

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО СИСТЕМЕ ИЗ ДВУХ ТИПОВ ОТКАЗОВ

Водка А.А., аспирант, Ларин А.А. к.т.н., доц.,
Трубаев А.И., к.т.н., доц.

Национальный технический университет «ХПИ»

В работе рассматривается построение вероятностных моделей прогнозирования надежности и оценки ресурса болтовых соединений по двум факторам: усталостной прочности и раскрытию стыка. Оценка усталостной прочности выполнена с учетом случайно характера частоты нагружения и деградации материала.

Введение. Резьбовые (в частности болтовые) соединения является одним из наиболее распространенных способов разборного соединения деталей машин. Среди характеристик резьбовых соединений одной из наиболее важных является надежность, поскольку именно она определяет показатели работоспособности механической системы или машины в целом.

Отдельного внимания заслуживают вопросы обеспечения надежности резьбовых соединений рабочих колес гидроагрегатов (ГА) большой мощности. Соответствующие крепления уникальны, имеют значительные габаритные размеры, нестандартную конструкцию и работают в условиях значительных предыдущих затяжек, реализуемых специальными технологическими средствами. Эксплуатация болтовых соединений гидротурбин связана с рядом особенностей: наличием коррозионной среды (воды); существенной предварительной затяжкой; значительными напряжениями, возникающими на переходных режимах вследствие действия крутящего момента и динамического гидравлического усилия на валу турбины.

Следует отметить, что гидротурбины широко используются в процессе регулирования потребления электроэнергии во время суточных пиков за счет быстрого запуска ГА и выхода его на рабочий режим. В свою очередь, это приводит к росту количества запусков / остановок. Именно большое количество переходных режимов, а также агрессивная внешняя среда приводят к отказам болтовых соединений, которые, чаще всего, носят постепенный характер и вызваны коррозионно-усталостными процессами.

Проектный срок эксплуатации болтовых соединений гидротурбин составляет не менее 30 лет. За это время в материале, из которого изготовлены резьбовые соединения, происходят процессы, приводящие к изменению механических характеристик. Такие процессы, как правило,

носят случайный характер, именно это обуславливает необходимость разработки новых вероятностных моделей накопления повреждаемости для оценки ресурса болтовых соединений при многоцикловой усталости.

Цель работы. Разработка подхода к прогнозированию надежности болтовых соединений на основе подробных КЭ моделей с учетом случайного изменения параметров нагружения, а также процесса деградации стали является актуальной научно-практической проблемой, определяющей цель данной статьи.

Постановка задачи. В данной работе рассматривается прогнозирование ресурса в результате отказов много-цикловой усталости и по отказам типа раскрытие стыка болтового соединения. Ресурс определяется по степени накопления нелокализованной повреждаемости. Применяется классический степенной закон кинетики накопления усталостной повреждаемости в рамках концепции эффективных напряжений Работнова-Качанова:

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma_a}{1-D}, \quad (1)$$

где σ_a – амплитудные напряжения цикла, $D(t)$ – функция меры повреждаемости

Таким образом, кинетика роста повреждаемости описывается уравнением [1,2]:

$$\frac{d}{dt} D = B(\tilde{\sigma}_a)^c = B\left(\frac{\sigma_a}{1-D}\right)^c, \quad (2)$$

где t – время, B и c – константы кинетического уравнения, которые определяются экспериментально и в общем случае зависят от усталостных свойств материала и могут быть выражены через параметры кривой Веллера.

При этом, уравнение (2) может быть выписано в виде

$$\frac{d}{dt} D = \left(\frac{\sigma_a}{1-D}\right)^m \cdot \frac{\omega}{N_0 \cdot \sigma_{-1}^m \cdot (m+1)}, \quad (3)$$

где ω – частота цикла изменения напряжений (деформаций) во время работы шины, N_0 – базовое число циклов до разрушения, m – параметр кривой Веллера, σ_{-1} – предел усталости.

