординарность. Поток событий называется ординарным, если вероятность попадания на элементарный участок двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события.

Если поток событий обладает всеми тремя перечисленными свойствами (стационарный, без последствия и ординарный), то такой поток называется *простейшим (или стационарным пуассоновским) потоком*. Считается, что простейшим потоком является стационарный ординарный поток без последствия.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности появления отказа неремонтируемого объекта за конкретный период времени при условии, что до этого момента отказа не было. Расчётная формула:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}.$$

Отметим, что для систем с высокой надёжностью вероятность безотказной работы $P(t) \approx 1$, так что интенсивность отказов приблизительно равна плотности распределения наработки до отказа; $f(t)$ – плотность распределения, а $F(t)$ – функция распределения.

Формула статистической оценки для интенсивности отказов имеет вид

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N\Delta t},$$

Параметр потока отказов – отношение среднего числа (математического ожидания) отказов восстанавливаемого объекта за любую малую его наработку к значению величины этой наработки:

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{M\{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t} \right),$$

где Δt – малый отрезок наработки; $r(t)$ – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки t .

При этом разность $r(t + \Delta t) - r(t)$ есть число отказов на отрезке Δt .

Осреднённый параметр потока отказов

$$\bar{\mu}(t) = \frac{M\{r(t_2) - r(t_1)\}}{t_2 - t_1}.$$

В этом случае учитывается число отказов за конечный отрезок наработки $[t_1, t_2]$, при этом $t_1 \leq t \leq t_2$. Напомним, что если поток отказов стационарный, то рассчитываемые по двум предыдущим формулам параметры от t не зависят.

Статистическую оценку для параметра потока отказов рассчитывают по формуле

$$\hat{\mu}(t) = \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Для стационарных потоков отказов можно использовать следующую формулу:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\bar{T}}$$

где в знаменателе записана оценка для средней наработки на отказ.

Пояснения. Математическое ожидание – число, вокруг которого сосредоточены значения случайной величины. Математическое ожидание случайной величины x часто обозначается Mx или MX .

Математическим ожиданием дискретной случайной величины x , имеющей распределение вида

$$\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n, \end{array}$$

является некоторая величина $M\xi = \sum_{i=1}^n p_i x_i$, когда число значений случайной величины конечно.

Если число значений случайной величины счётное, тогда имеем

$$M\xi = \sum_{i=1}^{\infty} p_i x_i .$$

При этом, если ряд в правой части равенства расходится, то говорят, что случайная величина x не имеет математического ожидания. Математическое ожидание для непрерывной случайной величины со своей плотностью вероятностей $p_\xi(x)$ вычисляют по формуле

$$M\xi = \int_{-\infty}^{\infty} x p_\xi(x) dx.$$

Если интеграл в правой части равенства расходится, то говорят, что случайная величина x не имеет математического ожидания.

Известно также, что математическое ожидание константы равно этой константе, а математическое ожидание произведения двух независимых случайных величин равно произведению их математических ожиданий.

Математическое ожидание случайной величины есть начальный момент первого порядка, а дисперсия – центральный момент второго порядка.

Примечание. Следующие шесть показателей надёжности часто относят к показателям долговечности.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса, который может относиться к гамма-процентному ресурсу (сроку службы), к полному назначенному ресурсу (сроку службы) и др.

Гамма-процентный ресурс – наработка, при которой объект не достигает своего предельного состояния с назначенной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный ресурс – суммарная предельно допустимая наработка системы, являющаяся тем моментом, когда применение данной системы по своему прямому назначению должно быть прекращено.

Средний срок службы – математическое ожидание этого срока.

Гамма-процентный срок службы – календарная длительность с начала работы объекта, в течение которой он не достигает своего предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначенный срок службы – календарная предельно допустимая длительность работы объекта.

Примечание. Следующие два показателя часто относят к сохраняемости объекта.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание этого срока.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Примечание. Комплексные показатели надёжности.

Это следующие показатели: коэффициент готовности с вероятностью того, что объект, кроме плановых перерывов, будет работоспособен в любой момент времени; коэффициент оперативной готовности с вероятностью того, что объект будет всегда работоспособен

в течение заданного времени сразу после изготовления или после планового перерыва на ранее назначенный срок по наработке.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания интервалов времени нахождения объекта в исправном состоянии за определённый период наработки к сумме математических ожиданий интервалов времени нахождения этого объекта в работоспособном состоянии, простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтами за тот же период эксплуатации.

Коэффициент планируемого применения – доля срока эксплуатации, когда объект не должен быть в ремонте или на плановом техническом обслуживании.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение величины показателя эффективности за конкретный период работы к номинальному значению этого показателя, определённому из условия, что за этот период отказов объекта не было.

В качестве возможного комплексного показателя анализа надёжности объекта ГОСТ, например, рекомендует использовать коэффициент готовности K_r системы, включающий в себя как безотказность, так и ремонтпригодность:

$$K_r = T / (T + T_v),$$

где T – средняя наработка на отказ; T_v – среднее время восстановления.

В конце настоящего тома приведены многие английские эквиваленты соответствующих терминов, связанных с надёжностью систем.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ являются функциями наработки t и связаны между собой элементарной зависимостью: $P(t) + Q(t) = 1$. Границы изменения для безотказной работы: $1 \geq P(t) \geq 0$, а значение $Q(t) = F(t)$, то есть равна функции распределения. Кроме того, вероятность безотказной работы связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t);$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt}.$$

Точечные статистические оценки для вероятности безотказной работы в интервале от 0 до t и для функции распределения наработки до отказа соответственно будут равны:

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}; \quad \hat{F}(t) = \frac{n(t)}{N},$$

где N – число объектов, работоспособных в начальный момент времени; $n(t)$ – число объектов, отказавших на интервале от 0 до t .

Для гамма-процентного показателя (по ресурсу, по наработке до отказа и др.) в общем виде имеем

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100},$$

что позволяет определять соответствующую гамма-процентную наработку до отказа t_γ из уравнения $P(t_\gamma) = \gamma / 100$. Из предыдущей формулы следует, что гамма-процентные показатели равны квантилям соответствующих распределений. Если вероятности, отвечающие квантилям, выражены в процентах, то это значит, что значения показателей безотказности объектов обычно, например, выражаются в виде 90; 95; 99; 99,5 и др. При этом соответственно вероятности возникновения отказа на отрезке $[0; t]$ будут равны: 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 и др.

Примечание. Значение x_p случайной величины x , для которого вероятность попадания в интервал $x < x_p$ не превышает p , то есть $P(x < x_p) \leq p$, тогда величину p часто называют порядком квантиля.

Средняя наработка до отказа $T_i = T_1$ вычисляется по формуле

$$T_i = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty [1 - F(t)] dt = \int_0^\infty P(t) dt,$$

где $F(t)$ – функция распределения наработки до отказа; $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

При этом выражение, стоящее после последнего равенства, показывает возможность расчёта данного показателя надёжности с учётом изменений значений величины вероятности безотказной работы.

Статистическая оценка для величины средней наработки до отказа записывается следующей формулой:

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j ,$$

где N – число исправных объектов при $t = 0$; τ_j – наработка до первого отказа каждого объекта (при этом считают, что все объекты должны эксплуатироваться до появления отказа).

К показателям ремонтпригодности обычно относят следующие:

– вероятность восстановления, то есть вероятность того, что время восстановления исправного состояния объекта не превысит заданного значения;

– гамма-процентное время восстановления, то есть время, когда восстановление объекта будет выполнено с вероятностью γ , выраженной в процентах;

– среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления исправного/работоспособного состояния системы после отказа;

– интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособности объекта, которая рассчитывается для рассматриваемого момента времени при условии, если до этого момента восстановление не было завершено;

– средняя трудоёмкость восстановления – математическое ожидание трудоёмкости восстановления объекта после отказа.

К показателям сохраняемости относятся следующие:

– гамма-процентный срок сохраняемости, то есть срок, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах;

– средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Другой важный показатель в теории надёжности – резервирование. При резервировании обеспечение надёжности функционирования объекта осуществляется за счёт применения дополнительных средств и/или возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых задач.

Резерв – совокупность вспомогательных средств и/или возможностей, применяемых для резервирования.

Основной элемент – тот элемент объекта, который необходим для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Резервируемый элемент – основной элемент, но в случае отказа которого предусмотрены один или несколько резервных элементов. Тогда *резервный элемент* служит для выполнения функций основного элемента при отказе последнего.

Кратность резерва – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими элементов, выраженное несокращённой дробью.

Дублирование – резервирование с кратностью резерва один к одному.

Нагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента.

Облегчённый резерв – резерв, который имеет один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент.

Ненагруженный резерв – резерв, содержащий один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Общее резервирование – резервирование, при котором резервируется весь объект.

Раздельное резервирование – резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

Постоянное резервирование – резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Резервирование замещением – резервирование, когда функции основного элемента переходят к резервному после отказа основного элемента.

Примечания. Возможны также следующие понятные ситуации: смешанное резервирование, резервирование с восстановлением или без восстановления и, наконец, вероятность успешного перехода на резервную схему за время, не превышающее допустимого перерыва для исправного цикла функционирования объекта.

Установление числовых значений показателей надёжности может быть достигнуто различными методами, например: расчётом, экспериментально, моделированием (физическим и/или математическим), с помощью машинного алгоритма. Для получения статистических данных о наработках и отказах деталей/объектов часто проводят полномасштабные, всесторонние или усечённые испытания как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях. Контрольные испытания могут проходить с объектами по мере их изготовления (обычно выборочно, например с помощью последовательного анализа Вальда). В плане испытаний на надёжность регламентируется режим контроля (нормальный или ускоренный), объём и длительность проверки.

