

УДК 62-82

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ ЗАМЕНЫ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Павлов А.И., Тарбеев А.А.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
Йошкар-Ола, e-mail: PavlovAI@volgatech.net

Представлен алгоритм действий для принятия решений о замене (ремонте) элементов гидропривода транспортно-технологических машин или продолжении их функционирования по назначению (на примере гидроцилиндров). Предложенная методика предполагает проведение расчетов с помощью простейших приемов теории марковских цепей по определению целесообразности дальнейшей эксплуатации элементов гидропривода по полученным значениям параметров диагностирования. В частности, с помощью переходной матрицы простой однородной дискретной цепи Маркова находится состояние гидроцилиндра, при котором перетечки рабочей жидкости внутри гидроцилиндра (утечки из штоковой полости гидроцилиндра) достигнут такого значения, при котором становится нецелесообразной дальнейшая эксплуатация машины из-за существенного снижения ее производительности (или увеличения стоимости ее содержания из-за необходимости постоянной дозаправки рабочей жидкостью). Методика предусматривает использование результатов диагноза технического состояния элементов гидропривода с помощью имеющихся методов диагностики. Например, для гидроцилиндров можно использовать метод утечек, основанный на определении количества жидкости, вытекшей из поршневой или штоковой полостей гидроцилиндра в крайних положениях поршня при подаче максимального давления рабочей жидкости в течение определенного времени. Расчетами доказано, что стратегия замены элементов гидропривода может быть основана на минимизации материальных затрат при предельно допустимых параметрах функционирования гидропривода, как и всей машины. Расчеты проведены на примере гидроцилиндра подъема стрелы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины Харвестер JD 1470F при ее эксплуатации на лесопромышленном предприятии ООО «Лузалес» в Республике Коми – опорном пункте Поволжского государственного технологического университета. Данный регион приравнен к районам Крайнего Севера, где зимний период эксплуатации превышает по срокам летний период, что весьма важно для исследования характера износа уплотнений гидроцилиндров и других резино-технических элементов гидропривода, подверженных воздействию отрицательных температур. Алгоритм определения стратегии замены элементов гидропривода основан на расчете полного суммарного дохода от эксплуатации машины.

**Ключевые слова:** марковская цепь, диагноз, ресурс, доход, гидропривод, эффективность функционирования

## THE METHOD OF DETERMINING THE STRATEGY OF REPLACING HIGH PRESSURE HOSES, HYDRAULIC TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

Pavlov A.I., Tarbeev A.A.

*Povolzhsky State Technological University, Yoshkar-Ola, e-mail: PavlovAI@volgatech.net*

The algorithm of actions for making decisions on the replacement (repair) of hydraulic drive elements of transport-technological machines or the continuation of their functioning by purpose (for example, hydraulic cylinders) is presented. The suggested technique assumes carrying out of calculations by means of the elementary receptions of the theory of Markov chains on definition of expediency of the further operation of elements of a hydraulic drive on the received values of parameters of diagnosing. In particular, with the help of a transition matrix of a simple homogeneous discrete Markov chain, the state of the hydraulic cylinder is located, in which the leakage of hydraulic fluid inside the hydraulic cylinder (leakage from the rod cavity of the hydraulic cylinder) will reach such a value that it becomes inexpedient to continue to operate the machine due to a significant decrease in its productivity (or increase in the cost of its maintenance due to the need for constant refueling of the working fluid). The technique involves the use of the results of the diagnosis of the technical condition of the hydraulic drive elements using the available diagnostic methods. For example, for hydraulic cylinders, a leakage method can be used based on determining the amount of fluid leaking from the piston or rod cavity of the hydraulic cylinder in the extreme positions of the piston when the maximum pressure of the working fluid is applied for a certain time. It has been proved by calculations that the strategy of replacement of hydraulic actuator elements can be based on minimization of material costs at maximum permissible parameters of hydraulic drive functioning, as well as the whole machine. The calculations are based on the example of the hydraulic cylinder for lifting the jib of the felling and delimiting machine Harvester JD 1470F in its operation at the timber industry enterprise Luzales LLC in the Komi Republic, the mainstay of the Volga State Technological University. This region is equal to the regions of the Far North where the winter period of operation exceeds the summer period, which is very important for studying the nature of wear of the seals of hydraulic cylinders and other rubber-technical elements of the hydraulic drive exposed to negative temperatures. The algorithm for determining the strategy for replacing the elements of the hydraulic drive is based on calculating the total revenue from the operation of the machine.

