

УДК 62.831

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Юмагузин У.Ф., Баширов М.Г.

Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате, Салават, Россия (453250, Республика Башкортостан, г. Салават, ул. Губкина, д. 22Б), e-mail: ural1503@gmail.com

Проведен анализ методов количественной оценки риска, надежности и фактического технического состояния оборудования нефтегазовой отрасли. Рассмотрен метод прогнозирования надежности элементов технической системы с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов. Характер износа детали оборудования в период интенсивного износа носит вероятностный характер, что в работе учитывается применением метода Монте-Карло к распределению Вейбулла – Гнеденко. Приведены формулы расчета пожарной опасности насосно-компрессорного оборудования. Для оценки технического состояния насосно-компрессорного оборудования использовался спектральный метод диагностики, учитывающий взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателями электропривода, с режимами работы и характером повреждений. Для определения уровня поврежденности предложен интегральный диагностический параметр поврежденности D_{Σ} . Предложена процедура ранжирования, позволяющая выявить наиболее опасное оборудование для принятия управленческих решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций.

Ключевые слова: безопасность, риск, надежность, диагностика, насосно-компрессорное оборудование.

INCREASE OF SAFETY OF EXPLOITATION OF THE EQUIPMENT OF OIL AND GAS INDUSTRY

Yumaguzin U.F., Bashirov M.G.

Ufa state petroleum technological university, Salavat, Russia (453250, Bashkortostan, street Gubkina, 22B), e-mail: ural1503@gmail.com

The analysis of methods of a quantitative assessment of risk, reliability and the actual technical condition of the equipment of oil and gas branch is carried out. The method of forecasting of reliability of elements of technical system taking into account temporary dependence of probability of refusals of knots is considered. The wear pattern of a detail of the equipment in the period of intensive wear has probabilistic character that in work is considered by Monte-Carlo method application to Weibull – Gnedenko's distribution. Formulas of calculation of fire danger of the pumping and compressor equipment are given. For an assessment of technical condition of the pumping and compressor equipment the spectral method of preliminary treatment considering interrelations of parameters of the highest harmonious components of currents and tension, generated by electric drive engines, with modes of behavior and nature of damages was used. For definition of level of damage the integrated diagnostic parameter of damage of D_{Σ} is offered. The ranging procedure, allowing to reveal the most dangerous equipment for acceptance of the administrative decisions directed on preventing of alert conditions is offered.

Keywords: safety, risk, reliability, diagnostics, pump and compressor equipment.

Ускорение темпов и расширение масштабов производственной деятельности в современных условиях неразрывно связано с возрастающим использованием энергонасыщенных технологий и опасных веществ. В результате возрастает потенциальная угроза для здоровья и жизни людей, окружающей среды, материальной базы производства. В первую очередь это относится к объектам нефтегазовой отрасли, где наблюдаются постоянная интенсификация технологий, связанная с возрастанием температур и давлений, укрупнение единичных мощностей установок и аппаратов, наличие в них больших запасов взрыво-, пожаро- и токсикопасных веществ. В этой связи можно утверждать, что оценка

риска и надежности, прогнозирование ресурса безопасной эксплуатации оборудования и разработка новых способов оценки технического состояния являются фундаментальной научной основой достижения высокого уровня промышленной безопасности [6]. На предприятиях нефтегазовой отрасли доля насосно-компрессорного оборудования составляет порядка 35 % всего производственного оборудования, и, соответственно, уровень безопасности технологических процессов во многом определяется техническим состоянием именно данного вида оборудования [1].

Разработка методики выявления наиболее опасного оборудования, для которого характерны низкая надежность отдельных элементов, неудовлетворительное техническое состояние и высокая вероятность возникновения аварийных ситуаций, позволит предприятиям разработать стратегию, направленную на повышение уровня безопасной эксплуатации конкретных видов оборудования. Данная методика позволит создать предпосылки перехода от существующей системы планово-предупредительного ремонта к системе ремонта и обслуживания по фактическому состоянию, которая, наряду с обеспечением высоких показателей эксплуатационных свойств нефтегазового оборудования, позволяет поддерживать приемлемый уровень безопасности. Практическая реализация комплексной системы оценки, позволяющей выявлять наиболее опасное оборудование нефтегазовой отрасли, состоит в осуществлении следующих этапов:

- оценка рисков объектов;
- расчет показателей надежности оборудования с учетом временной зависимости отказов узлов;
- определение технического состояния оборудования;
- ранжирование оборудования по техническому состоянию, надежности и уровню рисков.

ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность» содержит методику расчета вероятности возникновения пожара и взрыва насосно-компрессорного оборудования. Данная методика позволяет оценить риски на первом этапе комплексной оценки состояния оборудования.

Пожарная опасность компрессора обусловлена опасностью возникновения возгорания взрывоопасной смеси внутри аппарата. Вероятность реализации в i -м элемента объекта причины, приводящей к появлению горячего вещества, вычисляется на основе статистических данных о времени существования этой причины по формуле [3, 4]

$$Q_i(\alpha_n) = \frac{K_\sigma}{\tau_p} \cdot \sum_{j=1}^m \tau_j, \quad (1)$$

где K_{σ} – коэффициент безопасности; τ_p – анализируемый период времени, мин; m – количество реализации α_n -й причины в i -м элементе объекта за анализируемый период времени; τ_j – время существования α_n -й причины появления k -го вида горючего вещества при j -й реализации в течении анализируемого периода времени, мин.

Появление в рассматриваемом элементе объекта горючего вещества k вида является следствием реализации любой из α_n причин. Вероятность вычисляется по формуле

$$Q_i(\Gamma B_k) = 1 - \prod_{n=1}^z [1 - Q_i(\alpha_n)], \quad (2)$$

где $Q_i(\alpha_n)$ – вероятность реализации любой из α_n причин; z – количество α_n причин, характерных для i -го объекта; n – порядковый номер причины.

Если по условиям технологического процесса в компрессоре постоянно обращается взрывоопасное вещество, то вероятность $Q_i(\Gamma B)$ равна 1. Вероятность появления достаточного для образования горючей среды количества m -го окислителя в i -м элементе объекта в течение года вычисляется по формуле

$$Q_i(\text{OK}_m) = 1 - \prod_{n=1}^z [1 - Q_i(b_n)], \quad (3)$$

где $Q_i(b_n)$ – вероятность реализации любой из b_n причин; z – количество b_n причин, характерных для i -го объекта; n – порядковый номер причины.

Появление окислителя в компрессе возникает при нарушениях гидравлической части насосно-компрессорного оборудования, что в свою очередь создает разряжение, обуславливающее подсос воздуха через сальниковые уплотнения.

Вероятность образования горючей среды определяется по формуле

$$Q_i(\Gamma C_k) = Q_i(\Gamma B) \cdot Q_i(\text{OK}_m). \quad (4)$$

Вероятность инициирования взрыва в анализируемом объекте вычисляется по формуле

$$Q_i(\text{ИЗ}_n / \Gamma C_k) = Q_i(\text{ТИ}_n) \cdot Q_i(B_n^k), \quad (5)$$

где $Q_i(\text{ТИ}_n)$ – вероятность появления в i -м элементе объекта в течение года n -го энергетического (теплового) источника, найденная по формуле (1); $Q_i(B_n^k)$ – условная вероятность того, что воспламеняющая способность появившегося в i -м элементе объекта n -го энергетического (теплового) источника достаточна для зажигания k -й горючей среды, находящейся в этом элементе (для взрывоопасных веществ принимается равной 1).

Причинами зажигания горючей смеси в цилиндре компрессора могут быть короткие замыкания в электродвигателе насосно-компрессорного оборудования, разрушение деталей

поршневой группы, а также искры механического происхождения, возникающие при разрушении узлов и деталей поршневой группы компрессора.

Вероятность взрыва горючей смеси внутри насосно-компрессорного оборудования

$$Q_k(\text{ВТА}) = Q_i(\text{ГС}_k) \cdot Q_k(\text{ИЗ}_n / \text{ГС}_k). \quad (6)$$

Значение риска оборудования определяется по формуле

$$R = Q \cdot C, \quad (7)$$

где Q – вероятность возникновения события, способного привести к аварийной ситуации; C – уровень тяжести последствий, принимающий значения от 0 до 1.

Второй этап комплексной оценки состояния оборудования нефтегазовой отрасли состоит в оценке надежности оборудования. Наиболее часто отказы оборудования происходят на первом и третьем периодах жизненного цикла, который описывается типичной кривой износа, характеризующей изменение интенсивности отказов во времени. Так как первый этап (приработка) носит достаточно кратковременный характер и является неотъемлемой частью работы, то наибольший практический интерес представляет этап износа. К тому же, согласно данным Федеральной службы государственной статистики [2], степень износа основных фондов в области нефтегазодобычи на конец 2011 года составляет 52,2 %, доля полностью изношенных основных фондов – 20,3 %, в области нефтегазопереработки 46,7 % и 12,9 % соответственно. При этом коэффициент обновления (ввод в действие основных фондов, в процентах от наличия основных фондов на конец года) остается на уровне 5–6 % с 2004 г. по 2011 г.

