

К. В. Сызранцева, В. Н. Ильиных, Д. С. Колбасин*

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: denis2801@bk.ru*

Аннотация. Элементы бурового оборудования в процессе эксплуатации подвергаются случайным нагрузкам с весьма высокими амплитудами. Классические методы вероятностного расчета зубчатых передач не позволяют оценить вероятность их отказа с учетом реальных эксплуатационных данных, полученных с помощью телеметрии, в случае, когда эти данные не могут быть описаны стандартными законами распределения. Предлагаемая методика основана на применении методов непараметрической статистики, поэтому свободна от данных ограничений. Все ее этапы реализованы в математическом процессоре MathCad.

В данной работе описана методика оценки вероятности отказа зубчатой передачи привода системы верхнего привода буровой установки по критерию изгибной выносливости зубьев. Результаты ее реализации для оценки вероятности отказа передачи при ее эксплуатации в тяжелом режиме нагружения хорошо согласуются со статистикой отказов. Также методика позволяет определить вероятность отказа зубчатой передачи для любых, в том числе заданных выборкой законов распределения нагрузки, действующей на привод в процессе его эксплуатации.

Ключевые слова: буровая установка; система верхнего привода; зубчатая передача; изгибная выносливость; вероятность отказа; непараметрическая статистика

**Assessing the failure probability of gearhead of drilling rig top drive system
taking into account the mode of its operation**

Ksenia V. Syzrantseva, Vitaly N. Il'inykh, Denis S. Kolbasin*

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: denis2801@bk.ru*

Abstract. Elements of drilling equipment are subjected to random loads with very high amplitudes during operation. Classical methods of probabilistic calcula-

tion of gearings don't allow us to estimate the probability of their failure taking into account the real operational data obtained by telemetry when these data cannot be described by standard distribution laws. The offered technique is based on application of methods of non-parametric statistics therefore it is free from these restrictions. All its stages are realized in the Mathcad mathematical processor.

The article describes the technique of failure probability of gearing of drilling rig top drive system in accordance with criterion of bending endurance of teeth. Results of its realization for failure probability assessment of gearing at its operation in the heavy loading mode agree well with failure statistics. Also, the technique allows us to determine the probability of gearing failure for any load distribution laws during operation, including, when the loading mode is defined by sample.

Key words: drilling rig; top drive system; gearing; bending endurance; failure probability; non-parametric statistics

Введение

Быстрый темп нашего времени, растущая потребность в нефтепродуктах, сложное расположение нефтегазоносных залежей создают условия для развития инновационных технологий, позволяющих сократить время и расходы на строительство скважин для добычи нефти и газа.

На сегодняшний день высокоэффективными технологиями мирового уровня являются системы верхнего привода (СВП), обеспечивающие выполнение целого ряда технологических операций, связанных с безаварийным строительством наклонно направленных, вертикальных и горизонтальных скважин, что в свою очередь позволяет сократить время и затраты при бурении [1, 2]. СВП представляет собой подвижный вращатель, который оснащен комплексом средств механизации спускоподъемных операций. СВП дает возможность задать и обеспечить величину крутящего момента и частоты вращения, их измерение и вывод показаний на дисплей шкафа управления; тормозить бурильную колонну, удерживать ее в заданном положении, плавно снимать реактивный момент; производить спуск обсадных труб в зонах осложнений за счет вращения и промывки; герметизировать внутритрубное пространство двумя шаровыми кранами (гидравлический и механический), что позволяет снизить вероятность выброса из скважины через бурильную колонну; производить свинчивание/развинчивание бурильных труб [3, 4]. Все это позволяет повысить точность проводки скважины при направленном бурении, сократить время процесса наращивания, что уменьшает вероятность прихвата. Основными производителями СВП являются такие фирмы, как «National Oilwell Varco (NOV)», «Bentec», «Canrig», «TESCO», из отечественных фирм — «ПромТехИнвест» (в настоящее время ОАО «Электромеханика») и ООО «Уралмаш НГО Холдинг».

В России эксплуатируется более 400 систем верхнего привода грузоподъемностью от 160 до 500 т, в основном иностранного производства. «ПромТехИнвест» занимается проектированием, разработкой и производством СВП с 2003 года. Имеет линейку моделей СВП грузоподъемностью от 80 до 320 тонн. Одним из самых востребованных является привод ПВЭГ-225 грузоподъемностью 250 т (рис. 1). «ПромТехИнвест» был единственным отечественным производителем систем верхнего привода, но в 2014 году «Уралмаш» презентовал СВП 320 ЭЧР грузоподъемностью 320 т, с электрическим частотно-регулируемым приводом переменного тока. Таким образом, в России два произ-

водителя СВП, что говорит о заинтересованности развития отечественного машиностроения в данном направлении и наличии интереса буровых компаний к системе верхнего привода.