**Keywords:** Markov chain, diagnosis, resource, income, hydraulic drive, efficiency of functioning

В Республике Коми условия эксплуатации харвестеров и форвардеров, имеющих в гидросистеме большое количество резино-технических изделий (уплотнения, тру-

бопроводы и др.), сопоставимы с климатом Финляндии, где изготавливаются данные машины. Возникает вопрос, почему в России данные лесные машины быстрее выходят из

стройка, несмотря на то, что правила эксплуатации на современных лесопромышленных предприятиях выполняются. Это подтверждает опыт эксплуатации данных машин [1], взятых под наблюдение в опорном пункте Поволжского государственного технологического университета – ООО «Лузалес», расположенном в Прилузском районе Республики Коми.

Увеличить срок службы машин (особенно в северных регионах) можно путем обнаружения и предупреждения отказов элементов гидропривода за счет своевременной замены (или ремонта), произведенной по результатам диагноза их технического состояния [2, 3]. Получение диагноза без принятия решения по замене элементов гидропривода не гарантирует их работоспособность при дальнейшей эксплуатации машины. Так, например, если имеем значение параметра диагностирования уплотнений гидроцилиндра, приближенное к предельному значению, встает вопрос, отправлять их в ремонт или продолжать эксплуатацию машины. Речь идет об экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации гидроцилиндра: если не отправлять гидроцилиндр в ремонт, то из-за утечки из его штоковой полости встанет необходимость дозаправки рабочей жидкостью, что приводит к дополнительным материальным затратам. Перетечки жидкости внутри гидроцилиндров, на первый взгляд не ведут к дополнительным затратам, однако доходы уменьшаются из-за перерасхода топлива в результате снижения производительности машины. В то же время, если провести замену или отправить в ремонт гидроцилиндр при имеющейся возможности его дальнейшей эксплуатации, то будем иметь недоиспользованный ресурс, что приводит также к дополнительным затратам.

В этой связи разработка методики определения стратегии (своевременности) замены или ремонта элементов гидропривода является актуальной.

**Цель исследования:** минимизация материальных затрат при допустимой эффективности функционирования гидропривода.

**Методы исследования:** методы статистики и моделирования, основные законы рыночной экономики.

Снижение эффективности функционирования транспортно-технологических машин, в том числе лесных, может быть связано не только с простом машин, значительный материальный ущерб возникает также в связи с постепенной потерей рабочих свойств резино-технических изделий, связанных с воздействием отрицательных температур, в частности – уплотнений ги-

дроцилиндров [1, 3]. Своевременная замена уплотнений или ремонт гидроцилиндров при получении диагноза их технического состояния позволит значительно снизить материальные потери. В этой связи может быть предложена стратегия принятия решения о целесообразности проведения ремонтных работ или продолжения работы машины, обеспечивающая максимальную эффективность ее функционирования при минимизированных затратах на эксплуатацию. Для решения такой задачи предпочтительными являются два варианта:

1) максимальная эффективность функционирования машины при минимальных материальных затратах;

2) минимальные материальные затраты при предельной эффективности функционирования.

На наш взгляд, более привлекательной является задача обеспечения минимума материальных затрат (вариант 2). В этом случае предельное значение эффективности целесообразно выразить в соответствии с условиями равного времени безотказного функционирования данных вариантов.

В качестве примера сделаем расчеты гидроцилиндр подъема стрелы машины Харвестер JD 1470F. Состояние его уплотнений будем определять с помощью средств диагностики через отрезок времени  $\Delta t = 0 - t_0$ .

