

УДК 629.1

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СУДОВЫХ ЛЕБЕДОК: ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

Ивановская Александра Витальевна¹, доцент, кандидат технических наук, доцент
e-mail: invkerch@yandex.ru

Халявкин Алексей Александрович², доцент, кандидат технических наук, доцент
e-mail: sopromat112@mail.ru

¹ Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

² Каспийский институт морского и речного транспорта, Астрахань, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены перспективные направления повышения надежности судовых лебедок как ответственных элементов палубного, грузоподъемного, буксирного, тралового и швартовного оборудования. Обоснована необходимость перехода от традиционного регламентного технического обслуживания к риск-ориентированной и предиктивной модели эксплуатации, основанной на диагностике фактического состояния узлов.

Ключевые слова: судовая лебедка, надежность, подшипниковый узел, траловая лебедка, вибродиагностика, автоматизированное управление, предиктивное обслуживание.

PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF SHIP WINCHES: FROM THEORY TO PRACTICE

Alexandra V. Ivanovskaya¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: invkerch@yandex.ru

Alexey A. Khalyavkin², Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: sopromat112@mail.ru

¹ Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

² Caspian Institute of Marine and River Transport, Astrakhan, Russia

Abstract. The article discusses promising ways to improve the reliability of ship winches as critical components of deck, lifting, towing, trawling, and mooring equipment. It substantiates the need to transition from traditional routine maintenance to a risk-based and predictive maintenance model based on the actual condition of the components.

Keywords: marine winch, reliability, bearing unit, trawl winch, vibration diagnostics, automated control, predictive maintenance.

Судовые лебедки относятся к числу наиболее нагруженных механизмов палубного оборудования. Они применяются при швартовных операциях, буксировке, постановке и выборке тралов, выполнении грузовых операций, подъеме исследовательского оборудования, работе с кабелями, якорными системами и подводными объектами. В отличие от многих стационарных промышленных механизмов, судовая лебедка функционирует в условиях непрерывного воздействия морской среды, качки, вибрации корпуса, переменного натяжения каната, ударных нагрузок, солевого тумана, повышенной влажности и ограниченных возможностей технического обслуживания в рейсе.

Повышение надежности судовых лебедок приобретает особое значение в связи с ростом требований к безопасности морских операций, автоматизации судового оборудования, снижению простоев флота и увеличению межремонтного ресурса. Отказ лебедки может приводить не только к экономическим потерям, но и к аварийным ситуациям: обрыву каната, потере буксируемого объекта, повреждению палубного оборудования, травмированию персонала, нарушению технологического цикла промысла или спасательной операции.

Традиционный подход к обеспечению надежности судовых лебедок базировался преимущественно на расчетах прочности, выборе коэффициентов запаса и регламентном техническом обслуживании. Однако эксплуатационная практика показывает, что значительная часть отказов возникает не вследствие недостаточной статической прочности, а в результате накопления усталостных повреждений, износа, коррозионно-механического разрушения, ухудшения смазки, локального перегрева, нарушения соосности и неучтенной динамики нагружения. Это требует перехода к более совершенной методологии, в которой расчетная оценка ресурса дополняется экспериментальными исследованиями, непрерывным мониторингом, анализом данных и адаптивным управлением режимами работы [1-4].

Целью исследований является научно-техническое обоснование перспективных направлений повышения надежности судовых лебедок с учетом перехода от теоретических расчетных моделей к практическим инженерным решениям, применимым в условиях эксплуатации флота.

Для траловых, буксирных и исследовательских лебедок характерна нестационарность эксплуатационных режимов. В каждом из этих режимов по-разному нагружаются вал, подшипниковые узлы, тормоз, редуктор и привод. Поэтому надежность лебедки должна оцениваться не по одному номинальному режиму, а по совокупности эксплуатационных состояний.