Следует отметить опасность, с которой можно столкнуться при выполнении ускоренных/форсированных испытаний. Дело в том, что, заставляя объект работать в максимально усиленном режиме (по скоростям и нагрузкам, включая температуру и окружающую среду), можно вызвать наступление даже таких отказов, которые совсем не возникают при нормальной эксплуатации. Это сразу приведёт к общей неверной оценке надёжности системы.

Известно, что в большинстве случаев проектировщиков систем/объектов (как и потребителей изделий/агрегатов) в первую очередь интересует вероятность безотказной работы $P(t)$ предлагаемой к реализации системы. Некоторые графические изображения кривых, представляющих возможное изменение этой количественной характеристики надёжности, показаны на рис. 7.

Достаточно полная картина многообразия и связей различных законов распределения (30 типов) отображена далее на рис. 8.

Анализируя изменения вероятности безотказной работы, можно сделать заключение, что некоторые из них очень похожи друг на друга и что для конкретных параметров распределений, естественно, будут иметь место разные степени совпадения или расхождения.

Поэтому, чтобы не впасть в серьёзную ошибку при выборе закона распределения для описания наблюдаемых отказов, следует использовать различные критерии проверки.

Так, для проверки возможности принятия нормального закона могут применяться следующие основные критерии.

Критерий согласия ω^2 (Мизеса) является особенно мощным и эффективным для объёмов наблюдений статистических данных

$n \leq 100$ (относительно малых), но, естественно, может быть применён и для $n > 100$.

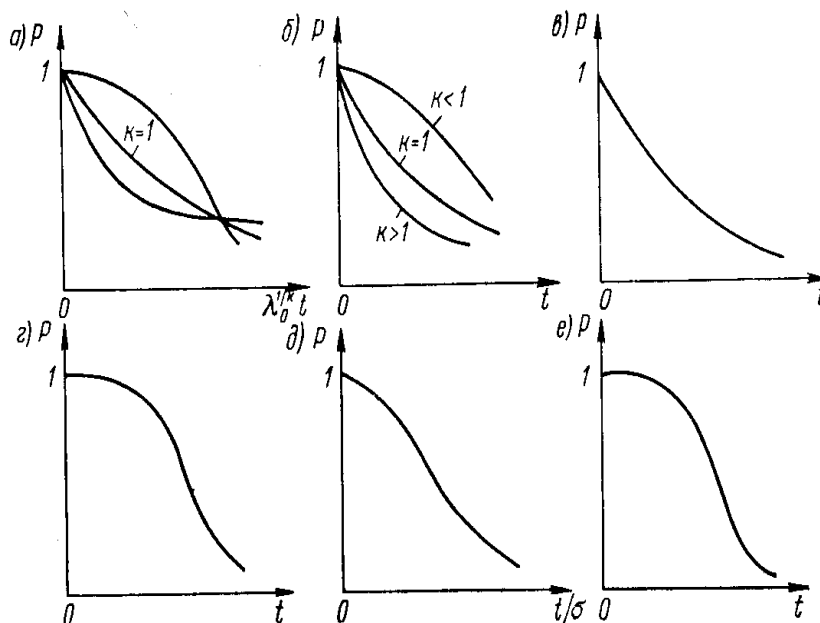


Рис. 7. Примеры возможных изменений вероятности безотказной работы для некоторых законов распределений:

a – Вейбулла; *б* – гамма-распределения; *в* – экспоненциального/показательного; *г* – усечённого нормального; *д* – Рэлея; *е* – логарифмически нормального

Одним из основных преимуществ этого критерия является то, что не требуется группировки наблюдений в интервалах таким образом, чтобы в каждом из них было бы не менее пяти значений исследуемого признака (как это рекомендовано для критерия χ^2 Пирсона). Для практического приложения критерия ω^2 вычисляют произведение вида

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n [P(x) - W(x)]^2,$$

где n – число наблюдаемых объектов; $P(x)$ – функция нормального распределения, табулированная (в работе «Численное решение двумерных и трёхмерных краевых задач математической физики и функции дискретного аргумента», автор – Г.Н. Положий) и вычисляемая по формуле

$$P(x < x_1) = 0.5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_1} e^{-z^2/2} dz,$$

$W(x)$ – накопленная частота, равная $(i - 0,5)/n$, причём i – порядковый номер признака в вариационном ряду объёма n ; одинаковые значения признака, например, по наработке следуют друг с другом со своими порядковыми номерами.

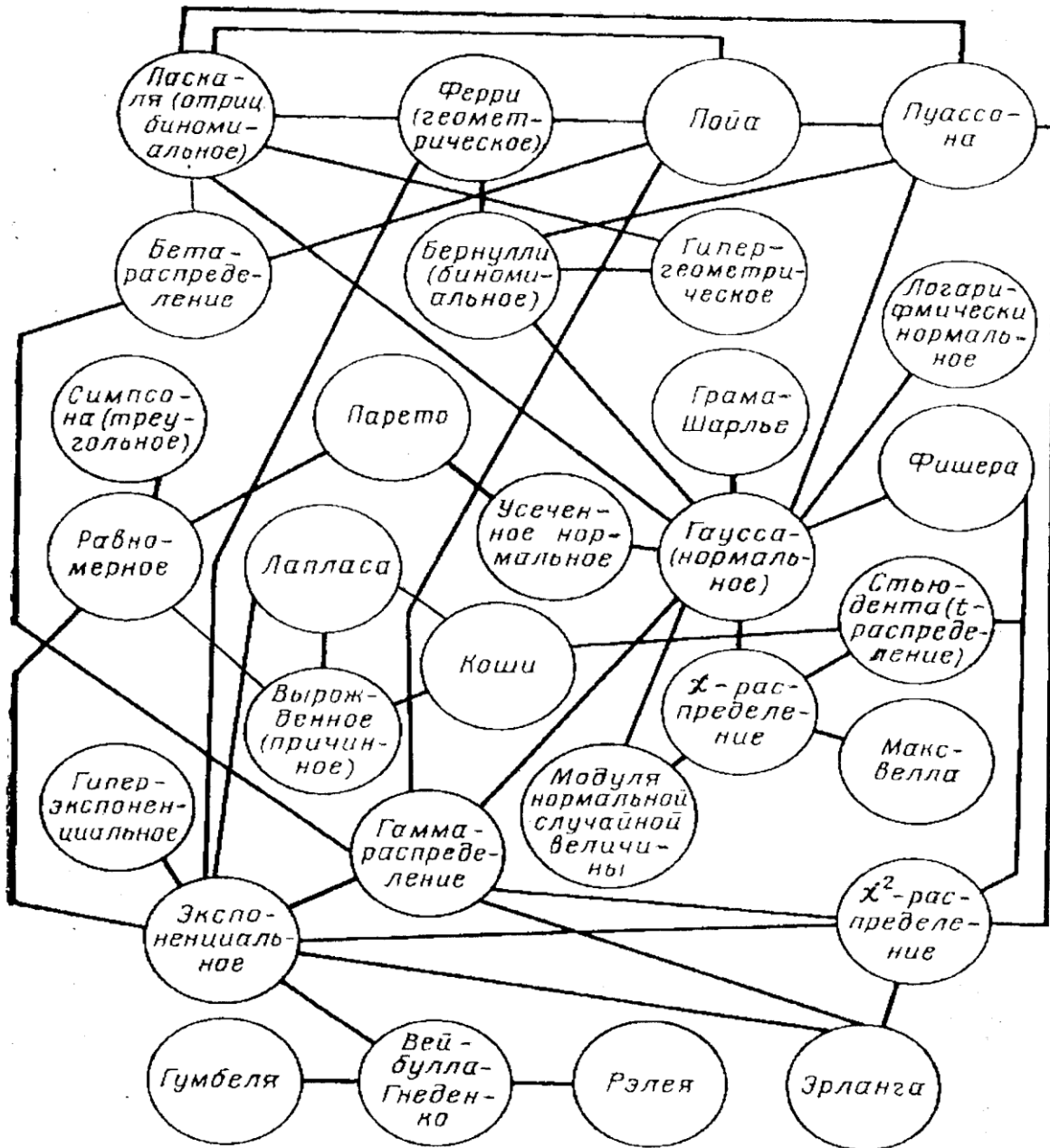


Рис. 8. Схема взаимосвязей и возможных переходов одного закона в другой (в другие) для тридцати законов распределения (непрерывных и дискретных)

Далее выписывают неравенства вида:

$$n\omega^2 \leq Z_\alpha,$$

где Z_α – критическое значение критерия $n\omega^2$ при выбранном уровне значимости α (табл. 1), по которому отвергают или принимают выдвинутую гипотезу о законе теоретического распределения.

Таблица 1

Критические значения Z_α

Уровень значимости α	Критическое значение Z_α	Уровень значимости α	Критическое значение Z_α
0,5	0,1184	0,05	0,4614
0,4	0,1467	0,03	0,5489
0,3	0,1843	0,02	0,6198
0,2	0,2412	0,01	0,7435
0,1	0,3473	0,001	1,1679

Приведём форму таблицы для записи расчётных величин при использовании этого критерия (табл. 2).

Таблица 2

Форма записи расчётных данных

i	x_i	$x_i - \bar{x}$	$z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s}$	$P(x_i)$	$W(x_i) = \frac{i - 0.5}{n}$	$r_i = P(x_i) - W(x_i) $	$r_i^2 = \sum_{i=1}^n r_i^2 = n\omega^2$

Критерий согласия χ^2 (Пирсона, хи-квадрат) обычно применяется для достаточно больших выборок ($n > 100$), но при этом накладывается искусственное требование о том, чтобы интервалы вариационного ряда, содержащие менее пяти значений признака, группировались с соседними так, чтобы их общее число в любом интервале было бы больше или равно пяти. В этом один из двух минусов этого критерия.