Критерием отказа в рамках данного рассмотрения будет условие равенства единице параметра повреждаемости $D(t)$. Исходя из выражения (1) достижение граничного значения будет означать нарушение сплошности материала, т.е. возникновение макро трещины. Соответственно, ресурс в данной работе трактуется как время до зарождения в конструкции макроскопической усталостной трещины.

С другой стороны, отказом является раскрытие стыка при недостаточной затяжке болтового соединения. Поэтому, вторым видом отказа

считается превышение силы в стыке усилия затяжки.

Характеристики нагружения. Уравнение (3) описывает накопление усталостной повреждаемости во времени при циклическом изменении напряжений. Таким образом, важной составляющей в решении задачи определения ресурса болтового соединения, является определение параметров цикла изменения напряжений в конструкции шины, которые определяются: амплитудой напряжений (σ_a) и частотой цикла (ω), формирующимися под действием эксплуатационных нагрузок. Основной циклической нагрузкой болтовое соединение является цикл изменения напряжений при запуске/остановке гидротурбины. Основные характеристики частоты запусков/остановок как стационарного случайного процесса приведены в табл. 1, а типовые реализации показаны на рис. 1.

Задание частоты изменения цикла напряжений в болтовом соединении как случайного стационарного процесса требует определения корреляционной функции. Достоверное определение последней достаточно затруднено, поэтому на практике имеет смысл априорно постулировать вид корреляционной функции, и определять только ее параметры.

Таблица 1. Значения статистических параметров функции $\omega(t)$

Параметр	$\langle \omega \rangle$, місяц ⁻¹	$Var[\omega]$, місяц ⁻²	V_ω
Значение	32,67	158,97	0,38

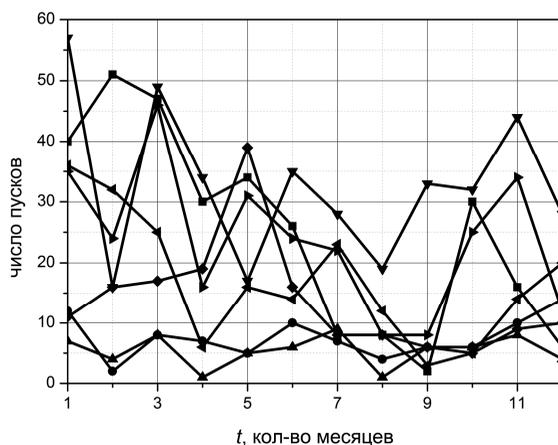


Рис. 1. Статистики по числу пусков гидроагрегатов ДнепроГЭС-II за 2011 г.

В данной работе предлагается воспользоваться в качестве такой аппроксимации экспоненциальным законом, параметрами которого являются дисперсия (σ_ω^2) и интенсивность (λ_ω) частоты возникновения опасного режима

$$K_{\omega}(t_1, t_2) = \sigma_{\omega}^2 \cdot \exp(-\lambda_{\omega} \cdot |t_2 - t_1|) \quad (4)$$

Параметр интенсивности определяется исходя из времени корреляции, т.е. промежутка времени за который предполагается исчезающим статистическое влияние частоты возникновения опасного режима имевшей место к моменту времени t_1 на частоту возникновения этого режима к моменту времени t_2 . Таким образом, время корреляции может быть задано исходя из особенностей эксплуатации конструкции или для стационарного случайного процесса вычислено по формуле:

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \int_0^{\infty} K(\tau) d\tau, \quad \tau = t_2 - t_1 \quad (5)$$

Таким образом, задавшись временем корреляции для частоты возникновения опасного режима и учитывая принятый вид корреляционной функции, можно определить интенсивность частоты возникновения опасного режима:

$$\lambda_{\omega} = \frac{1}{\tau_{\text{ок}}} \quad (6)$$

Построение трехмерной конечно-элементной модели болтового соединения расчет НДС. Для определения значений амплитуд напряжений цикла предлагается в данной работе воспользоваться конечно-элементным (КЭ) моделированием. В работе были построены подробные КЭ модели, которые учитывают контактное взаимодействие между фланцем вала, корпусом рабочего колеса и болтом. На рис.2 показаны распределения эквивалентных напряжений по болту, а на рис.3 приведены зависимость эквивалентных напряжений в точке максимума во время работы ГА.