Допустим, что уплотнения гидроцилиндра будут иметь неработоспособное состояние только в течение отрезка времени  $\Delta t$ , поэтому можно допустить возможность появления двух событий:

1)  $X(t)$  – гидроцилиндр имеет дефект (вероятность достижения предельного состояния уплотнений  $Q$ );

2)  $F(t)$  – уплотнения гидроцилиндра находятся в работоспособном состоянии (вероятность  $1 - Q$ ).

Введем упрощенное обозначение событий –  $X$  и  $F$ .

Предположим, что возникновение событий  $X$  и  $F$  зависит только от значений диагностических параметров предыдущего контроля состояния уплотнений. Поэтому можно считать, что очередность диагностических испытаний гидроцилиндров через интервалы  $\Delta t$ , это – дискретная марковская цепь [4, 5], причем простая, обладающая свойством однородности. Известно, что данная цепь может быть описана следующей переходной матрицей [6]:

$$P_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ Q & 1-Q \end{vmatrix}.$$

Вероятности в соответствии с данной матрицей будут  $Q(X/X) = Q_{XX} = 1$ ,

$Q_{XF} = 0$ , то есть состояние  $X$  будет поглощающим (требуется замена уплотнений гидроцилиндра). Количество попаданий в неработоспособное состояние гидроцилиндра определяется по формуле

$$K = (I - G)^{-1},$$

где  $I$  – единичная матрица,  $G$  – неработоспособное состояние гидроцилиндра.

Для решения поставленной задачи интерес представляет нахождение оптимального количества и периодичность проведения технических осмотров для определения значений параметров диагностирования технического состояния гидроцилиндра.

Для определения целесообразности замены или ремонта гидроцилиндра под  $N$ -стратегией будем понимать оптимальное решение, которое необходимо принять оператору машины: заменять уплотнения или продолжить эксплуатацию машины на следующий период  $\Delta t$ . Вполне очевидно, что каждое решение оператора должно быть связано либо с доходами (получение прибыли от эксплуатации машины), либо с материальными затратами (простой, потери рабочей жидкости, стоимость замены уплотнений гидроцилиндра и т.д.). Так как при неработоспособном состоянии гидроцилиндра (по диагностическому параметру) можно принять единственно правильное решение (замена уплотнений), то за исходное принимается состояние  $F$  (работоспособное). Составим таблицу возможных состояний, стратегий и доходов от эксплуатации машины (табл. 1).

Среднюю величину прибыли (дохода) за весь период наработки машины  $t$  представим в виде выражения

$$u_i(n) = q_i + \bar{u}_i(n-1),$$

где  $q_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \cdot u_{ij}$  – непосредственный ожидаемый доход (при одном  $\Delta t$ );  $\bar{u}_i(n-1) = \sum Q_{ij} \cdot u_j(n-1)$  – полный доход при  $n-1$  шагов (средний).

Данное выражение учитывает вероятность возникновения событий  $X$  или  $F$  при каждом шаге цепи Маркова и получаемые при этом доходы.

Как было сказано выше, оптимальной будет считаться стратегия принятия решений при получении максимальной прибыли (дохода), подсчитанной по последнему выражению.

Максимальный доход может быть получен при условии учета доходов при всех шагах  $\Delta t$ , а не только при шаге ожидаемого дохода. Это возможно при условии выполнения принципа оптимальности Беллмана [6, 7], согласно которому многошаговый процесс является оптимальным, если он оптимален на каждом шаге. В данной задаче рассматривается случайный процесс, что относится к задачам стохастического динамического программирования, поэтому необходимы конкретные исходные данные.

Вероятности перехода ( $Q_{ij}^k$ ) уплотнений гидроцилиндра из работоспособного состояния  $F$  в неработоспособное  $X$  будем определять для всего срока эксплуатации машины.