Если эмпирическое распределение задано в виде последовательности равноотстоящих признаков наблюдаемой случайной величины и соответствующих им частот, то для проверки гипотезы о нормальном распределении генеральной совокупности X при выбранном уровне значимости α необходимо произвести следующие операции.

1. Вычислить выборочную среднюю \bar{x} и выборочное среднеквадратичное отклонение s .

2. Найти теоретические частоты m_i по формуле

$$m_i = \left(\frac{nh}{s}\right) \cdot \varphi(u_i) ,$$

где n – объём выборки (сумма всех частот); h – шаг, то есть разность между соседними значениями наблюдаемой случайной величины; $\varphi(u)$ – функция, определяемая по табл. 3;

$$u_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}; \quad \varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2}.$$

Таблица 3

Значения функции $\varphi(u) = (1/(\sqrt{2\pi})) \exp(-u^2/2)$

u	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3652	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1	0,242	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315

<i>u</i>	Сотые доли									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	989	973	957
1,7	940	925	909	893	878	863	848	833	818	804
1,8	790	775	761	748	734	721	707	694	81	669
1,9	656	644	632	620	608	596	584	573	562	551
2	0,054	529	519	508	498	488	478	468	459	449
2,1	440	431	422	413	404	396	387	379	371	363
2,2	355	347	339	332	325	317	310	303	297	290
2,3	283	277	270	264	258	252	246	241	235	229
2,4	224	219	213	208	203	198	194	189	184	180
2,5	175	171	167	163	158	154	151	147	143	139
2,6	136	132	129	126	122	119	116	113	110	107
2,7	104	101	99	96	93	91	88	86	84	81
2,8	79	77	75	73	71	69	67	65	63	61
2,9	60	58	56	55	53	51	50	48	47	46
3	0,0044	43	42	40	39	38	37	36	35	34
3,1	33	32	31	30	29	28	27	26	25	25
3,2	24	23	22	22	21	20	20	19	18	18
3,3	17	17	16	16	15	15	14	14	13	13
3,4	12	12	12	11	11	10	10	10	9	9

3. Сравнить эмпирические и теоретические частоты с помощью критерия Пирсона, для чего составить и заполнить форму табл. 4.

Таблица 4

Форма записи расчётных данных

<i>i</i>	x_i	$u_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$	$\varphi(u_i)$	m_i	n_i	$n_i - m_i$	$(n_i - m_i)^2$	$\frac{(n_i - m_i)^2}{m_i}$

4. Вычислить значение критерия

$$\chi^2_{\text{H}} = \sum \left(\frac{(n_i - m_i)^2}{m_i} \right).$$

Из табл. 5 для критических значений точек распределения χ^2 при выбранном уровне значимости α и для числа степеней свободы $\nu = k - 3$, где k есть число групп выборки, найти критическую точку $\chi^2_{кр}(\alpha, \nu)$.

Таблица 5

Критические точки распределения χ^2

Число степеней свободы ν	Уровень значимости α				
	0,01	0,005	0,995	0,99	0,975
1	6,63	7,88	0,00039	0,00016	0,00098
2	9,21	10,6	0,01	0,0201	0,05
3	11,34	12,84	0,0717	0,115	0,216
4	13,28	14,86	0,207	0,297	0,484
5	15,09	16,75	0,412	0,554	0,831
6	16,81	18,55	0,676	0,872	1,24
7	18,48	20,28	0,989	1,24	1,69
8	20,09	21,96	1,34	1,65	2,18
9	21,67	23,59	1,73	2,09	2,7
10	23,21	25,19	2,16	2,56	3,25
11	24,73	26,76	2,6	3,05	3,82
12	26,22	28,3	3,07	3,57	4,4
13	27,69	29,82	3,57	4,11	5,01
14	29,14	31,32	4,07	4,66	5,63
15	30,58	32,8	4,6	5,23	6,26
16	32	34,27	5,14	5,81	6,91
18	34,81	37,16	6,26	7,01	8,23
20	37,57	40	7,43	8,26	9,59
24	42,98	45,56	9,89	10,86	12,4
30	50,89	53,67	13,79	14,95	16,79
40	63,69	66,77	20,71	22,16	24,43
60	88,38	91,95	35,53	37,48	40,48
120	158,95	163,64	83,85	86,92	91,58

Примечание к табл. 5. Для большого числа степеней свободы (справочник по надёжности, т. 1–3, М., Мир, 1969, 1030 с.) рекомендовано использовать приближённую формулу: $\chi^2 \approx \nu (1 - (2/(9\nu))) + z_\alpha (2/9\nu)^{1/2}$, где z_α – процентиль нормального распределения (рас-

предела Гаусса); ν – число степеней свободы. Процентили стандартного нормального распределения задаются уравнением вида

$$\Phi(z_\alpha) = \alpha, \quad \alpha \in [0, 1]$$

При этом имеем следующие данные:

$\alpha =$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35
$z_\alpha =$	-1,6449;	-1,2816;	-1,0364;	-0,8416;	-0,6745;	-0,5244;	-0,3853
$\alpha =$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
$z_\alpha =$	-0,2533	-0,1257	0	0,1257	0,2533	0,3853	0,5244
$\alpha =$	0,75	0,8	0,85		0,9	0,95	
$z_\alpha =$	0,6745	0,8416	1,0364	1,2816	1,6449.		

Если в итоге получается, что $\chi^2_n < \chi^2_{кр}$, то нет оснований считать предположение о применимости нормального закона распределения ошибочным. Следовательно, имеющиеся некоторые расхождения в частотах появления признака случайны.

Если же $\chi^2_n > \chi^2_{кр}$, то гипотезу о нормальности распределения отвергают в силу существенных отличий теоретических и эмпирических частот. Если производили объединения до пяти среди малочисленных эмпирических частот признака, то необходимо аналогичные объединения выполнить и для соответствующих им теоретических частот. Тогда при определении числа степеней свободы $\nu = k - 3$ в качестве k следует принимать то число групп выборки, которое получилось после объединения частот. В табл. 3 приведены табулированные значения функции $\varphi(u)$.

Примечание. Приводимые здесь справочные данные, а также формулы в основном используются в прикладных примерах теоретических расчётов, связанных как с вопросами надёжности механических систем, так и с исследованиями трибосистем.

Подобное замечание, в частности, относится и к критериям проверки правомочности использования того или иного закона распределения. Для этого приводятся, например, несколько форм бумаг, относящихся к часто встречающимся на практике законам распределений отказов или наработок. Например, разработаны бумаги для нормального закона, Вейбулла–Гнеденко, экспоненциального / показательного, усечённого нормального, логарифмически нормального.

Сделаем пояснение к формуле для нахождения числа степеней свободы. При использовании критерия χ^2 это число равно $\nu = k - 1 - r$ (запись дана в общем виде). Число r определяет количество параметров выбранного для проверки закона распределения.

Для нормального закона $r = 2$ (выборочное среднее и выборочное среднеквадратичное отклонение). В результате в данном случае имеем

$$\nu = k - 1 - 2 = k - 3.$$

Далее рассмотрим ситуацию, когда эмпирическое (опытное) распределение задано в виде некоторой последовательности интервалов одинаковой длины. Каждому интервалу (x_i, x_{i+1}) соответствуют частоты n_i , показывающие, сколько значений признака попало в i -й интервал.

Для проверки гипотезы о нормальном законе распределения генеральной совокупности X следует выбрать/принять определённый уровень значимости α .

Критерий согласия Колмогорова является менее «жёстким» с точки зрения подтверждения согласованности выбранного теоретического закона распределения по отношению к фактическому эмпирическому. Считается, что соответствие будет удовлетворительным, если выполняется условие

$$\Delta = D_{\max} \sqrt{n} \leq 1,$$

где D_{\max} – наибольшее отклонение теоретической кривой распределения от экспериментальной по модулю; n – общее число опытных точек наблюдения.

Можно применять и иную форму записи для вероятности:

$$P(\Delta) = 1 - K(\Delta).$$

Эта формула табулирована в работе Б.А. Козлова и И.А. Ушакова – Справочнике по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики (М.: Советское радио, 1975).

Критерий согласия Романовского использует отношение вида

$$r = \frac{(\chi^2 - k)}{\sqrt{2k}},$$

где k – число степеней свободы.

Расхождение между теоретическим и эмпирическим распределением считается несущественным, если r имеет абсолютное значение меньше трёх, то есть в этом случае нормальный закон может быть принят в качестве нулевой гипотезы.

Известен и другой критерий Романовского, который связан с анализом потенциально резко выделяющихся значений наблюдаемого признака в общей полученной совокупности данных.

Задача формулируется так: оставлять такое значение в общей сводке информации или следует его исключать?

Для этого по имеющейся выборке вычисляют среднее \bar{x} и среднее квадратичное отклонение s без учёта спорного члена ряда распределения x_1 или x_n . Далее вводят коэффициент t_α , зависящий от α и членов ряда n , причём обеспечиваемая вероятность принятия решения $P = 1 - \alpha$ (табл. 6).

