

УДК 621.87:62-567

Семенюк В. Ф., д.т.н., Лингур В. Н., к.т.н.

Одесский национальный политехнический университет

ОЦЕНКА И МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ БЕЗОПАСНОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Аннотация: В статье обоснована необходимость обеспечения надежной и безотказной работы грузоподъемных машин. Получены аналитические зависимости для определения количественной оценки надежности ограничителя грузоподъемности крана. Определена вероятность срабатывания ограничителя грузоподъемности при наличии перегрузки и вероятность срабатывания при отсутствии перегрузки крана. Предложен метод повышения надежности ограничителя грузоподъемности путем его профилактического обслуживания. Получена аналитическая зависимость для определения интервала проведения профилактических проверок для обеспечения необходимой вероятности безопасной работы ограничителя.

Ключевые слова: перегрузка, ограничитель грузоподъемности, вероятность безотказной работы, вероятность срабатывания

Анотація: У статті обґрунтовано необхідність забезпечення надійної і безвідмовної роботи вантажопідійомних машин. Отримано аналітичні залежності для визначення кількісної оцінки надійності обмежувача вантажопідійомності крана. Визначено ймовірність спрацьовування обмежувача вантажопідійомності при наявності перевантаження і ймовірність спрацьовування при відсутності перевантаження крана. Запропоновано метод підвищення надійності обмежувача вантажопідійомності шляхом його профілактичного обслуговування. Встановлено аналітичну залежність для визначення інтервалу проведення профілактичних перевірок для забезпечення необхідної ймовірності безпечної роботи обмежувача.

Ключові слова: перевантаження, обмежувач вантажопідійомності, ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність спрацьовування.

© Семенюк В. Ф., Лингур В. Н.

Грузоподъемные машины относят к группе машин повышенной опасности. Безопасная эксплуатация этих машин в значительной мере обеспечивается применением предохранительных и сигнализационных устройств [1]. К таким устройствам относятся концевые выключатели, противоугонные захваты, ограничители грузоподъемности, световые и звуковые сигнализационные приборы.

К приборам и устройствам безопасности грузоподъемных машин предъявляют, прежде всего, такие требования: точность срабатывания, быстрота срабатывания, надежность работы. Для оценки точности срабатывания используют такой критерий как коэффициент точности. Применительно к ограничителям грузоподъемности (ОГП) этот критерий представляет собой отношение наибольшего усилия срабатывания Q_{\max} к наименьшему усилию Q_{\min} , при котором возможно срабатывание ОГП:

$$\gamma_{тч} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \quad (1)$$

Требование быстроты срабатывания может быть оценено временем действия ОГП:

$$T_{д} \cdot k_{б} \leq T_{ав} \quad (2)$$

где $T_{д}$ – время действия ОГП, $k_{б}$ – коэффициент безопасности, $T_{ав}$ – время наступления аварийного состояния машины.

Надежность работы ОГП количественно оценивается путем определения вероятности безотказной работы ограничителя грузоподъемности $P_{ср}(n)$, т.е. вероятности того, что в течение n перегрузок не произойдет ни одного отказа в срабатывании ОГП. Приняв, что вероятность безотказной работы ОГП подчиняется экспоненциальному закону можно записать:

$$P_{ср}(n) = e^{-\lambda \cdot n} \quad (3)$$

где λ – интенсивность отказов в срабатывании ограничителя грузоподъемности.

Определяя вероятность безотказной работы ограничителя грузоподъемности, нужно различать вероятность срабатывания ОГП при наличии перегрузки и вероятность срабатывания ограничителя при отсутствии перегрузки. Такое разделение необходимо, так как ущерб от несрабатывания ОГП при наличии перегрузки значительно больше, чем от срабатывания в случае отсутствия перегрузки.

Рассматривая усилие срабатывания ограничителя грузоподъемности как случайную величину и задав необходимую точность срабатывания, можно найти вероятность попадания случайной величины на заданный участок.