Доходы  $u_{ij}^k$  определяются следующим образом:

$$u_{FX}^{(1)} = u - (u_{np} + u_{p.ж.} + u_{mp}),$$

где  $u$  – доход от эксплуатации работоспособной машины в течение  $\Delta t = 250$  моточасов, руб.;  $u_{np}$  – стоимость потерь при простоях машины из-за неисправности, руб.;  $u_{p.ж.}$  – дополнительные материальные потери из-за утечки рабочей жидкости из штоковой полости гидроцилиндра, руб.;  $u_{mp}$  – стоимость уплотнений гидроцилиндра с учетом их замены, руб.

$$u_{np} = K_{np} \cdot T_{cp} \cdot K_p,$$

где  $K_{np}$  – затраты труда рабочих на устранение отказа, час;  $K_{cp}$  – тарифная ставка ремонтных рабочих (часовая), р/ч;  $K_p$  – районный коэффициент.

$$u_{mp} = C_y + t \cdot T_{cp} \cdot K_p,$$

где  $C_y$  – стоимость уплотнений гидроцилиндра, руб.;  $t$  – время устранения отказа, ч.

Таблица 1

Возможные состояния уплотнений гидроцилиндров и полученные доходы

Состояние $i$	Стратегия $N$	Вероятность перехода		Доходы	
		$Q_{iX}^k$	$Q_{iF}^k$	$u_{iX}^k$	$u_{iF}^k$
$F$	Замена уплотнений гидроцилиндра	$Q_{FX}^{(1)}$	$Q_{FF}^{(1)}$	$u_{FX}^{(1)}$	$u_{FF}^{(1)}$
	Уплотнения не менять	$Q_{FX}^{(2)}$	$Q_{FF}^{(2)}$	$u_{FX}^{(2)}$	$u_{FF}^{(2)}$

$$u = \Pi_{\text{см}} \cdot \Delta t \cdot C_{\text{др}},$$

где  $\Pi_{\text{см}}$  – сменная производительность лесосечной машины,  $\text{м}^3/\text{см}$ ;  $C_{\text{др}}$  – стоимость 1  $\text{м}^3$  заготовленной древесины, руб.

$$u_{FF}^1 = u - (u_{\text{мп}} + u_{\text{выр}}),$$

где  $u_{\text{выр}}$  – потери при снижении выработки машины за счет простоя, руб.

$$u_{FF}^2 = u - (u_{\text{п.жс.}} + u_{\text{нр}}); u_{FF}^2 = u$$

Таким образом, была получена следующая матрица доходов

$$R = \begin{vmatrix} u_{FX}^1 & u_{FF}^1 \\ u_{FX}^2 & u_{FF}^2 \end{vmatrix}.$$

Зная соответствующие вероятности переходов для всего периода эксплуатации  $Q_{ij}^k = Q(X/F)$  можно определить ожидаемый доход:

$$Q_{ij}^k = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0,02 & 0,98 \end{vmatrix}$$

$$q_1^1 = Q_{FX}^1 \cdot u_{FX}^1 + Q_{FF}^1 \cdot u_{FF}^1;$$

$$q_2^2 = Q_{FX}^2 \cdot u_{FX}^2 + Q_{FF}^2 \cdot u_{FF}^2.$$

Расчет среднего ожидаемого дохода за период  $n - 1$  шагов процесса целесообразно начать с последнего этапа. Очевидно, что на последнем этапе процесса

$$\bar{u}_i(0) = u_2(0) = 0.$$

Значит за один шаг до окончания процесса величина полного дохода будет равна непосредственно доходу (ожидаемые):