Таблица 6

Значения t_α для анализа резко выделяющихся значений

n	α			
	0,05	0,02	0,0!	0,001
2	15,56	38,97	77,96	779,69
3	4,97	8,04	11,46	36,48
4	3,56	5,08	6,53	14,47
5	3,04	4,11	5,04	9,43
6	2,78	3,64	4,36	7,41
7	2,61	3,36	3,96	6,37
8	2,51	3,18	3,71	5,73
9	2,43	3,05	3,53	5,31
10	2,37	2,96	3,41	5,01
11	2,32	2,88	3,31	4,79
12	2,29	2,83	3,23	4,62
13	2,26	2,78	3,17	4,48
14	2,23	2,74	3,12	4,37
15	2,22	2,71	3,08	4,27
16	2,2	2,68	3,04	4,2
17	2,18	2,65	3	4,13
18	2,16	2,64	2,99	4,07
19	2,15	2,62	2,95	4,02
20	2,14	2,6	2,93	3,98
22	2,12	2,58	2,89	3,91

n	α			
	0,05	0,02	0,01	0,001
24	2,11	2,55	2,86	3,84
26	2,1	2,53	2,84	3,79
28	2,09	2,52	2,82	3,76
30	2,08	2,5	2,8	3,72
40	2,04	2,45	2,74	3,6
60	2,02	2,41	2,68	3,49
120	1,99	2,37	2,63	3,39
$\rightarrow \infty$	1,96	2,32	2,57	3,29

Примечание: в сотых долях.

Тогда, если $(\bar{x} - x_1) / s > t_\alpha$ или $|\bar{x} - x_n| / s > t_\alpha$, то с выбранной вероятностью значения x_1 или x_n можно исключить из общей сводки наблюдений (как нехарактерные).

Если имеется сразу несколько грубо выделяющихся значений, то величины \bar{x} и s определяются без них, а после этого каждое значение в отдельности проверяется по приведённой схеме.

Дополнительно приведём ещё два критерия, связанных с оценкой того, является ли конкретное значение наблюдаемого признака грубо выделяющимся из остальной совокупности или нет.

Критерий Ирвина. В отличие от предыдущей схемы расчёты \bar{x} и s ведут по всем статистическим данным упорядоченного (например, по возрастанию) вариационного ряда. После этого оценивают выделяющееся значение через функцию

$$\lambda = (x_{n+1} - x_n) / s,$$

где в числителе дроби записана разность наибольших значений случайной величины.

Функция λ табулирована для разных уровней надёжности P (берётся из справочников и книг, связанных с математической статистикой и теорией вероятностей). Если расчётное значение λ больше значения λ_p для известного n , то проверяемая величина оставляется в совокупности, а если меньше – исключается с принятой вероятностью 0,95 или 0,99 (табл. 7).

Таблица 7

Значения функции λ_p

P	n								
	2	3	10	20	30	50	100	400	1000
0,95	2,8	2,2	1,5	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8
0,99	3,7	2,9	2	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2

Критерий Груббса. Для проверки спорного крайнего члена выборки вычисляют следующее значение:

$$v = \frac{|x - \bar{x}|}{s},$$

где x принимается равным минимальному или максимальному значению признака, являющемуся сомнительным (то есть x_1 или x_n).

Выбрав нужный уровень значимости α оценки результатов наблюдений, по приведённой формуле и с использованием табл. 8 осуществляют проверку гипотезы.

Таблица 8

Критические значения v_α

n	Уровень значимости α				n	Уровень значимости α			
	0,10	0,05	0,026	0,01		0,10	0,05	0,025	0,01
3	1,4	1,41	1,41	1,41	15	2,32	2,49	2,63	2,8
4	1,64	1,69	1,71	1,72	16	2,35	2,52	2,67	2,84
5	1,79	1,87	1,92	1,96	17	2,38	2,55	2,7	2,87
6	1,89	1,99	2,06	2,13	18	2,4	2,58	2,73	2,9
7	1,97	2,09	2,18	2,26	19	2,42	2,6	2,75	2,93
8	2,04	2,17	2,27	2,37	20	2,45	2,62	2,78	2,96
9	2,09	2,24	2,35	2,46	21	2,46	2,64	2,8	2,98
10	2,14	2,29	2,41	2,54	22	2,48	2,66	2,82	3,01
11	2,19	2,34	2,47	2,6	23	2,5	2,68	2,84	3,03
12	2,23	2,39	2,52	2,66	24	2,52	2,7	2,86	3,05
13	2,26	2,42	2,56	2,71	25	2,54	2,72	2,88	3,07
14	2,3	2,46	2,6	2,76					

Примечание: округления сделаны до сотых долей.

Последняя принимается, если $v \leq v_{\alpha}$, но отвергается, если $v > v_{\alpha}$. Иными словами, гипотеза принимается в том смысле, что с выбранной/принятой вероятностью проверяемая величина признака не является резко выделяющейся и её следует оставить в рассматриваемой совокупности.

Общие расчётные формулы по способам [Груббса (Грэббса), Ирвина и Романовского] и критериям (Фишера, G -критерий Кохрена и B -критерий Бартлетта) анализа возможных резко выделяющихся значений приводятся в специальных таблицах многочисленных справочников (например, «Трибология», том VI – международная энциклопедия, выпущенная под редакцией проф. К.Н. Войнова).

Критерий использования выборочных показателей асимметрии S_k и эксцесса E_k , который служит для приближённой проверки гипотезы о нормальности распределения.

Первоначально вычисляют указанные характеристики для объёма выборки n :

$$S_k = \frac{m_3}{s^3}; \quad E_k = \left(\frac{m_4}{s^4} \right) - 3,$$

где s – выборочное среднеквадратичное отклонение; m_3 и m_4 – центральные моменты третьего и четвёртого порядка.

Далее вычисляют для каждой статистики их среднеквадратичные отклонения по формулам

$$\sigma_{S_k} = \sqrt{([6(n-1)] / ((n+1)(n+3)))};$$

$$\sigma_{E_k} = \sqrt{([24(n-2)(n-3)n] / ((n-1)^2(n+3)(n+5)))}.$$

Если абсолютные величины S_k и $E_k \leq$ значений σ_{S_k} и σ_{E_k} , соответственно, то выбранная гипотеза о нормальном законе подтверждается.

Числа Вестергарда ($n_i = 0,3; 0,7; 1,1; 3,0$) также служат для прикидочной оценки возможности использования нормального закона распределения при обработке статистической информации.

Считается, что если известны (или найдены) такие числовые характеристики распределения, как средняя арифметическая \bar{x} и среднеквадратичное отклонение σ , то в следующие промежутки

$$\bar{x} \pm 0,3\sigma; \quad \bar{x} \pm 0,7\sigma; \quad \bar{x} \pm 1,1\sigma \quad \text{и} \quad \bar{x} \pm 3\sigma$$

должны соответственно укладываться $\frac{1}{4}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{4}$ и 99,73 % значений анализируемого признака из всей совокупности.

Вероятностная бумага нормального распределения (как и иные вероятностные бумаги других законов распределения) служит для нанесения на неё точек, определяемых при обработке статистической информации о наработках или отказах систем, что позволяет определять возможность аппроксимации (приближения) эмпирических данных с помощью гауссова/нормального (или иного) закона распределения. Такая аппроксимация конкретным законом распределения возможна, если наносимые точки ложатся примерно на прямую линию.

Метод спрямлённых диаграмм является ещё одним графическим приёмом проверки гипотезы о нормальности распределения совокупности. Последовательность записи определяемых величин дана в табличной форме (табл. 9 и 10).

Таблица 9

Определение расчётных величин для каждой варианты

Номер варианты i	Значение варианты x_i	Частота n_i	Накопленная частота $H_i = \sum_{r=1}^i n_r - 0.5$	$F^*(x_i) = H_i/n$	$P_i^* = F^*(x_i) \cdot 1$	Квантили u_{p_i}

Таблица 10

Определение расчётных значений с учётом интервалов

№ интервала i	Правый конец интервала x_i	Частота n_i	Накопленная частота $H_i = \sum_{r=1}^i n_r$	Относительная накопительная частота $P_i = \sum \left(\frac{n_r}{n} \right)$	$P_i \cdot 100 \%$	Квантили u_{p_i}

Запись для эмпирического распределения, когда выборка объёма n не сгруппирована по интервалам, может быть задана упорядоченным рядом (см. табл. 9).

Для распределения, представленного в виде последовательности интервалов и соответствующих им частот, – см. табл. 9.

Напомним, что под p -квантилем случайной величины X подразумевают то значение аргумента u_p интегральной функции $F(x)$, для которой вероятность события $X < u_p$ равна заданной величине p .

Переходя к графическому построению зависимости $u = (x - a) / \sigma$ и нахождению оценок параметров нормального распределения a и σ в прямоугольных координатах uOx , наносят расчётные точки и определяют степень их соответствия линейной зависимости.

Если это условие выполняется, то оценка математического ожидания a равна значению абсциссы, полученному от пересечения координаты построенной прямой.

Для оценки среднеквадратичного отклонения σ (второго параметра нормального закона распределения) берут разность абсцисс найденной точки и точки, получающейся при пересечении линии, параллельной оси x , проведённой из ординаты $u = -1$, с последующим опусканием из неё перпендикуляра на ось абсцисс.

Коэффициент вариации v , равный отношению среднеквадратичного отклонения к значению математического ожидания случайной величины,

$$v = \sigma / MX,$$

аналогично может быть использован *в качестве критерия* проверки правомочности использования нормального закона распределения для обработки статистических данных.

В частности, считают, что если его расчётное значение будет $\leq 0,3(3)$ (иногда полагают до $0,35$), то имеются достаточные основания полагать, что закон распределения статистических данных нормальный. Это весьма «быстрый» и удобный для расчёта критерий.

Последний приводимый важный алгоритм проверки устойчивости нормального закона распределения позволяет аргументировано утверждать о возможности экстраполяции выводов либо отвергать прогноз на перспективу, если закон справедлив только для текущего объёма наблюдений, но не больше.