Сложная конструкция СВП требует особого внимания как на этапе проектирования и изготовления, так и на этапе эксплуатации. Вывод из строя СВП при бурении означает огромные затраты на ремонт самой СВП и непродуктивное время буровой установки и на не законченное в срок строительство скважины. Наиболее тяжким может быть прихват инструмента в открытом стволе скважины, что означает дорогостоящие аварийные работы.

Поскольку надежность редуктора является одним из существенных факторов надежности всей системы буровой установки, уточнение методики оценки вероятности его отказа является для нефтегазовой отрасли весьма актуальной задачей.

Объект и методы исследования

В работе [5] приведены особенности расчета деталей редуктора привода СВП на долговечность, заключающиеся в широком диапазоне изменения величины внешней эксплуатационной нагрузки от начальной до конечной: на порядок выше, чем у традиционных приводов. Там же указано, что в 90 % случаев отказ редукторов СВП определяется изгибной выносливостью зубьев передачи. Приведена статистика отказов, согласно которой 18 редукторов вышли из строя по причине усталостной поломки зубьев передачи, 2 — из-за среза зуба, вызванного кратковременными перегрузками [5].

Опираясь на собранные данные телеметрии процесса бурения, А. А. Лобачев сделал вывод о том, что режим нагружения привода ПВГ-2000Р, установленного на буровой установке 4 000/250 ЭЧК БМ, производства ООО «ВЗБТ», соответствует по ГОСТ 21354-87¹ тяжелому варианту нагружения, а не среднему, как предполагалось ранее [5].

Созданные более полувека назад вероятностные методы расчета деталей машин имеют ряд упрощений, поскольку полагают, что и действующие, и допускаемые напряжения подчиняются нормальному закону распределения [6, 7]. Учет других режимов нагружения может быть выполнен с помощью корректирующих коэффициентов расчетной нагрузки [8]. В том случае, когда эксплуатационная нагрузка не может быть отнесена ни к одному известному в

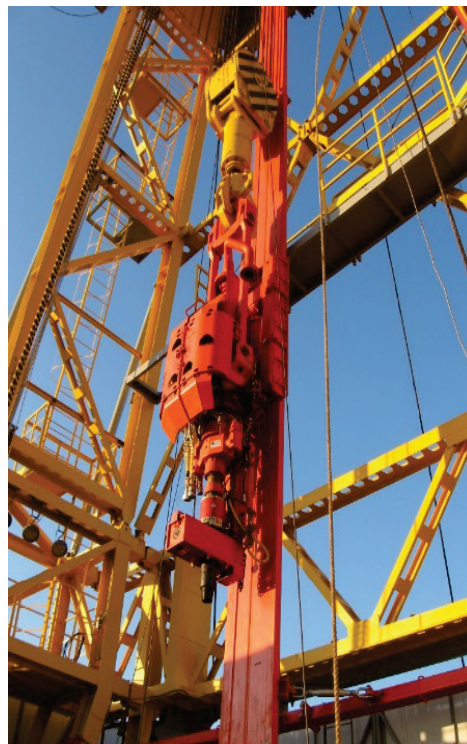


Рис. 1. Система верхнего привода ПВБГ-225

¹ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. — Введ. 1989-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 110 с.

рамках параметрической статистики закону распределения, вероятность отказа вычислить с помощью имеющихся методов невозможно [9].

Проиллюстрируем предлагаемую методику на примере оценки вероятности отказа зубчатой передачи указанного привода. Методика основана на применении методов непараметрической статистики [9–12], позволяющей обрабатывать любые экспериментальные данные о режимах нагружения конструкции, в том числе не описываемые в рамках стандартных законов параметрической статистики. Математический аппарат для реализации методики, а также ее программная реализация подробно описаны в работах [9, 13, 14], где она применяется для оценки надежности элементов трансмиссий транспортных машин: цилиндрических зубчатых передач, валов, подшипников качения [15–18], а также для математического описания параметров рассеяния механических характеристик материала [19]. Все этапы методики реализованы в математическом процессоре MathCad.

В соответствии с тяжелым режимом работы передачи функция распределения крутящего момента описывается β -распределением

$$\Phi_m(v_i) = \frac{1}{B(a, b)} \int_0^{v_i} v_i^{a-1} (1 - v_i)^{b-1} dv_i. \quad (1)$$

С помощью разработанного непараметрического датчика случайных чисел генерируется выборка крутящего момента $\{T_1\}$ с номинальным значением 20 000 Н·м [5] в соответствии с законом (1) объемом 1 000 значений. Результат отработки датчика показан на рисунке 2.

