

Н.Г. Гринчар

# НАДЕЖНОСТЬ ГИДРОПРИВОДОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ, ПУТЕВЫХ И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

*Рекомендовано*

*федеральным государственным автономным учреждением  
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)  
в качестве учебника для использования в учебном процессе  
образовательных организаций, реализующих программы ВО  
по направлению подготовки 23.00.00 «Техника и технологии  
наземного транспорта». Регистрационный номер рецензии 116  
от 25 апреля 2016 г.*

Москва  
2019

ности подтверждения и контроля надежности тормозят в известной мере внедрение способов и средств обеспечения надежности, в том числе гидроприводов машин.

В то же время из опыта эксплуатации машин известно, что чем сложнее машина, тем труднее учесть при проектировании и эксплуатации взаимосвязанное влияние различных факторов на ее работоспособность, и, соответственно, тем выше вероятность отказа. Насыщение железнодорожного хозяйства и других отраслей машинами со сложными гидравлическими системами требует увеличения финансовых, материальных, трудовых затрат на поддержание машин в работоспособном состоянии. Если не уделять внимание повышению надежности, то с дальнейшим развитием техники указанные затраты будут возрастать ускоренными темпами, а в результате не будет иметь место экономия ресурсов, так как рабочая сила, материальные и финансовые средства будут просто перетекать из сферы производства в сферу технического обслуживания и ремонта.

Сказанное относится не только к новым, сложным машинам, но и к тем, которые уже находятся в эксплуатации. С увеличением темпов производственных процессов возрастают нагрузки на рабочие органы и приводы машин, в частности на являющийся их неотъемлемой составной частью гидропривод, отказ которого приводит к остановке всей системы. И в результате за период плановой эксплуатации расходы на ремонт и обслуживание могут даже превысить расходы на приобретение машин.

Обеспечение надежности работы гидроприводов возможно только на основе комплексного подхода, охватывающего этапы проектирования, производства и эксплуатации машин.

Ввиду того, что факторы, влияющие на работоспособность как отдельных гидроаппаратов, так и гидропривода в целом, имеют случайный характер, теория надежности основывается на математической статистике и теории вероятностей.

Однако эти показатели не учитывают различий в надежности гидроприводов, а также в их сложности и стоимости. Наиболее полную оценку эффективности гидропривода может дать лишь сопоставление удельных затрат на единицу продукции, хотя из-за нестабильности показателей стоимости и надежности экономический критерий носит локальный характер и применим лишь для некоторых конкретных условий эксплуатации.

В качестве примера представлены гидросхемы машины ВПР-02 (рис. 1.1) и самоходного стрелового крана КС-4573 (рис. 1.2). Обе гидросистемы, так же как и гидросистемы других машин, относятся к сложным системам, причем сложность определяется не только общим количеством гидроаппаратов, но и взаимосвязями между ними.

Под сложной системой обычно понимается объект, предназначенный для выполнения некоторых заданных функций, который может быть расчленен на элементы, каждый из них также выполняет определенные функции и находится во взаимодействии с другими элементами системы.

Понятие сложной системы условно. Оно может применяться как к машинам в целом (экскаватор, трактор, кран), так и к отдельным узлам и механизмам, в частности к гидроприводу.

Большей сложностью обладают, как правило, автоматизированные гидросистемы. Чем сложнее система, тем более разнообразны требования к ее функционированию и тем на большее число выходных параметров устанавливаются нормативы. Сложная система работает, как правило, в широком диапазоне условий эксплуатации.

Современные гидросистемы состоят из десятков и сотен отдельных аппаратов и тысяч деталей, и все это должно надежно функционировать в течение заданного периода времени.

Факторы, отрицательно влияющие на надежность сложных гидросистем:

- большое число элементов, отказ каждого из которых может привести к отказу всей системы;
- сложные системы часто являются уникальными или имеются в небольших количествах (для некоторого данного производства) как, например, гидрофицированные путевые машины (в этом случае использование статистических данных для оценки их работоспособности имеет известные трудности, что усугубляется даже

или

$$\sigma_{yi} = \sqrt{\sum_1^l \left( \frac{C_{kj} m_{yj}}{m_{xj}} \right)^2} \sigma_{xj}^2.$$

Для нахождения законов распределения  $f(y)$  параметра состояния по известным законам распределения  $f_i(x_i)$  возмущений можно применить метод статистического моделирования (*метод Монте-Карло*), суть которого состоит в том, что зависимость  $y = F(x)$  выходного параметра (параметра состояния) от возмущения реализуется многократно, всякий раз при новых, случайных значениях  $x_i$ . Полученные случайные значения параметра состояния подвергаются статистической обработке, подобно обработке результатов испытаний.

Статистическое моделирование базируется на формировании случайных чисел (значений  $x_i$ ), подчиняющихся определенному закону распределения, в качестве исходного распределения принимается равномерное в интервале  $(0,1)$ . Для получения этих чисел используются таблицы, генераторы случайных чисел и алгоритмы формирования случайных чисел на ПК.