Прогнозирование надежности оборудования с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов начинается с формирования «дерева отказов», определяются исходные и промежуточные предпосылки, устанавливаются логические связи и входные параметры узлов. Для описания вероятностного характера интенсивности износа детали в период износа используется метод Монте-Карло, позволяющий решать вероятностные проблемы, сводя их к задачам теории вероятностей и математического анализа, решение которых, в свою очередь, можно получить аналитически или численно.

Плотность вероятности отказов представляется в виде [5]

$$f(x) = \alpha \cdot \lambda_{\text{стат}} \cdot \lambda^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda_{\text{стат}} \cdot \lambda^{\alpha}}, \quad (8)$$

где α – коэффициент, учитывающий особенности детали; λ_i – значение интенсивности отказа; $\lambda_{\text{стат}}$ – расчетное (исходное) значение интенсивности отказа.

Значения λ_i , сформированные генератором случайных величин, должны находиться в области плотности распределения интенсивности отказа, характерной для рассматриваемого шага.

Интенсивность отказов при распределении Вейбулла – Гнеденко равна

$$\lambda(t) = \alpha \cdot \lambda_0 \cdot t^{\alpha-1}. \quad (9)$$

При значениях параметра $\alpha < 1$ интенсивность отказов монотонно убывает с течением времени, что соответствует этапу приработки на характерной кривой износа, а при $\alpha > 1$ монотонно возрастает – этап износа оборудования.

Начиная с момента окончания периода нормальной эксплуатации, производится расчет технического состояния каждой детали оборудования с периодичностью (шагом) Δt . Значение вероятности отказа в период нормальной эксплуатации принимается постоянным и является основным входным параметром модели. Основной этап алгоритма – нахождение величины степени износа λ_i каждой детали, из которой состоит оборудование, в текущий момент времени.

Для определения вероятности отказа детали используется выражение

$$P(\tau) = 1 - e^{-\lambda \cdot \tau}, \quad (10)$$

где τ – время эксплуатации.

Вероятность отказа всей системы вычисляется по формуле

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (11)$$

$$P = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j), \quad (12)$$

где P_i – вероятность отказа n деталей, имеющих логическое условие соединения «ИЛИ»; P_j – вероятность отказа m деталей, имеющих логическое условие соединения «И» [5].

Третий этап заключается в оценке технического состояния оборудования. Одним из наиболее перспективных методов диагностики насосно-компрессорного оборудования, который может использоваться при реализации системы ремонта и обслуживания по техническому состоянию, является метод анализа гармонического состава токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода [8]. Наличие в спектре токов и напряжений гармонических составляющих определенных частот и определенной интенсивности свидетельствует о наличии повреждений электрической и/или механической части оборудования. Проведение мониторинга токов и напряжений электропривода может быть выполнено без какого-либо нарушения режима работы насосно-компрессорного оборудования, поэтому этот метод может быть положен в основу перевода его на эксплуатацию по техническому состоянию.

В отличие от вибрационного метода, который нашел широкое применение для диагностики насосно-компрессорного оборудования, метод, основанный на анализе гармонического состава токов и напряжений двигателя электропривода, позволяет определять как механические, так и электрические повреждения, а также осуществлять удаленный контроль технического состояния оборудования.

Для оценки поврежденности отдельных элементов насосно-компрессорного оборудования используется параметр D_m

$$D_m = F(K_{InA}, K_{UnA}, \varphi_{ui(n)A}, K_{InB}, K_{UnB}, \varphi_{ui(n)B}, K_{InC}, K_{UnC}, \varphi_{ui(n)C}, T_{подш}, T_{изол}) =$$

$$= f \left(\sum_{n=1}^5 (w_{I(2n+1)A} K_{I(2n+1)A} + w_{U(2n+1)A} K_{U(2n+1)A} + w_{\varphi_{ui(2n+1)A}} \varphi_{ui(2n+1)A} + w_{I(2n+1)B} K_{I(2n+1)B} + \right.$$

$$\left. + w_{U(2n+1)B} K_{U(2n+1)B} + w_{\varphi_{ui(2n+1)B}} \varphi_{ui(2n+1)B} + w_{I(2n+1)C} K_{I(2n+1)C} + w_{U(2n+1)C} K_{U(2n+1)C} + \right.$$

$$\left. + w_{\varphi_{ui(2n+1)C}} \varphi_{ui(2n+1)C} \right) + \sum_{p=4}^8 w_{p \text{ подш}} T_{p \text{ подш}} + w_{изол} T_{изол}, \quad (13)$$