В таком случае подчёркиваем исключительную важность сделанного пояснения.

Действительно, если не выполнять проверку на устойчивую стабильность выбранного закона распределения, то можно допустить очень грубую ошибку, относя полученный результат на всю генеральную совокупность статистических данных. Пролонгация выводов здесь просто недопустима. Автором разработан весьма эффективный математический приём, с помощью которого можно полностью избежать грубых просчётов в выборе закона распределения для теоретического описания исследуемых явлений при изменениях объёмов наблюдений дискретных и непрерывных случайных величин. Кратко суть вычислений сводится к следующей процедуре. В частности, пусть N – объём исходной неупорядоченной выборки (то есть статистические данные не расположены строго в порядке убывания или возрастания), которую характеризуют математическое ожидание и дисперсия:

$$M = \sum n_i x_i / N, \quad D = \sigma^2 = (\sum n_i (x_i - M)^2) / (N - 1),$$

где x_i – значения случайной величины; n_i – число случаев, причём $\sum n_i = N$.

Коэффициент вариации: $v = f = \sigma/M$ и $v^2 = f^2 = \sigma^2/M^2$; обозначим искусственно отбрасываемую случайным образом часть данных через ΔN , а оставшийся объём выборки через $N_1 = N - \Delta N$, то есть с индексом 1. Если, отбрасывая разные объёмы статистических данных из известной полученной в экспериментах информации и проверяя положение, а сохраняется ли закон распределения постоянным, то это объективно и подсказывает, возможно или нет распространять полученный вывод на больший объём наблюдений.

Далее приведём примеры расчёта вероятности безотказной работы для различных вариантов компоновочного соединения между собой элементов или целых объектов (рис. 9).

Пример 1 (см. рис. 9, а). Объект может пребывать в двух противоположных состояниях: нормальном (исправном в 90 % всех случаев) и ненормальном. Вероятности нахождения в указанных состояниях на определённый момент времени/наработки известны и соответственно равны 0,8 и 0,2. Выполнить расчёт, используя формулу полной вероятности.

Искомое значение будет: $P = 0,9 \cdot 0,8 + 0,1 \cdot 0,2 = 0,74$.

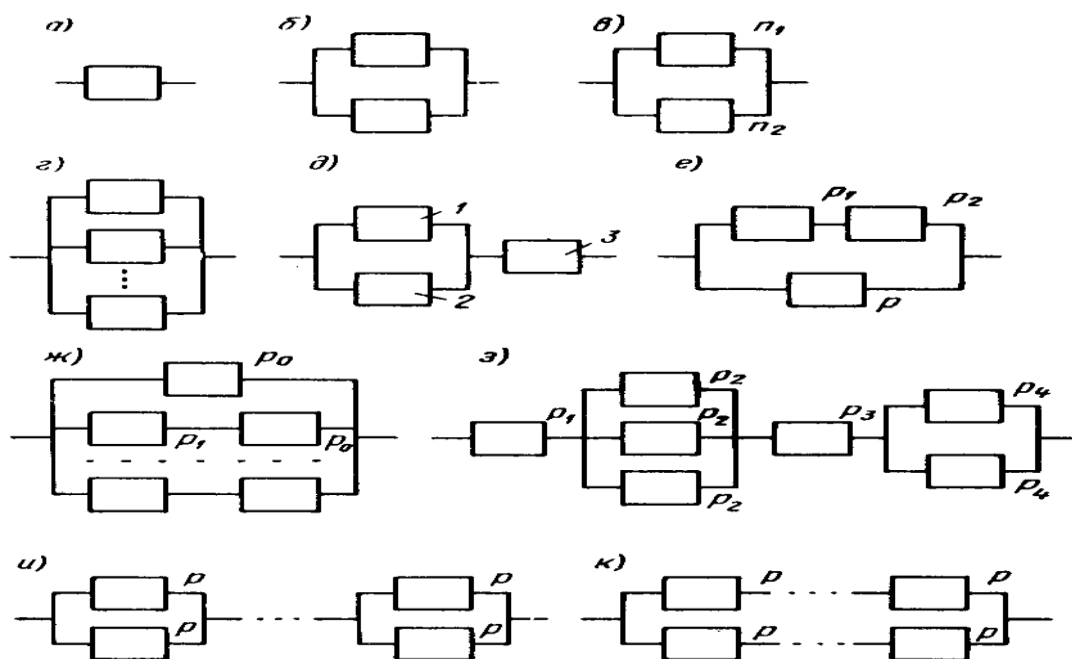


Рис. 9. Расчётные схемы соединений, представленные в виде блоков, для расчёта надёжности

Пример 2 (см. рис. 9, б). Предположим, что два элемента прибора могут работать в удовлетворительном и неудовлетворительном режимах с вероятностями P_1 и $P_2 = 1 - P_1$. Вероятность безотказной работы каждого элемента в этих условиях соответственно равны p_1 и p_2 . Определить ожидаемую надёжность работы прибора, если $P_1 = 0,8$; $P_2 = 0,2$; $p_1 = 0,6$; $p_2 = 0,4$. Формула для расчёта будет иметь следующий вид:

$$P = P_1[1 - (1 - p_1)^2] + P_2[1 - (1 - p_2)^2]$$

Подставив числовые значения, получим, что $P = 0,90$.

Пример 3 (см. рис. 9, в). Расчётная схема аналогична рассмотренной предыдущей схеме, но отличие состоит в том, что один из узлов в данном варианте резервирует другой, причём количество рабочих элементов в них n_1 и n_2 соответственно, а надёжность равна: $p_1 = p^{n_1}$ и $p_2 = p^{n_2}$. Требуется оценить надёжность устройства, считая, что вероятность безотказной работы всех последовательно соединённых элементов по узлам одинакова и равна 0,95. Тогда воспользуемся следующей расчётной формулой:

$$P = 1 - (1 - p^{n_1})(1 - p^{n_2}) = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2).$$

После подстановки числовых значений получаем, что $p = 0,962$.

Пример 4 (см. рис. 9, з). Блок состоит из пяти однотипных приборов ($n = 5$), причём для его надёжной работы необходим лишь один исправно работающий. Считая надёжность p каждого прибора одинаковой и равной 0,53, вычислить надёжность системы и определить требуемое количество приборов, чтобы общая надёжность блока была бы равна $P_1 = 0,99$.

Для ответа на первый вопрос используем формулу вида $P = 1 - (1 - p)^n$, а после подстановки числовых значений найдём, что $P = 0,977$.

Для получения ответа на второй вопрос используем следующую формулу:

$$n \geq \frac{\lg(1 - P_1)}{\lg(1 - p)}.$$

Подставив числовые значения, получаем, что $n = 7$.

Пример 5 (см. рис. 9, д). Элементы 1 и 2 резервируют работу друг друга, имея вероятность безотказной работы 0,8. Блок 3, содержащий $n = 4$ элемента, каждый из которых имеет надёжность 0,92, необходим для того, чтобы объект отвечал своему техническому назначению.

Здесь $P = [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] p^4$; подставив значения, имеем, что $P = 0,688$.

Пример 6 (см. рис. 9, е). Два элемента с надёжностью $p = 0,5$ резервируют работу друг друга; однако на случай возможного появления отказа одного из них предусмотрено введение переключающего устройства (в предыдущих подобных случаях надёжность переключателей полагалась равной единице), надёжность которого $p_1 = 0,98$. Вычислить вероятность безотказной работы узла. В общем виде решение можно записать так:

$$P = 1 - (1 - p)(1 - pp_1).$$

Подставив числовые значения, находим, что $P = 0,745$.

Пример 7 (см. рис. 9, ж). Имеется резервирование объекта $n - 1$ прибором (однотипным и $n = 4$). Надёжность каждого $p_0 = 0,5$, а надёжность переключающих устройств $p_1 = 0,9$. Оценить надёжность системы.

Формула для расчёта имеет вид

$$P = 1 - (1 - p_0)(1 - p_1 p_0)^{n-1} .$$

Сделав подстановку, получим, что $P = 0,917$. Такое достаточно высокое значение показывает, что путём резервирования узлов (элементов), имеющих относительно низкую надёжность, можно получить количественные показатели надёжности на определённый период, которые устраивают по условиям эксплуатации.

Если же в этом примере нужно обеспечить более высокое значение P , равное P_1 , то требуемое число резервных устройств определится из выражения

$$n \geq \frac{\lg(1 - P_1) - \lg(1 - p_0)}{\lg(1 - p_1 p_0)} + 1.$$

Пример 8 (см. рис. 9, з). Для представленной схемы с указанными значениями p_i нужно вычислить ожидаемую надёжность объекта. С учётом резервных устройств записываем формулу в виде

$$P = p_1 [1 - (1 - p_2)^3] p_3 [1 - (1 - p_4)^2].$$

В заключение покажем, что будет обеспечивать более высокую надёжность: резервирование по отдельным блокам или системы/объекта в целом (рис. 9, и, к). Значения вероятности безотказной работы для всех узлов принимаем одинаковыми и равными p .

Для варианта, изображённого на рис. 9, и, получим следующее выражение:

$$P = [1 - (1 - p)^2]^n ,$$

для варианта на рис. 9, к имеем

$$P = 1 - (1 - p^n)^2.$$

Таким образом, если подставить в две последние формулы одинаковые числа, то получим, что резервирование по блокам (или по каждому элементу) гарантирует более высокую надёжность системы, чем её дублирование в целом.