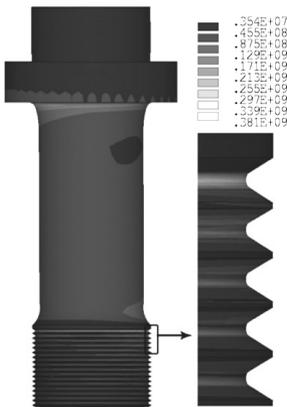


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по болту

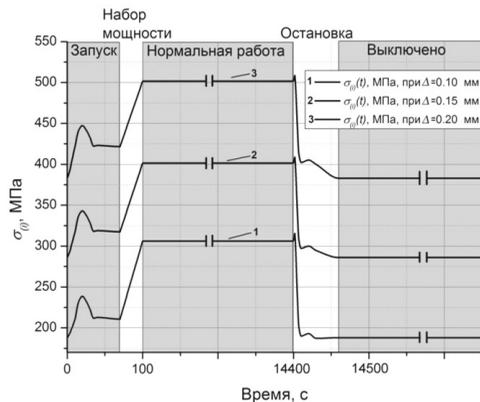


Рис. 3. График изменения напряжений во время работы ГА

Моделирование деградации свойств материала в результате старения резины. Прямое применение формулы (3) для средних значений частоты цикла и амплитуд напряжений приводит к завышенному по сравнению с имеющимися на практике статистическими данными значению ресурса. Последнее обстоятельство связано с не учетом процессов естественного старения. Для моделирования процесса деградации в данной работе предлагается использовать зависимость вида:

$$\sigma_{-1}(t) = \sigma_{-1}^* \cdot \varphi(t), \quad \varphi(t) = \left[\beta_1 - \frac{\beta_1}{\beta_2 + \beta_3 \cdot t^p} \right], \quad (7)$$

где p, β_i – параметры аппроксимации, σ_{-1}^* – предел усталостной прочности для не деградированного материала.

В работе полагается, что предел усталости представляет собой произведение нормированной к единице функции времени, аппроксимирующей процесс деградации $\varphi(t)$ и значения предела усталости в начальный момент времени, являющейся случайной величиной, которая предполагается подчиняющейся логарифмически-нормальному закону распределения плотности вероятности с параметрами s и μ , которые определяются из значений математического ожидания и дисперсии или коэффициента вариации предела усталости

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{-1}^* \rangle &= \exp\left(\mu + \frac{s^2}{2}\right), \\ \text{Var}[\sigma_{-1}^*] &= \left[\exp(s^2) - 1 \right] \cdot \langle \sigma_{-1}^* \rangle^2, \\ V_{\sigma_{-1}^*} &= \frac{\sqrt{\text{Var}[\sigma_{-1}^*]}}{\langle \sigma_{-1}^* \rangle} = \left[\exp(s^2) - 1 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, изменение предела усталости представляет собой случайный нестационарный процесс. Одномерная плотность вероятности этого процесса представляется, как линейное функциональное преобразование случайной величины σ_{-1}^* и имеет вид:

$$f(\sigma_{-1}, t) = \frac{1}{\sigma_{-1} s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left[\frac{\ln(\sigma_{-1}) - \mu - \ln \varphi(t)}{\sqrt{2}s}\right]^2\right) \quad (9)$$

Прогнозирование усталостной надежности. Из выше отмеченного выходит, что процессы накопления усталости в болтовых соединениях могут быть описаны уравнением (3) с учетом того, что частота цикла изменения напряжений и характеристики длительной прочности (предел усталости) изменяются во времени как случайные процессы, то задача оценки ресурса сводится к проблеме определения вероятностных характеристик повреждаемости как случайной функции времени заданной дифференциальным уравнением со случайной правой частью.