Основными причинами снижения надежности судовых лебедок являются усталостное разрушение валов и элементов крепления, износ подшипников качения и скольжения, разрушение сепараторов подшипников, повреждение зубчатых передач редуктора, перегрев тормозных устройств, нарушение укладки каната, коррозия барабана и крепежных элементов, деградация смазочных материалов, попадание воды и абразивных частиц в узлы трения, а также ошибки оператора при управлении натяжением. В условиях морской эксплуатации эти факторы действуют одновременно, что усложняет диагностику и прогнозирование остаточного ресурса.

Следовательно, перспективное повышение надежности должно быть направлено не только на усиление конструкции, но и на управление процессом деградации. Это означает, что лебедка должна рассматриваться как объект жизненного цикла: проектирование, изготовление, монтаж, испытания, эксплуатация, мониторинг, ремонт, модернизация и вывод из эксплуатации должны быть связаны единой информационной моделью.

Надежность лебедки как технической системы может быть описана вероятностью безотказной работы



$$R(t) = P(T > t), \quad (1)$$

где $R(t)$ — вероятность безотказной работы до момента времени t , T — случайная величина времени до отказа. Функция отказов определяется выражением

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2)$$

Интенсивность отказов может быть записана в виде

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

где $(f(t))$ — плотность распределения времени до отказа.

Для судовых лебедок, работающих в условиях накопления повреждений, удобно применять распределение Вейбулла

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

где η — параметр масштаба, характеризующий ресурсный уровень системы, β — параметр формы, отражающий характер отказов. При $\beta < 1$ преобладают ранние отказы, при $\beta = 1$ интенсивность отказов приблизительно постоянна, а при $\beta > 1$ наблюдается стадия износа и усталостного накопления повреждений.

По мере эксплуатации происходит увеличение зазоров, ухудшение качества поверхностей трения, снижение вязкости загрязненной смазки, развитие питтинга, рост вибраций и появление усталостных трещин. Поэтому ресурсная оценка должна учитывать не только календарное время, но и фактическую нагруженность механизма.

При переменном нагружении важное значение имеет эквивалентная нагрузка. Если лебедка работает в нескольких режимах с нагрузками P_i и длительностями t_i , то эквивалентная нагрузка для подшипниковых узлов может быть определена как

$$P_{eq} = \left(\frac{\sum P_i^p t_i}{\sum t_i} \right)^{1/p}. \quad (5)$$

Данная зависимость показывает, что кратковременные перегрузки оказывают непропорционально сильное влияние на ресурс. Именно поэтому для судовых лебедок опасны не только длительные номинальные нагрузки, но и рывковые воздействия, возникающие при качке, зацеплении трала за грунт, изменении сопротивления буксируемого объекта или неравномерной укладке каната [5].

Для подшипников качения базовая расчетная долговечность может быть представлена выражением

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6 \quad (6)$$

где L_{10} — расчетная долговечность, соответствующая 90 % вероятности безотказной работы, млн оборотов; C — базовая динамическая грузоподъемность подшипника; P — эквивалентная динамическая нагрузка; p — показатель степени. В практических расчетах

долговечность уточняется с учетом надежности, качества смазки, загрязненности, температуры, условий монтажа и эксплуатационных факторов.

Если вместо подшипника качения применяется втулка скольжения, то расчетная оценка должна включать контактное давление:

$$p = \frac{F}{dl} \quad (7)$$

где F — радиальная нагрузка, d — диаметр вала, l — рабочая длина втулки.

Одним из основных критериев работоспособности втулки является произведение:

$$pv \leq [pv] \quad (8)$$

где $[pv]$ — допускаемое значение для выбранного материала при заданных условиях смазки и охлаждения. Для полимерных втулок дополнительно необходимо учитывать температурную зависимость твердости, влагопоглощение, ползучесть, изменение модуля упругости и возможное набухание материала.