Известно [2], что вероятность попадания непрерывной случайной величины x на участок (α, β) равна интегралу от плотности распределения, взятому по этому участку,

$$P(\alpha < x < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx \quad (4)$$

При распределении усилия срабатывания ОГП по нормальному закону, вероятность его безотказной работы равна [3]

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi^* \left(\frac{\beta - m}{\sigma} \right) - \Phi^* \left(\frac{\alpha - m}{\sigma} \right), \quad (5)$$

где интеграл вероятностей

$$\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (6)$$

$$t = \frac{x - m}{\sigma}; dt = \frac{dx}{\sigma};$$

При этом m – математическое ожидание величины x ; σ – среднее квадратичное отклонение величины x , $\Phi^*(-t) = 1 - \Phi^*(t)$.

Признаком отказа ОГП будем считать отклонение величины усилия срабатывания от номинального значения $Q_{\text{ном}}$ за предельно допустимые границы $Q_{\text{ном}} \pm \Delta Q_{\text{ном}}$. Причем, отклонение усилия срабатывания за пределы $(Q_{\text{ном}} + \Delta Q_{\text{ном}})$ в сторону увеличения будем называть отказом в срабатывании при наличии перегрузки, а отклонение за пределы $(Q_{\text{ном}} - \Delta Q_{\text{ном}})$ в сторону уменьшения будем называть отказом в срабатывании при отсутствии перегрузки или излишним срабатыванием.

Приняв зону рассеивания усилия срабатывания ОГП в пределах $(m, \beta = m + k_p \cdot \sigma)$ при нормальном распределении случайной величины (k_p – квантиль нормального распределения), можно записать выражение для определения вероятности безотказной работы ОГП при наличии перегрузки:

$$P(m < x < m + k_p \cdot \sigma) = \Phi^*(k_p) - \Phi^*(0). \quad (7)$$

Аналогично, вероятности безотказной работы ОГП при отсутствии перегрузки:

$$P(m - \kappa_p \cdot \sigma < x < m) = \Phi^*(0) - \Phi^*(-\kappa_p) \quad (8)$$

Анализ выражений (7) и (8) показывает, что при расчете по этим выражениям вероятность безотказной работы ОГП при наличии перегрузки, равно как и при ее отсутствии, не может быть больше 0,5. Действительно, например, при $\kappa_p=3$

$$P(m < x < m + \kappa_p \cdot \sigma) = \Phi^*(3) - \Phi^*(0) = 0,9986 - 0,5 = 0,4986 ;$$

$$P(m - \kappa_p \cdot \sigma < x < m) = \Phi^*(0) - \Phi^*(-3) = 0,5 - (1 - 0,9986) = 0,4986 .$$

Так как отклонение величины усилия срабатывания за пределы $(Q_{ном} - \Delta Q_{ном})$ не приводит к отказу в срабатывании при наличии перегрузки и учитывая, что кривая нормального закона распределения симметрична, то к значению вероятности безотказной работы ОГП при наличии перегрузки, определенному по формуле (7), нужно прибавить 0,5.

Аналогично нужно поступить и при определении вероятности безотказной работы ОГП при отсутствии перегрузки по формуле (8).

В процессе эксплуатации ограничителей грузоподъемности под действием различных факторов (увеличение коэффициента трения между подвижными деталями, уменьшение усилия предварительного сжатия пружин и др.) значение номинального усилия срабатывания может изменяться. На рис. 1 представлен возможный характер изменения усилия срабатывания $x(n)$ со скоростью F_x .

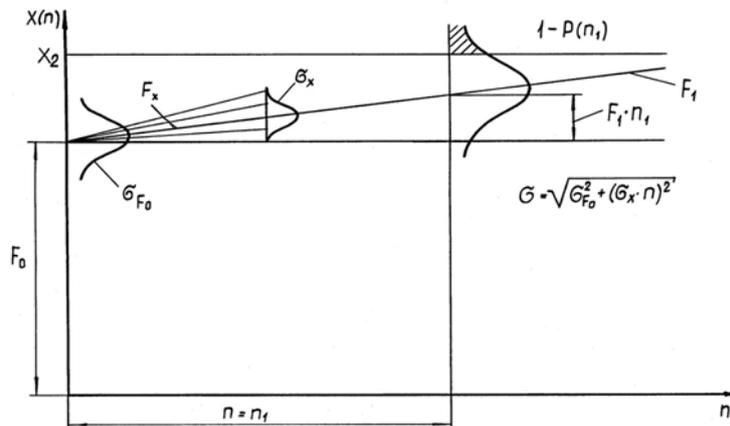


Рисунок 1 - Схема прогнозирования надежности ограничителя грузоподъемности

Начальные значения параметра функционирования $x(n)$ распределены по нормальному закону (его параметры F_0 и σ_{F_0}), и процесс изменения подчиняется линейной зависимости, причем его скорость имеет рассеивание с параметрами F_1 и σ_x .