где K_{In} – коэффициент гармонических составляющих токов (индексы А,В,С соответствуют фазам); K_{Un} – коэффициент гармонических составляющих напряжений; $\varphi_{ui(n)}$ – угол сдвига по фазе между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов и напряжений; $T_{подш}$ – температуры подшипников агрегата; $T_{изол}$ – температура изоляции обмотки статора электродвигателя; w – весовые коэффициенты нейронной сети для соответствующих диагностических параметров; p – число подшипников агрегата [7].

Для определения уровня поврежденности машинного агрегата предложен интегральный диагностический параметр поврежденности D_Σ , который формируется искусственной нейронной сетью с использованием программного обеспечения «Оценка технического состояния электрооборудования на основе интегральных параметров» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615158) [10]. Совокупность значений показателей D_m анализируется искусственной нейронной сетью, которая выдает результат – значение D_Σ

$$D_\Sigma = F \left(\sum_{m=1}^{17} w_m D_m \right), \quad (14)$$

где m – количество выходов нейронной сети.

В разработанном методе диагностики, по аналогии с методом вибродиагностики, установлены значения интегрального диагностического параметра, соответствующие трем уровням поврежденности насосных агрегатов: «Повреждение не обнаружено», «Повреждение обнаружено», «Обнаружено критическое повреждение». Интегральный диагностический параметр поврежденности в интервале $0 \div 0,45$ соответствует уровню

«Повреждение не обнаружено», в интервале $0,46 \div 0,8$ % – «Повреждение обнаружено», в интервале $0,81 \div 1$ – «Обнаружено критическое повреждение». За уровень поврежденности оборудования («Обнаружено критическое повреждение»), согласно ГОСТ 27.002-89, принято состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима [7, 9].

Заключительный этап комплексной оценки состояния оборудования – процедура ранжирования, позволяющая выявить наиболее опасное оборудование для принятия управленческих решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций. Ранжирование предлагается проводить на основе параметра G , учитывающего риск оборудования R , надежность P и техническое состояние D_{Σ}

$$G = R \cdot P \cdot D_{\Sigma}. \quad (15)$$

Список литературы

1. Бахтизин Р.Н. Разработка системы автоматизированного управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 4. – С. 27-31.
2. Баширов М.Г., Юмагузин У.Ф., Талаев В.Л. Оценка технического состояния оборудования предприятий нефтегазовой отрасли на основе применения техноценологического метода // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 5. – С. 293-302; URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_5.pdf (дата обращения 30.12.2013).
3. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. – Введ. 1992-07-01. - М.: Изд-во стандартов, 1992. – 64 с.
4. ГОСТ Р 51897. Менеджмент риска. Термины и определения. – Введ. 2012-12-01. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 12 с.
5. Заверняев К. В. Методика прогнозирования надежности сложных технологических систем в металлургии с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов: Автореф. дис... канд.техн.наук. – М., 2009. – 23 с.
6. Козлитин А.М. Развитие теории и методов оценки рисков для обеспечения промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса: Автореф. дис... д-ра техн. наук. – Саратов, 2006. – 23 с.
7. Миронова И.С. Разработка интегральных критериев и системы управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Уфа, 2013. – 24 с.

8. Кузеев И.Р., Баширов М.Г., Прахов И.В., Баширова Э.М., Самородов А.В. Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом // Патент России № 2431152.2011. Бюл. №28.
9. Прахов И.В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 24 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615158. Оценка технического состояния электрооборудования на основе интегральных параметров / М. Г. Баширов, И. С. Миронова, У.Ф. Юмагузин, В. Г. Акчулпанов (Россия). № 2012615158; Заявлено 10.04.2012, №2012612700. Оpubл. 08.06.2012.

Рецензенты:

Вильданов Р.Г., д.т.н., профессор, филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават.

Жирнов Б.С., д.т.н., профессор, филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ в г. Салавате, г. Салават.