Далее представим программу в компьютерной оболочке MathCad и график (рис. 10) с учётом запаздывания наступления отказа при износе деталей и применения показательного/экспоненциального за-кона распределения. При этом будем использовать следующую формулу для вычисления величины вероятности безотказной рабо-ты: $P\{\tau > T\} = 1$ при $T < t_0$; или такая вероятность будет равна $\exp(-\lambda(T - t_0))$ при $T \geq t_0$, где t_0 – наработка, при которой износо-вый / постепенный отказ не возникает; λ – интенсивность отказов.

Полагаем, что наработка имеет размерность «дн».

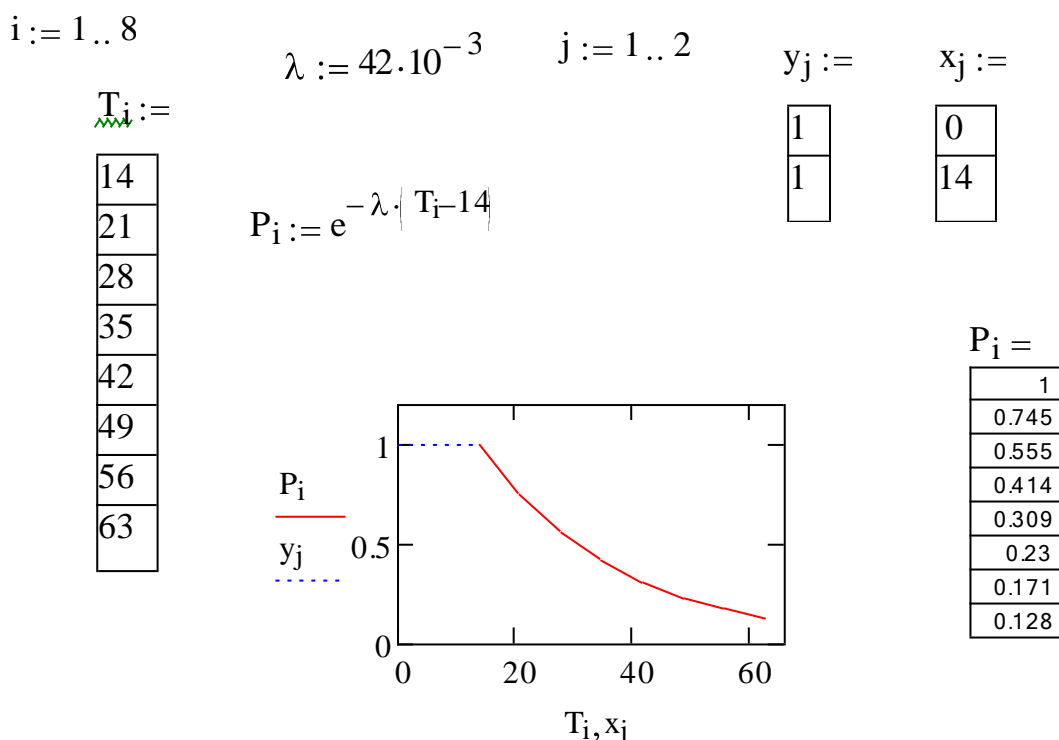


Рис. 10. Характер изменения величины вероятности безотказной работы при запаздывании времени возникновения отказов по причине недостижения деталями предельного допуска и при экспоненциальном законе распределения

В заключение приведем примеры проверки правомочности использования коэффициентов трения как постоянных величин в различных формулах.

Коэффициент трения не является длительной стабильной величиной, «бесконечной» константой, хотя во многих случаях расчёты принимают этот коэффициент постоянным.

Для дальнейших вычислений приведём сгенерированную компьютером (или взятую из ряда справочников) таблицу случайных чисел, имеющих пока равномерное распределение.

Перед каждым двузначным числом следует поставить 0 и запятую (например, 0,10; 0,09; 0,73...).

10 09 73 25 33 76 52 01 35 86 34 67 35 48 76 80 95 90 91 17
37 54 20 48 05 64 89 47 42 96 24 80 52 40 37 20 63 61 04 02

08 42 26 89 53 19 64 50 93 03 23 20 90 25 60 15 95 33 47 64
99 01 90 25 29 09 37 67 07 15 38 31 13 11 65 88 67 67 43 97

12 80 79 99 70 80 15 73 61 47 64 03 23 66 53 98 95 11 68 77

Пример 1. Из книги «Трение, износ и смазка» под общей редакцией д-ра техн. наук А.В. Чичинадзе (Москва, Машиностроение, 2003) возьмём приведённую в ней формулу для расчёта коэффициента трения f_T при граничной смазке по Боудену:

$$f_T = \alpha_M f_M + (1 - \alpha_M) f_C,$$

где f_M и f_C – коэффициенты трения, соответственно, при чисто металлическом контакте и контакте через неповреждённую граничную смазочную плёнку; α_M – доля металлического контакта, увеличивающаяся с ростом температуры (примем её величиной постоянной – 0,4, полагая, что температура не успеваешь сколько-нибудь значительно увеличиться).

Можно положить, что в полном объёме исходной информации все 100 приведённых коэффициентов трения условно относятся к значению f_M , а величину коэффициента f_C можно принять и зафиксировать значением 0,1.

В данном же случае мы сократим исходное количество статистических данных по коэффициентам трения, взяв для f_1 и f_2 только первые две строки случайных чисел, входящих для рассматриваемого примера в блок равномерного распределения (рис. 11).

Кроме того, напомним, используя материалы книги Д. Кирьянова по самоучителю MathCAD 2001, смысл нескольких встроенных функций, которыми реализуются алгоритмы сглаживания исходных данных:

✓ $\text{medsmooth}(y, b)$ – сглаживание алгоритмом «бегущих медиан»; при этой функции считается, что данные расположены равномерно;

✓ $\text{ksmooth}(x, y, b)$ – сглаживание на основе функции Гаусса;

✓ $\text{supsmooth}(x, y)$ – локальное сглаживание адаптивным алгоритмом, основанным на анализе ближайших соседей каждой пары данных;

- x – вектор действительных данных аргумента (для supsmooth его элементы должны быть расположены в порядке их возрастания);

- y – вектор действительных значений того же размера, что и x ;

- b – ширина окна сглаживания.

Используя возможности компьютерной оболочки MathCad, напишем программу вычисления коэффициента трения f_T для двух возможных вариантов, обозначенного здесь как f_1 и f_2 .

Все функции имеют в качестве аргумента векторы, составленные из массива данных; они выдают в качестве результата вектор сглаженных данных того же размера. На рис. 12–14 показаны варианты применения алгоритмов сглаживания для коэффициента f_1 (усечено до 12 значений).

$$x := (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12)^T$$

$$y := (0.10 \ 0.09 \ 0.73 \ 0.25 \ 0.33 \ 0.76 \ 0.52 \ 0.01 \ 0.35 \ 0.86 \ 0.34 \ 0.67)^T$$

$$z := \text{supsmooth}(x, y) \quad \underline{s} := \text{cspline}(x, z) \quad \underline{A}(t) := \text{interp}(s, x, z, t)$$

$i := 1..20$

$j := 1..20$

$\alpha := 0.4$

$f1c := 0.1$

$fm2 := 0.3$

$fm_i :=$

$fc_j :=$

0.10
0.09
0.73
0.25
0.33
0.76
0.52
0.01
0.35
0.86
0.34
0.67
0.35
0.48
0.76
0.80
0.95
0.90
0.91
0.17

0.37
0.54
0.20
0.48
0.05
0.64
0.89
0.47
0.42
0.96
0.24
0.80
0.52
0.40
0.37
0.20
0.63
0.61
0.04
0.02

$$f1_i := \alpha \cdot fm_i + (1 - \alpha) \cdot f1c$$

$$f2_j := \alpha \cdot fm2 + (1 - \alpha) \cdot fc_j$$

$f1_i =$

0.1
0.096
0.352
0.16
0.192
0.364
0.268
0.064
0.2
0.404
0.196
0.328
0.2
0.252
0.364
0.38

$f2_j =$

0.342
0.444
0.24
0.408
0.15
0.504
0.654
0.402
0.372
0.696
0.264
0.6
0.432
0.36
0.342
0.24

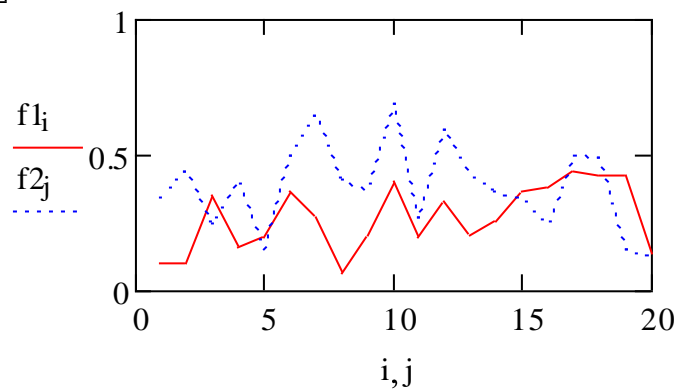


Рис. 11. Два варианта возможного изменения коэффициентов трения в динамике работы фрикционной пары

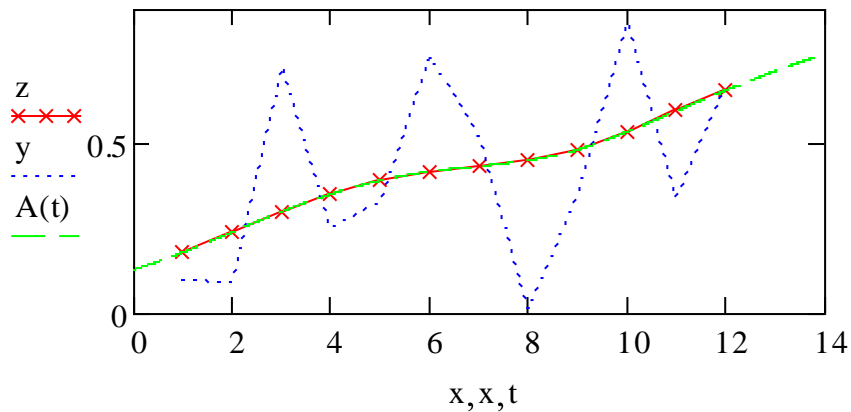


Рис. 12. Применение алгоритма расчёта с использованием адаптивного сглаживания данных

Пояснение. Для набора 12 значений x и y после этих букв следует нажать одновременно две клавиши на клавиатуре компьютера Shift и Ж (или ;, или ;, которые расположены на одной клавише).