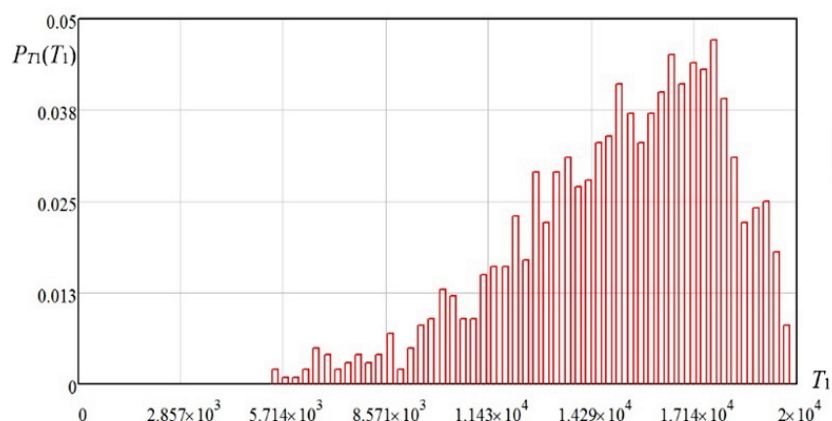


Рис. 2. Гистограмма функции плотности распределения крутящего момента в соответствии с тяжелым режимом работы передачи

Вычисление коэффициентов расчетной нагрузки, а затем изгибных напряжений по критерию сопротивления усталости выполняется по классической методике расчета зубчатых передач², но в виде выборки

²ГОСТ 21354-75. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Расчет на прочность. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 61 с.

$$\{\sigma_F\} = \frac{2 \cdot \{T_{1F}\} \cdot \{K_{F\beta}\} \cdot \{K_{FV}\} \cdot K_{Fa}}{b_w \cdot d_1 \cdot m} Y_F Y_\beta . \quad (2)$$

Генерирование выборки допустимых напряжений изгиба $\{\sigma_{FLim}\}$ выполняется также с помощью непараметрического датчика, но в соответствии с нормальным законом распределения

$$\Phi_n(\nu_i) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \int_0^{\nu_i} \exp\left(-\frac{(\nu_i - \nu_{cp})^2}{2S^2}\right) d\nu_i, \quad (3)$$

поскольку других данных о распределении механических характеристик материала зубчатых колес данной передачи не имеется. Объем выборки допустимых напряжений изгиба для удобства моделирования — также 1 000 значений.

Далее необходимо восстановить неизвестные функции плотности действующих σ_F и предельных σ_{FLim} напряжений. Эта задача также выполняется с помощью методов непараметрической статистики: оценки Розенблатта — Парзена [20, 21], в соответствии с которой функция плотности распределения изгибных напряжений в основании зуба $P_{\sigma F}(\sigma_F)$ записывается в виде

$$P_{\sigma F}(\sigma_F) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot N \cdot h_N^*} \sum_{i=1}^N \exp\left[-0,5 \left(\frac{\sigma_F - \sigma_{Fi}}{h_N^*}\right)^2\right], \quad (4)$$

где оптимальная величина параметра размытости h_N^* устанавливается в процессе максимизации функционала качества [9, 14]:

$$\max_{h_N} [J(h_N^*)] = \max_{h_N} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left[\frac{1}{(N-1)h_N} \sum_{j \neq i}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp \left(-\frac{\left(\frac{\sigma_{Fi} - \sigma_{Fj}}{h_N} \right)^2}{2} \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

Результаты восстановления функций $P_{\sigma F}(\sigma_F)$ и $P_{\sigma FLim}(\sigma_{FLim})$, а также гистограммы выборок $\{\sigma_F\}$ и $\{\sigma_{FLim}\}$ показаны на рисунках 3 и 4.