$$\bar{u}_1(1) = q_1^1; \bar{u}_2(1) = q_2^2.$$

За два шага до окончания процесса

$$\bar{u}_1(2) = Q_{FX}^1 \cdot \bar{u}_1(1) + Q_{FF}^1 \cdot \bar{u}_2(1),$$

$$\bar{u}_2(2) = P_{FX}^2 \cdot \bar{u}_1(1) + P_{FF}^2 \cdot \bar{u}_2(1).$$

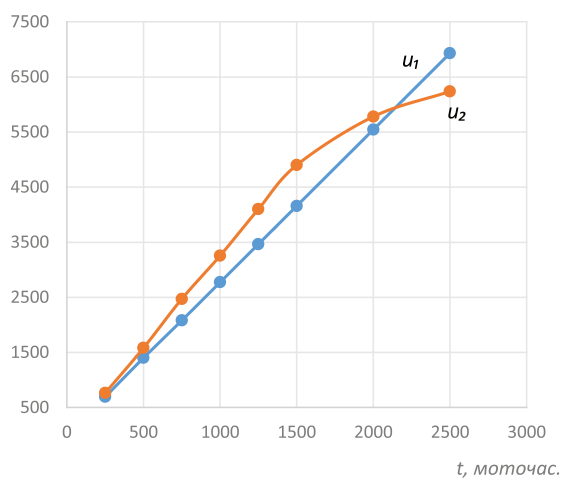
Суммарный доход (полный) за два шага до окончания процесса будет равен

$$u_1(1) = q_1^1 + \bar{u}_1(2), \quad u_2(2) = q_2^2 + \bar{u}_2(2).$$

В табл. 2 представлены значения полных суммарных доходов от эксплуатации машины Харвестер JD 1470F (гидроцилиндра подъема стрелы) в периоды эксплуатации.

По данным табл. 2 построены зависимости суммарных доходов от эксплуатации машины Харвестер JD 1470F за период круглогодичной эксплуатации, которые представлены на рисунке. Данные зависимости доказывают, что при снижении дохода от эксплуатации гидроцилиндров необходима замена их уплотнений, иначе могут возникнуть дополнительные затраты.

$u_i^F$ , руб.



Изменение суммарного дохода при эксплуатации машины Харвестер JD 1470F

### Выводы

1. При принятии решений о замене (ремонте) элементов гидропривода транспортных-технологических машин или продолжении их функционирования по назначению в расчетах можно использовать переходную матрицу простой, однородной, дискретной цепи Маркова, которая позволяет определять вероятности переходов гидроцилиндров из работоспособного в неработоспособное состояние по диагностическим параметрам предшествующих осмотров машин.

Таблица 2

Полные суммарные доходы от эксплуатации гидроцилиндров

$\Delta t$ , моточас.	250	500	750	1000	1250	1500	2000	2500
$Q(X/F)$	0,022	0,0411	0,11	0,18	0,32	0,46	0,72	1
$u_1^F$ , руб.	686	1389	2081	2769	3462	4161	5548	6927
$u_2^F$ , руб.	759	1521	2269	2998	3679	4490	5657	6241

2. Полученные графики суммарных доходов (полных) доказывают, что при определенных значениях доходов от эксплуатации машины необходимо проводить ремонтные работы по замене уплотнений гидроцилиндра (в представленном примере – при наработке 2250 моточасов), иначе возникнут дополнительные материальные затраты из-за возможной утечки рабочей жидкости или снижении производительности машины. При преждевременной замене уплотнений ожидаемый доход значительно уменьшится из-за простоя машины.

#### Список литературы

1. Павлов А.И. Надежность, диагностика и защита гидроприводов транспортно-технологических машин: монография / А.И. Павлов, А.А. Тарбеев, С.Л. Вдовин; под общ. ред. проф. А.И. Павлова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – 376 с.
2. Гринчар Н.Г. Прогнозирование остаточного ресурса гидроприводов по результатам диагностики / Н.Г. Гринчар // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 3. – С. 34–35.
3. Никитин О.Ф. Надежность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов / О.Ф. Никитин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 312 с.
4. Денисенко Т.И. Использование марковских цепей при решении различных прикладных задач // Т.И. Денисенко // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 1. – С. 27–28.
5. Борисов А.В. Минимаксное оценивание в системах наблюдения с марковскими цепями по интегральному критерию / А.В. Борисов, А.В. Босов, А.И. Стефанович // Институт проблем информатики РАН. – М.: Автоматика и телемеханика, 2011. – № 2. – С. 48–54.
6. Gorban A.N. The Markov Ordering Approach. Entropy 12 / A.N. Gorban, P.A. Gorban, G. Judge. – 2010. – № 5. – P. 1145–1193.
7. Кельберт М.Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения // М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. – М.: МЦНМО, 2010. – 295 с.