Решение данной математической задачи подробно описано в [1, 2]. Результатом решения является одномерная плотность вероятности заданная как функция времени и повреждаемости следующим выражением

$$f_D(D, t) = \frac{(m+1)(1-D)^m}{\sqrt{2\pi Var[U(t)]}} \exp\left(-\frac{(1-(1-D)^m - \langle U(t) \rangle)^2}{2Var[U(t)]}\right) \quad (10)$$

В котором присутствуют функции времени, являющиеся вероятностными характеристиками дополнительно введенной стационарной случайной функции $U(t)$: ее математическое ожидание $\langle U(t) \rangle$ и среднеквадратичное отклонение $Var[U(t)]$. Данные характеристики имеют квадратные формулы полученные в [1, 2].

Из плотности вероятности (10) можно определить вероятность безотказной работы (11) и ресурс и дисперсию ресурса (12) болтового соединения по усталости.

$$P(t) = \Pr[D(t) \in [0;1]] = \int_0^1 f_D(D, t) dD; \quad q(t) = -\frac{d}{dt} P(t); \quad (11)$$

$$\langle T_r \rangle = \int_0^\infty tq(t) dt; \quad Var[T_r] = \int_0^\infty (t - \langle T_r \rangle)^2 q(t) dt \quad (12)$$

Для случая раскрытия стыка необходимо определить вероятность превышения усилия в стыке критической величины $P_{кр}$. Вводится гипотеза, что действующие усилия в стыке подчиняется экспоненциальному закону распределения плотности вероятности.

На рис.5 показаны графики ресурсов болтового соединения по усталости и условию раскрытия стыка. Из графика видно, что равный ресурс болтового соединения по двум критериям достигается при $\delta = 0,23$ мм.

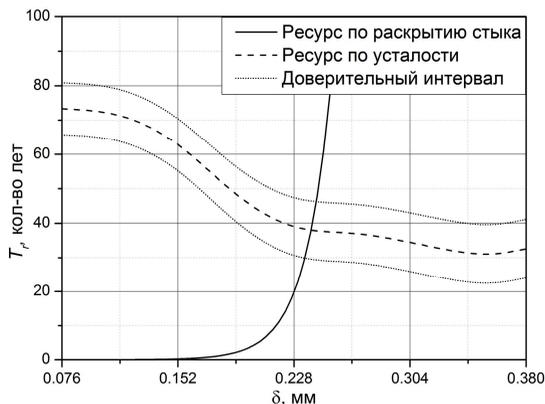


Рис.4. Графики зависимостей ресурса болтового соединения по усталости и по раскрытию стыка

Выводы. В работе дана оценка ресурса болтового соединения по двум критериям работоспособности конструкции. Определены рациональные уровни затяжки болтового соединения исходя из условия равенства ресурса.

Список использованных источников

1. Vodka O. O. The fatigue life-time propagation of the connection elements of long-term operated hydro turbines considering material degradation / O.O. Larin, O.I. Trubayev, O.O. Vodka // PNRPU Mechanics Bulletin. – Perm: Perm National Research Polytechnic University.–2014.–№1. – С. 164–190.
2. Водка А. А. Прогнозирование ресурса конструкций при многоцикло-вой уста-лости с учетом деградации свойств материала / А.А. Ларин, А.А. Водка // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».–Харків: НТУ«ХПІ».–2012.–№67.– С.67–77.

Анотация

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ ЗА СИСТЕМОЮ З ДВОХ ТИПІВ ВІДМОВ.

Водка О.О., Ларін О.О., Трубаєв О.І.

У роботі розглядається побудова імовірнісних моделей прогнозування надійності та оцінки ресурсу болтових з'єднань за двома чинниками: втомної міцності і розкриттю стику. Оцінка втомної міцності виконана з урахуванням випадково характеру частоти навантажування і деградації матеріалу.

Abstract

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE BOLTED CONNECTION BY THE SYSTEM OF TWO KINDS OF FAILURE.

Vodka O.O., Larin O.O., Trubayev O.I.

Paper deal with the development of probabilistic models for predicting the reliability and life-time estimation of bolting connection by two factors types: the fatigue strength of the joint and connection disclosure. Fatigue strength forecast is made taking into account the stochastic nature of the loading frequency and material degradation.