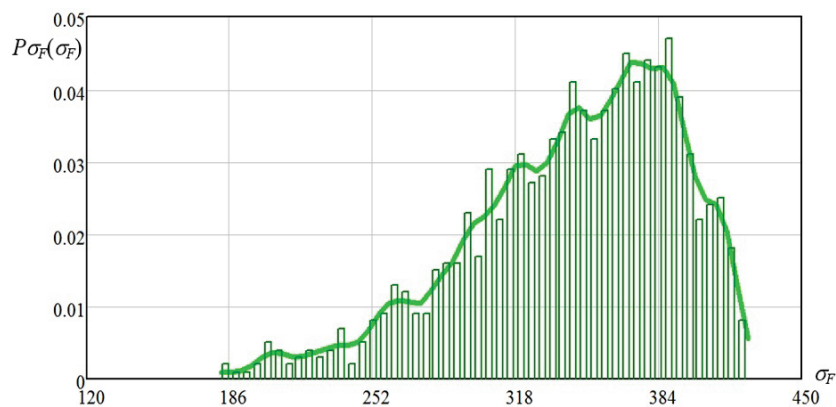


Рис. 3. Функция плотности распределения действующих напряжений изгиба

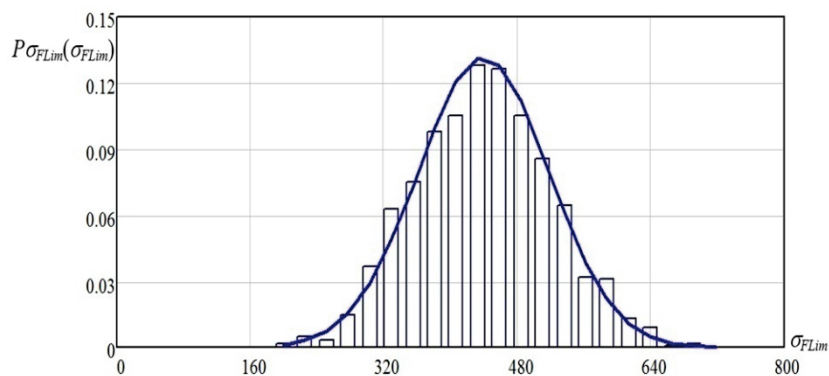


Рис. 4. Функция плотности распределения допускаемых напряжений изгиба

Вероятность безотказной работы P_F зубчатых передач по критерию сопротивления усталостной прочности при изгибе оценивается как вероятность того, что возникающее в зацеплении зубьев изгибающее напряжение σ_F не превышает допускаемого напряжения при изгибе σ_{FLim} :

$$P_F = \text{Вер} (\sigma_F < \sigma_{FLim}). \quad (6)$$

Это соответствует вычислению значения следующего интеграла:

$$P_F = 1 - \int_0^{\sigma_{mF}} \left[\int_0^{\sigma_{mF}} P_{\sigma_F}(\sigma_F + \sigma_{FLim}) \cdot P_{\sigma_{FLim}}(\sigma_{FLim}) d(\sigma_{FLim}) \right] d(\sigma_F), \quad (7)$$

где $\sigma_{mF} = \max(\sigma_{FLim})$.

Результаты и обсуждение

Графическая иллюстрация для расчета вероятности отказа в соответствии с формулой (5) представлена на рисунке 5. Значение вероятности отказа исследуемой зубчатой передачи привода ПВГ-2000Р получилось равным 15,165 %, что весьма близко к статистике отказов (18 редукторов из 117).

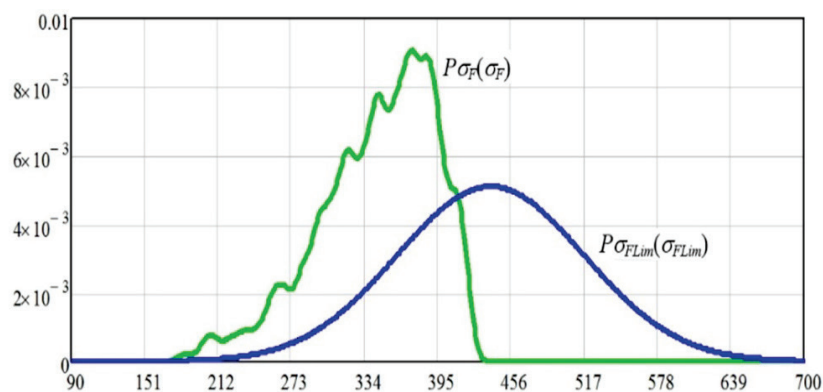


Рис. 5. К расчету вероятности отказа передачи при ее работе в тяжелом режиме нагружения

Реализуя предложенную методику, можно установить вероятность отказа передачи для любого режима эксплуатации, указав соответствующий закон распределения крутящего момента. Так, если бы режим работы передачи привода ПВГ-2000Р в соответствии с ГОСТ 21354-87³ был средним нормальным, то вероятность отказа была бы значительно ниже — 3,127 %, что не подтверждается статистикой отказов при эксплуатации исследуемых приводов.