В этом случае вероятность безотказной работы $P_{cp2}(n)$, то есть выход за границу x_2 , при заданном значении $n=n_1$, может быть подсчитана по формуле [4]

$$P_{cp2}(n) = 0,5 + \Phi \left[\frac{x_2 - F_0 - F_1 \cdot n}{\sqrt{\sigma_{F_0}^2 + (\sigma_x \cdot n)^2}} \right], \quad (9)$$

где Φ – нормированная функция Лапласа $0 \leq \Phi \leq 0,5$.

Формула (9) получена из условия оценки вероятности выхода параметра x за допустимые пределы x_2 . При этом считалось, что рассеивание параметра x подчиняется закону с математическим ожиданием $m(n) = F_0 + F_1 \cdot n$ и средним квадратичным отклонением

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{F_0}^2 + (\sigma_x \cdot n)^2}.$$

Если в течении n перегрузок через равные интервалы n/n_0 проводится «и» профилактических проверок, каждая из которых полностью восстанавливает первоначальное значение номинального усилия срабатывания ОГП, с учетом того, что вероятность отказа во время проверки ничтожно мала, выражение (9) может быть записано следующим образом

$$P_{cp}(n) = \left\{ 0,5 + \Phi \left[\frac{x_2 - F_0 - F_1 \cdot n_0}{\sqrt{\sigma_{F_0}^2 + (\sigma_x \cdot n_0)^2}} \right] \right\}^u. \quad (10)$$

Определим величину интервала n_0 , через который необходимо провести профилактическую проверку для обеспечения необходимой вероятности безотказной работы $P_{cp2}(n)$ ОГП.

Логарифмируя выражение (10), получим

$$\ln P_{cp2}(n) = u \cdot \ln [0,5 + \Phi(y)] \quad (11)$$

где

$$y = \frac{x_2 - F_0 - F_1 \cdot n_0}{\sqrt{\sigma_{F_0}^2 + (\sigma_x \cdot n_0)^2}}. \quad (12)$$

Определив из (11) значение $\Phi(y)$, равное

$$\Phi(y) = [P_{cp2}(n)]^{1/u} - 0,5, \quad (13)$$

а затем «у», пользуясь соответствующими таблицами, найдем из выражения (12)

$$n_0 = \frac{x_2 - F_0 - y \sqrt{\sigma_{F_0}^2 + (\sigma_x \cdot n_0)^2}}{F_1}. \quad (14)$$

Таким образом, если в течение n перегрузок через равные интервалы n/n_0 проводить « u » профилактических проверок, каждая из которых будет полностью восстанавливать первоначальное значение номинального усилия срабатывания ОГП, можно обеспечить необходимую вероятность безотказной работы $P_{cp2}(n)$, ограничителя грузоподъемности.

Выводы:

1. Для количественной оценки надежности ограничителя грузоподъемности целесообразно использовать вероятность того, что в течение n перегрузок не произойдет ни одного отказа в срабатывании ОГП.

2. Определяя вероятность безотказной работы ограничителя грузоподъемности, нужно различать вероятность срабатывания ОГП при наличии перегрузки и вероятность срабатывания ограничителя при отсутствии перегрузки.

3. Предложен метод повышения надежности ограничителя грузоподъемности путем его профилактического обслуживания. Определен интервал проведения профилактических проверок, через который необходимо восстанавливать первоначальное значение номинального усилия срабатывания ОГП для обеспечения необходимой вероятности безопасной работы ограничителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев Н.И. Предохранительные и сигнализационные устройства кранов. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
2. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с.
3. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Точность и надежность станков с числовым программным управлением/Под ред. А.С. Проникова. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.