Тепловой режим узла трения может быть оценен из условия баланса тепловыделения и теплоотвода

$$Q_{\text{тр}} = \mu Fv \quad (9)$$

$$Q_{\text{отв}} = \alpha A(T - T_0) \quad (10)$$

где μ — коэффициент трения, F — нагрузка, v — скорость скольжения, α — коэффициент теплоотдачи, A — площадь теплообмена, T — установившаяся температура узла, T_0 — температура окружающей среды. Условие устойчивого теплового режима имеет вид

$$Q_{\text{тр}} \leq Q_{\text{отв}} \quad (11)$$

Если тепловыделение превышает теплоотвод, начинается рост температуры, снижение вязкости смазки, ускорение износа и увеличение вероятности отказа.

Альтернативным направлением повышения надежности судовых лебедок является применение втулок скольжения, в том числе из бронзы, капролона, наполненных полиамидов, композитных материалов и самосмазывающихся полимерных систем [6-7]. Втулки скольжения обладают более высокой демпфирующей способностью, лучше воспринимают ударные нагрузки, проще по конструкции и могут работать при ограниченной смазке. Однако их применение требует обязательной проверки по контактному давлению, скорости скольжения, температурному режиму, износу и стабильности размеров в условиях увлажнения.

Для капролоновых втулок перспективность связана с низким коэффициентом трения, коррозионной стойкостью, малой плотностью, технологичностью изготовления и способностью частично компенсировать ударные нагрузки за счет упругодемпфирующих свойств материала. Ограничивающими факторами являются снижение механических характеристик при повышении температуры, влагопоглощение, ползучесть и необходимость соблюдения монтажных зазоров. Поэтому применение капролоновой втулки в судовой лебедке должно подтверждаться расчетом и экспериментальными испытаниями.



Также перспективным направлением повышения надежности является переход к диагностике фактического состояния. Для судовых лебедок целесообразно контролировать натяжение каната, крутящий момент на валу, частоту вращения барабана, температуру подшипников, вибрацию опор, давление в гидросистеме, ток электропривода, положение тормоза, длину вытравленного каната, скорость выборки, состояние смазки и параметры окружающей среды.

Вибродиагностика позволяет выявлять дисбаланс, несоосность, ослабление креплений, дефекты подшипников, повреждения зубчатых передач и развитие ударных процессов. Температурный мониторинг подшипниковых узлов позволяет выявлять нарушение смазки, рост трения, перекосы и перегрузку. Анализ характеристик приводного двигателя может использоваться как косвенный метод оценки механической нагрузки, поскольку увеличение сопротивления вращению отражается в изменении потребляемой мощности. Для гидравлических лебедок информативными параметрами являются давление, расход, температура рабочей жидкости и пульсации давления.

Прогноз остаточного ресурса может строиться на основе эмпирических моделей деградации, статистики отказов, распределения Вейбулла, методов машинного обучения и цифровых двойников. При этом важно, чтобы модель была не только математически точной, но и инженерно интерпретируемой. Оператор и механик должны понимать, какой узел находится в зоне риска и какие действия необходимо выполнить.

Надежность лебедки зависит не только от конструкции, но и от режима управления. Резкие пуски, торможения, рывки каната и превышение допустимого натяжения резко ускоряют накопление повреждений. Поэтому перспективным направлением является внедрение автоматизированных систем управления, обеспечивающих ограничение натяжения, плавный пуск, адаптивное торможение, компенсацию качки и защиту от перегрузки.

Для буксирных и траловых лебедок важной задачей является поддержание допустимого натяжения каната

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) \quad (12)$$

где T_0 — среднее натяжение, $T(t)$ — переменная динамическая составляющая. Система управления должна не только ограничивать максимальное значение $T(t)$, но и снижать амплитуду колебаний $T(t)$. Это может быть достигнуто за счет регулирования скорости барабана, применения гидравлического демпфирования, активной компенсации вертикальных перемещений судна и адаптивных алгоритмов управления.

В перспективе наиболее эффективными являются системы, объединяющие датчики натяжения, датчики длины вытравленного каната, информацию о скорости судна, параметрах качки, глубине буксируемого объекта и состоянии привода. На основе этих данных система может прогнозировать изменение нагрузки и корректировать режим работы до возникновения опасной перегрузки.