Выводы

Предлагаемая методика оценки вероятности отказа зубчатой передачи верхнего привода буровой установки основана на применении методов непараметрической статистики, поэтому применима для любых законов нагружения. Результаты применения методики для оценки вероятности отказа зубчатой передачи привода СВП, дающие значение около 15 %, хорошо согласуются со статистикой отказов. Также методика позволяет определить вероятность отказа зубчатой передачи для любых, в том числе заданных выборкой, законов распределения нагрузки, действующей на привод в процессе его эксплуатации.

Библиографический список

1. Петрухин В. В., Коротков С. А., Черский М. И. Анализ систем верхнего привода для бурения горизонтальных скважин // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна: сб. тр. науч.-практ. конф. – Тюмень, 2016. – С. 178–181.
2. Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load / Y. Sun [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – Vol. 167. – P. 277–286. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.04.003
3. Перспективные направления развития конструкций систем верхнего привода / Р. С. Привалихин [и др.] // Бурение и нефть. – 2015. – № 3. – С. 54–58.
4. Силовые приводы нового поколения / А. К. Данилов [и др.] // Бурение и нефть. – 2014. – № 12. – С. 40–42.
5. Лобачев А. А. Исследование нагруженности элементов редуктора системы верхнего привода: дис... канд. техн. наук. – СПб., 2017. – 166 с.
6. Kapur K. C., Lamberson L. R. Reliability in Engineering Design. – New York: John Wiley & Sons, 1977. – 586 p.
7. Решетов Д. Н., Фадеев В. З. Вероятностная оценка изгибной прочности зубчатых колес // Машиноведение. – 1972. – № 2. – С. 54–63.
8. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – 8-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 408 с.
9. Сызранцев В. Н., Невелев Я. П., Голофаст С. Л. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики. – Новосибирск: Наука, 2008. – 218 с.
10. Liu Y., Zhang J., Zhao X. A new nonparametric screening method for ultrahigh-dimensional survival data // Computational Statistics and Data Analysis. – 2018. – Vol. 119. – P. 74–85.
11. A nonparametric test for slowly-varying non stationarities / D. Baptista de Souza [et al.] // Signal Processing. – 2018. – Vol. 143. – P. 241–252.
12. Syzrantseva K., Syzrantsev V. Reliability estimation of machine parts with complicated geometry on a base of methods of nonparametric statistics // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, Issue 2. – P. 204–209. DOI: 0.3923/jeasci.2016.204.209
13. Syzrantseva K. V. Predicting the failure of gear transmissions by nonparametric statistics // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29, Issue. 2. – P. 1206–1208. DOI: 10.3103/S1068798X09120028
14. Сызранцева К. В. Расчет прочностной надежности деталей машин при случайном характере внешних нагрузок: моногр. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 92 с.

³ГОСТ 21354-87. – С. 106

15. Сызранцева К. В. Оценка надежности зубчатых передач по сопротивлению контактной усталости при случайном режиме нагружения // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 23–25.
16. Syzrantseva K. V. Development of a method to calculate the strength reliability of tooth gears based on the fatigue resistance when the teeth bend // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol. 38, Issue 6 (200912). – P. 552–556. DOI: 10.3103/S1052618809060065.10
17. Сызранцева К. В., Черная Л. А. Оценка долговечности подшипников качения при случайном режиме их нагружения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 12. – С. 8–11.
18. Syzrantseva K., Chernaya L. Shafts reliability assessment in accordance with criteria of fatigue strength under random load conditions // ICIE 2018: proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer. – 2019. – P. 1511–1518. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_161
19. Confidence limits for the few-cycle fatigue curve / V. N. Syzrantsev [et al.] // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, Issue 1. – P. 20–24.
20. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode / E. Parzen // Annals of Mathematical Statistics. – 1962. – Vol. 33. – Issue 3. – P. 1065–1076.
21. Rozenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density functions / M. Rozenblatt // Annals of Mathematical Statistics. – 1956. – Vol. 27, Issue 3. – P. 832–837.

Сведения об авторах

Сызранцева Ксения Владимировна, д. т. н., доцент кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ильиних Виталий Николаевич, к. т. н., доцент кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Колбасин Денис Сергеевич, магистрант кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: denis2801@bk.ru

Information about the authors

Ksenia V. Syzrantseva, Doctor of Engineering, Associate Professor at the Department Cybernetic Systems, Industrial University of Tyumen

Vitaly N. Il'inykh, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Machinery and Equipment for the Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen

Denis S. Kolbasin, Master's Student at the Department of Machinery and Equipment for the Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen, e-mail: denis2801@bk.ru