После появления знака присваивания вида := следует вызвать падающее меню из командной строки MathCad Матрицы.

Далее надлежит установить/назначить количество строк 1, а количество столбцов 12. После этого в появившихся круглых скобках вводить имеющиеся числовые значения.

После завершения ввода всей информации очертить курсором всё содержимое, стоящее в круглых скобках, и в выпавшем меню Матрицы нажать указатель M^T .

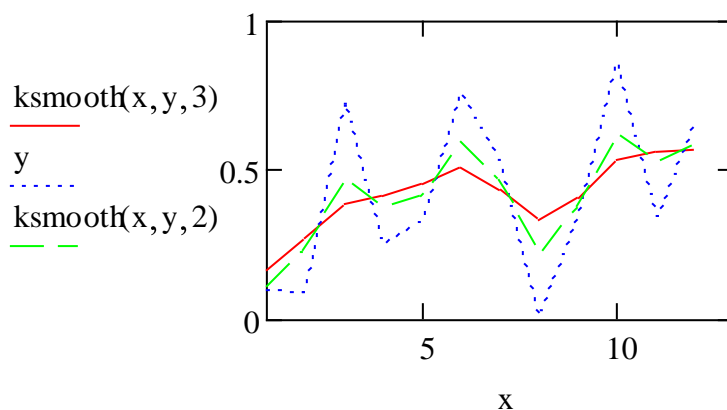


Рис. 13. Укрупнённое сглаживание с помощью функции ksmooth

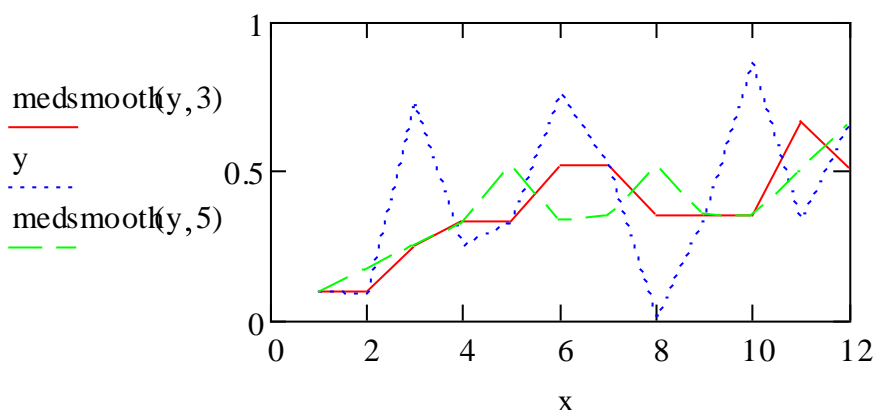


Рис. 14. Сглаживание «бегущими медианами»

До общего анализа возможного характера изменения в динамике коэффициента трения и его влияния на оценку трибологических и иных количественных характеристик приведём ещё несколько прикладных примеров.

Для этого из того же литературного источника по трению, износу и смазке возьмём иную формулу по расчёту фактической площади касания $A_{\text{рск}}$ при скольжении микронеровности:

$$A_{\text{рск}} = (P_i / \text{НВ}) \cdot (1 + f^2)^{1/2},$$

где P_i – внешняя сила, действующая в сопряжении тело–контртело и создающая деформацию поверхностного слоя материала детали; НВ – твёрдость материала по Бринеллю; f – коэффициент трения.

Пример 2. Для построения графика (рис. 15) возьмём одну следующую строчку из приведённого фрагмента таблицы случайных чисел с равномерным видом распределения, а именно:

08 42 26 89 53 19 64 50 93 03 23 20 90 25 60 15 95 33 47 64.

Из графика на рис. 15 видно, что вершин превышения площади контакта над средней линией встретилось шесть раз, а занижений было порядка девяти раз.

$i := 1..20$

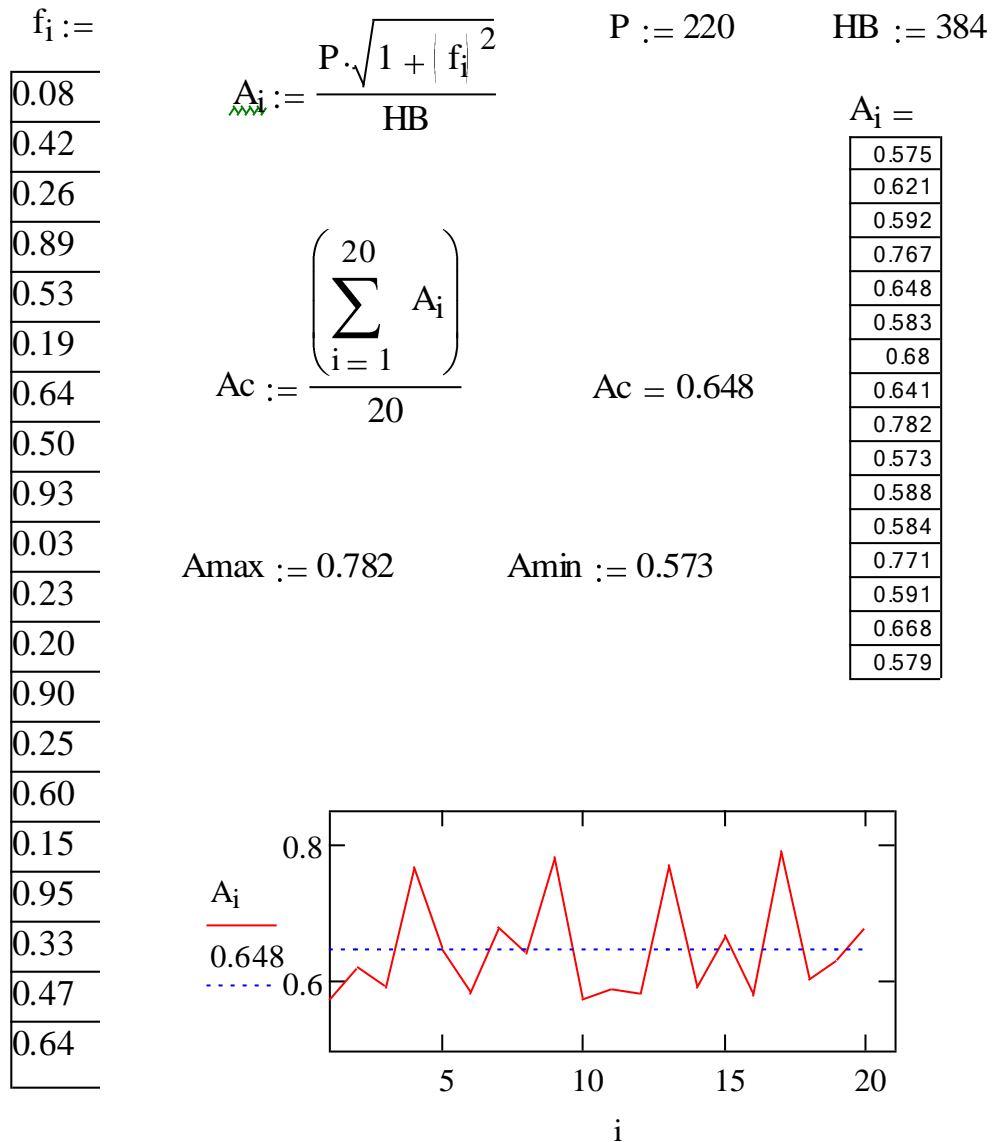


Рис. 15. Характер изменения фактической площади контакта (A_c – среднее значение; 0,782 – максимальное и 0,573 – минимальное) при изменении коэффициента трения f

Пример 3. По аналогичной схеме проанализируем иную известную формулу по определению силы запрессовки F детали для выбранной посадки:

$$F = \pi d l p f,$$

где d – посадочный диаметр; l – длина посадочной поверхности; p – давление от максимального натяга выбранной посадки; f – коэффициент трения при прессовании.

Для расчёта силы запрессовки возьмём следующую строку из таблицы случайных чисел, которую используем для подстановки в коэффициент трения:

99 01 90 25 29 09 37 67 07 15 38 31 13 11 65 88 67 67 43 97.