Цифровой двойник представляет собой расчетно-информационную модель лебедки, которая обновляется на основе фактических эксплуатационных данных. В отличие от статической расчетной модели, цифровой двойник позволяет учитывать реальную историю нагрузок, температур, вибраций, ремонтов и замен деталей.

Для судовой лебедки цифровой двойник может включать механическую модель вала и барабана, модель подшипниковых узлов, модель канатно-барабанного взаимодействия, модель привода, модель тормоза и диагностический модуль. В результате становится возможным прогнозировать остаточный ресурс не по усредненным нормативам, а по фактической нагруженности конкретного механизма.



Практическое внедрение мероприятий по повышению надежности должно выполняться поэтапно:

1. проводится технический аудит лебедки: анализ конструкции, условий эксплуатации, истории отказов, режимов нагружения, качества обслуживания и состояния основных узлов;

2. формируется карта критических элементов: вал, барабан, подшипниковые узлы, редуктор, тормоз, канат, привод, крепления и система управления;

3. выполняются расчетные проверки: прочность вала, долговечность подшипников, контактные давления во втулках, тепловой режим, ресурс зубчатых передач, надежность тормозной системы и нагрузка на фундаментные крепления;

4. устанавливаются диагностические параметры и предельные значения: допустимая температура подшипников, уровень вибрации, максимальное натяжение каната, допустимое давление в гидросистеме, предельный износ втулки, минимальный диаметр каната и критерии браковки;

5. внедряется система мониторинга, включающая датчики, регистратор данных и программный модуль анализа;

6. проводится опытная эксплуатация с накоплением статистики;

7. корректируются расчетные модели, регламенты обслуживания и алгоритмы управления.

Такой подход позволяет перейти от формального ремонта по графику к управлению надежностью на основе фактического состояния.

Заключение

Надежность лебедки не может оцениваться только по прочности отдельных деталей, поскольку в реальных условиях эксплуатации отказ формируется в результате совместного действия переменных нагрузок, вибраций, износа, коррозии, нестационарного трения, ошибок управления, ухудшения смазочного режима и человеческого фактора. Поэтому возникает необходимость перехода от традиционного регламентного технического обслуживания к риск-ориентированной и предиктивной модели эксплуатации, основанной на диагностике фактического состояния узлов. Предлагаемый практический алгоритм внедрения мероприятий по повышению надежности судовых лебедок может применяться от этапа анализа отказов до опытной эксплуатации и корректировки нормативов технического обслуживания.

Список литературы:

1. Башуров Б.П., Скиба А.Н., Чебанов В.С. Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие. Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2009. 192 с.

2. Ивановская А.В., Виноградов В.Н., Ивановский А.Н. Оценка безотказности работы судовых грузоподъемных устройств // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий: Сборник материалов II Всероссийской конференции, Казань, 09–10 декабря 2024 года. Казань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 180-184.

3. Ивановская А.В., Клименко Н.П., Попов В.В. Статистический анализ отказов элементов палубного оборудования рыбопромыслового судна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 3. С. 440-448. – DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.



4. Ивановская А.В., Жуков В.А., Шустряков Н.А. Тенденции развития и современные методы проектирования грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2024. Т. 16, № 3. С. 444-455. – DOI 10.21821/2309-5180-2024-16-3-444-455.
5. ГОСТ 18855-94 (ИСО 281-89) Подшипники качения динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). М. Стандартиформ, 2009. 26 с.
6. Халявкин А.А., Санжапов А.Р., Матвеев Ю.И. [и др.] Повышение надежности дейдвудных подшипников путем лазерной наплавки гребного вала // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. 2024. № 3. С. 42-48.
7. Ивановская А. В., Халявкин А. А., Борозняк А. В., Шаповал В. В. Комплексный подход к оценке влияния стохастических факторов на процессы износа подшипников траловых лебедок // Научные проблемы водного транспорта. – 2025. – № 83. – С. 75-85