Реализация  $x_i$  некоторой случайной величины  $x$ , имеющей математическое ожидание  $m_x$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_x$ , формируется при моделировании в виде  $x_i = m_x + \sigma_x \varepsilon_i$ , где  $\varepsilon_i$  — случайное число, которое в серии проб воспроизводит закон распределения случайной величины  $x$ .

В том случае, когда требуется моделировать случайные величины с законом, отличным от равномерного закона распределения, производится преобразование равномерного распределения в интервале  $(0,1)$  в заданное с плотностью  $f(x)$ . Это преобразование можно осуществить на основании того, что величина

$$r = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

распределена равномерно от 0 до 1. Решение последнего уравнения относительно  $x$  дает зависимость, преобразующую последовательность равно распределенных случайных чисел  $r_i$  в последовательность случайных чисел  $x_i$ , распределенных по закону  $f(x)$ . Так, для экспоненциального распределения  $f(x)$  получим

$$x_i = -1/\lambda \ln(r_i).$$

$$P(k_{js} / D_{\mu}) = \begin{cases} P(k_{js} / D_{\mu}) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j} + 1}; s \neq r, \\ P(k_{jr} / D_{\mu}) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j} + 1} + \frac{1}{N_{\mu j} + 1}; s = r. \end{cases}$$

В качестве примера применения метода Байеса рассмотрим следующий случай.

Пусть при наблюдении за гидроприводом механизма поворота экскаватора наблюдаются два признака: снижение рабочих скоростей поворота —  $k_1$  и повышенный шум в клапанной коробке. Для экскаваторов это связано с падением объемного КПД мотора (состояние  $D_1$ ) либо с нарушением работы клапанов (изменение расходной характеристики) — состояние  $D_2$ . При нормальном состоянии ( $D_3$ ) признак  $k_1$  — не наблюдается, а признак  $k_2$  — наблюдается примерно в 5 % случаев.

На основании статистических данных известно, что примерно 80 % находящихся в эксплуатации экскаваторов находятся в нормальном состоянии, 15 % приводов вращения имеют состояние  $D_1$ , и 5 % — состояние  $D_2$ . Известно также, что признак  $k_1$  встречается при состоянии  $D_1$  в 90 %, а при состоянии  $D_2$  — в 50 %; признак  $k_2$  при состоянии  $D_1$  встречается в 20 %, а при состоянии  $D_2$  — в 90 %.

Найдем сначала вероятности состояний привода, когда обнаружены оба признака

$$\begin{aligned} P(D_1 / k_1 k_2) &= \frac{0,15 \cdot 0,9 \cdot 0,2}{0,15 \cdot 0,9 \cdot 0,2 + 0,05 \cdot 0,9 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = \\ &= \frac{0,027}{0,027 + 0,0225} = \frac{0,027}{0,0495} = 0,545454; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(D_2 / k_1 k_2) &= \frac{0,05 \cdot 0,5 \cdot 0,9}{0,05 \cdot 0,5 \cdot 0,9 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,2 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = \\ &= 0,4545454. \end{aligned}$$

$t = 0$ ,  $C_1(0)$  — начальные затраты на создание привода;  $C_2(t)$  — ожидаемый доход для привода, который в момент  $t = 0$  находился в неработоспособном состоянии,  $C_2(0) = C_1(0)$ .

Пусть в интересующий нас момент времени  $t$  привод находился в работоспособном состоянии. В течение интервала  $dt$  привод может остаться исправным либо отказать. Если привод исправен в течение  $dt$ , то от его применения имеем доход  $C_1 dt$  плюс ожидаемый доход  $C_1(t)$ , который он принесет за  $t$  единиц времени. Вероятность исправного состояния за  $dt$  равна  $1 - \lambda dt$ . Привод также может отказать за  $dt$  с вероятностью  $\lambda dt$ . В результате суммарный доход от исправного привода за интервал  $t + dt$  определяется зависимостью

$$C_1(t + dt) = (1 - \lambda dt)[C_1 dt + C_1(t)] + \lambda dt C_2(t). \quad (5.12)$$

Теперь пусть в момент  $t$  привод находился в неработоспособном состоянии. Тогда в течение  $dt$  привод может оставаться в неисправном состоянии или может быть восстановлен. Рассуждая аналогично предыдущему, получим

$$C_1(t + dt) = (1 - \mu dt)[C_1 dt + C_1(t)] + \mu dt C_2(t). \quad (5.13)$$

Преобразуем уравнения (5.12) и (5.13), пренебрегая членами с множителем  $(dt)^2$ , получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_1(t) &= \bar{C}_1 - \lambda[C_1 - C_2(t)], \\ \frac{d}{dt} C_2(t) &= \bar{C}_1 - \mu[C_1 - C_2(t)]. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Система (5.14) описывает изменение показателя экономичности привода при эксплуатации.

Применив преобразование Лапласа к системе (5.14), получим алгебраические уравнения относительно оператора  $s$ :

$$\begin{aligned} sC_1(s) - C_1(0) &= \frac{1}{s} \bar{C}_1 - \lambda[C_1(s) - C_2(s)], \\ sC_2(s) - C_2(0) &= \frac{1}{s} \bar{C}_1 - \mu[C_1(s) - C_2(s)]. \end{aligned} \quad (5.15)$$