При этом значения f_i (в столбик, как это показано ранее) не приводим для экономии места. Итоговый график показан на рис. 16.

$$i := 1..20 \quad d := 30 \quad l := 35 \quad p := 60$$

$$F_i := \pi \cdot d \cdot l \cdot p \cdot f_i$$

$$F_c := \frac{\sum_{i=1}^{20} F_i}{20} \quad F_c = 8.897 \times 10^4$$

$$F_{\max} := 1.959 \cdot 10^5$$

$$F_{\min} := 1.385 \cdot 10^4$$

$F_i =$

1.959·10 ⁵
1.979·10 ³
1.781·10 ⁵
4.948·10 ⁴
5.74·10 ⁴
1.781·10 ⁴
7.323·10 ⁴
1.326·10 ⁵
1.385·10 ⁴
2.969·10 ⁴
7.521·10 ⁴
6.136·10 ⁴
2.573·10 ⁴
2.177·10 ⁴
1.286·10 ⁵
1.742·10 ⁵

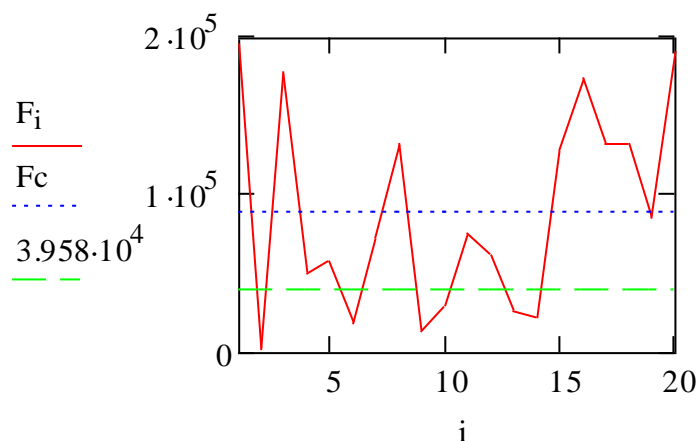


Рис. 16. График изменения силы запрессовки F_i при переменной величине коэффициента трения f_i и среднее значение F_c

В книге рекомендовано в расчёт принимать коэффициент трения 0,20. Если подставить это значение в приведённую формулу, то получаем следующее значение силы запрессовки:

$$\pi \cdot 30 \cdot 35 \cdot 60 \cdot 0.2 = 3.958 \times 10^4 .$$

Данная конечная величина не является здесь неким средним значением, но при потенциально возможных производственных колебаниях по коэффициенту трения следует этот факт учитывать. В любом случае величина коэффициента трения не будет постоянной, что приводит к рывкам в запрессовке колёс на ось, к возможным локальным перенапряжениям материала и даже к незначительным повреждениям сопрягаемых поверхностей.

Пример 4. Проанализируем формулу для анализа изменения работы W сил трения при вертикальном движении тела вдоль направляющего бруска:

$$W = Gl / (1 - f \operatorname{tg} \alpha),$$

где G – сила тяжести от массы перемещаемого груза/тела; l – путь перемещения тела; F – сила, действующая на перемещаемое тело, под углом $\alpha = 18^\circ$; f – коэффициент трения скольжения, обычно принимают равным 0,2.

Как и в предыдущих примерах, решение задачи выполним в компьютерной оболочке MathCad. Значения по возможной вариации коэффициента трения возьмём, как и ранее, из случайных чисел с равномерным законом распределения (из последней строки):

12 80 79 99 70 80 15 73 61 47 64 03 23 66 53 98 95 11 68 77.

Напомним, что вводимая в алгоритм расчёта величина $h=0,017453$ обеспечивает перевод градусов в радианы.

Итоговый график показан на рис. 17.

$i := 1..20$

$\alpha := 18$ $G := 390$ $l := 4$ $h := 0.017453$

$f_i :=$

0.12
0.80
0.79
0.99
0.70
0.80
0.15
0.73
0.61
0.47
0.64
0.03
0.23
0.66
0.53
0.98
0.95
0.11
0.68
0.77

$$W_i := \frac{G \cdot l}{1 - f_i \cdot \tan(\alpha \cdot h)}$$

$$W_{\max} := 2.289 \cdot 10^3$$

$$W_{\min} := 1.575 \cdot 10^3$$

$$f_c := 0.587 \quad \tan(18 \cdot h) = 0.325$$

$$W_c := 1.954 \cdot 10^3$$

$W_i =$

1.623·10 ³
2.108·10 ³
2.099·10 ³
2.3·10 ³
2.019·10 ³
2.108·10 ³
1.64·10 ³
2.045·10 ³
1.946·10 ³
1.841·10 ³
1.97·10 ³
1.575·10 ³
1.686·10 ³
1.986·10 ³
1.885·10 ³
2.289·10 ³

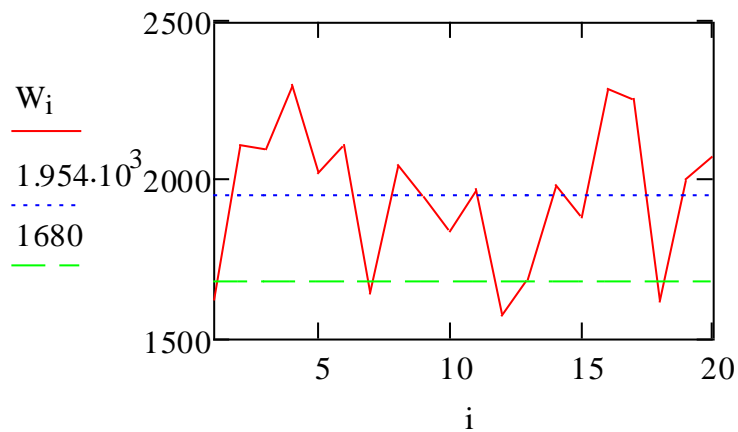


Рис. 17. Результат расчёта затрачиваемой работы W_i на перемещение тела при переменных значениях коэффициента трения f_i

Величина f_c – среднее значение коэффициента трения из используемых данных; W_c – среднее значение работы в приводимом расчёте; $W = 1680$ – значение работы при фиксированном коэффициенте трения $f = 0,2$

Пример 5. С учётом приводимых ниже дополнительных пояснений покажем заметное различие в расчётах момента сил трения при относительном вращательном движении элемента пары трения, используя формулу

$$M_T = fNr,$$

где N – нагрузка (или ответная реакция) в сопряжении кинематической пары; r – радиус вкладыша подшипника или самого вала.

Используем программу в оболочке MathCad и построим график (рис. 18).

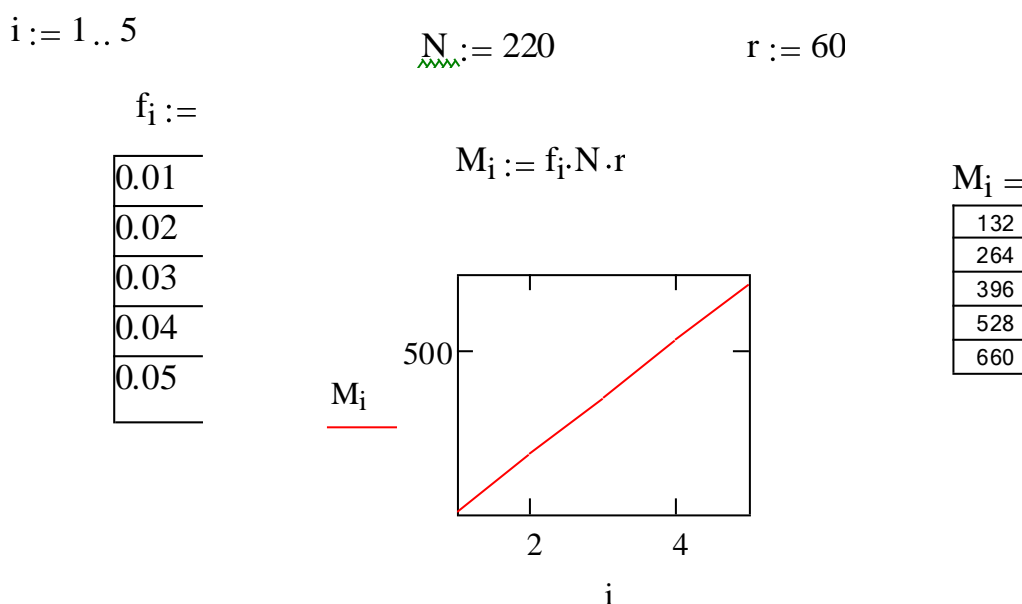


Рис. 18. Заметные изменения момента сил трения M_i (132–660) при возможных значениях коэффициента трения f от 0,01 до 0,05

В книге «Теория механизмов и машин» (авторы: В.А. Юдин, Л.В. Петрокас) даны сведения о колебаниях и значениях коэффициентов трения:

– при полужидкостном трении у металлической пары со смазкой маслом – 0,01...0,05;

– при жидкостном трении у металлической пары со смазкой маслом и для пары трения металл–текстолит или древесная пластмасса в условиях хорошей смазки – 0,002...0,006;

– при жидкостном трении у пары металл–пластмасса со смазкой водой – 0,004...0,008.

В итоге видим возможный размах варьирования для коэффициента трения двух-, трёх- и даже пятикратный! Что требует учёта в расчётах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 223 с.

2. Войнов К.Н. Трибология и робототехника: в вопросах и ответах. – СПб.: ПГУПС, 2007. – 134 с.

3. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) /Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

5. Трибология и надёжность / Сб. науч. трудов; Под ред. проф. К.Н. Войнова. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 266 с.

6. Трибология: Междунар. энцикл. Т. 1 / Под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: Краснодар, АНИМА, 2010. – 176 с.

7. Трибология: Междунар. энцикл. Т. II / Под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: Краснодар, АНИМА, 2011. – 176 с.

8. Трибология: Междунар. энцикл. Т. V / Под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: ПГУПС, 2013. – 378 с.

9. Трибология: Междунар. энцикл. Т. VI / Под ред. К.Н. Войнова. – СПб.: Нестор-История, 2013. – 404 с.

10. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. – М.: Мир, 1982. – 351 с.

Войнов Кирилл Николаевич

ТРИБОТЕХНИКА И НАДЁЖНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.2014. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 4,42. Печ. л. 4,75. Уч.-изд. л. 4,5
Тираж 170 экз. Заказ № С 73

НИУ ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49
ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

