

Н. Ф. Ковалев, С. И. Акунович, М. К. Струк

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЛХ-3

Количественная оценка надежности полуавтоматических линий лесной промышленности и их отдельных систем может быть произведена с использованием методики ЭНИИМСа [1]. В связи с тем, что до настоящего времени анализу надежности полуавтоматических линий уделялось мало внимания, мы считаем целесообразным изложить в качестве примера расчет надежности полуавтоматической линии массового применения ПЛХ-3 для разделки хлыстов. В примере расчета использованы обозначения элементов электро- и гидроавтоматики, соответствующие принципиальным схемам ПЛХ-3.

В статье излагается метод экономической оценки эффективности роста величины коэффициента технического использования линии, достигаемого любыми средствами, в том числе и от применения функциональных циклограмм до расчетного значения.

Указанный метод экономической оценки разработан нами. Далее производится расчет относительных баллов подверженности отказам. Количество электрических устройств, число контактов подсчитываются по принципиальной электро- и гидравлической схеме и вносятся в расчетные таблицы (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Расчетная таблица баллов подверженности отказам  
и удельной длительности настроек

Наименование элементов оборудования линии	Относительные баллы под- верженности отказам с учетом поправки на мощ- ность $r \cdot 10^6$	Относительные баллы удельной длительности настроек $h \cdot 10^6$
1	2	3
<b>Двигатели</b>		
длительного действия:		
1Д, $N = 14$ квт	$r_{д.д} = 2 \cdot 0,8 = 1,6$	$h_{д.д} = 2 \cdot 3 = 6$
2Д, $N = 4,5$ квт	$r_{д.д} = 1,3 \cdot 0,8 = 1,04$	$h_{д.д} = 1,3 \cdot 3 = 3,9$
5Д, $N = 7$ квт	$r_{д.д} = 1,7 \cdot 0,8 = 1,36$	$h_{д.д} = 1,7 \cdot 3 = 5,1$
	$\Sigma r_{д.д} = 4$	$\Sigma h_{д.д} = 15$
специальные:		
3Д, $N = 10$ квт	$r_{д.с} = 2 \cdot 1,0 = 2$	$h_{д.с} = 2 \cdot 8 = 16$
4Д, $N = 3,5$ квт	$r_{д.с} = 1,0$	$h_{д.с} = 1 \cdot 8 = 8$
	$\Sigma r_{д.с} = 3$	$\Sigma h_{д.с} = 24$

Продолжение таблицы

1	2	3
<b>Контакты</b>		
реверсивные:		
3В, $N = 10$ квт, $n'_k = 2, n''_k = 3$	$r_{к.р} = 2[4 + 0,5(2 + 3 \cdot 3)] = 19$	$h_{к.р} = 2(3 + 0,2 \cdot 5) = 8$
4В, $N = 3,5$ квт, $n'_k = 2, n''_k = 3$	$r_{к.р} = 4 + 0,5(2 + 3 \cdot 3) = 9,5$	$h_{к.р} = 3 + 0,2 \cdot 5 = 4$
3Н, 4Н, $N = 10$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 4$	$r_{к.р} = 2[4 + 0,5(1 + 3 \cdot 4)] = 21$	$h_{к.р} = 2(3 + 0,2 \cdot 4) = 8$
4Н, $N = 3,5$ квт, $n'_k = 4, n''_k = 4$	$r_{к.р} = 4 + 0,5(4 + 3 \cdot 4) = 12$	$h_{к.р} = 3 + 0,2 \cdot 8 = 4,6$
	$\Sigma r_{к.р} = 61,5$	$\Sigma h_{к.р} = 24,6$
длительного включения:		
1В, $N = 14$ квт, $n'_k = 2, n''_k = 3$	$r_{к.д} = 2[2 + 0,5(2 + 3 \cdot 3)] = 15$	$h_{к.д} = 2[1,2 + 0,2 \cdot 5] = 4,4$
2В, $N = 4,5$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 3$	$r_{к.д} = 1,3[2 + 0,5(1 + 3 \cdot 3)] = 9,1$	$h_{к.д} = 1,3(1,2 + 0,2 \cdot 4) = 2,6$
5В, $N = 7$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 3$	$r_{к.д} = 1,7[2 + 0,5(1 + 3 \cdot 3)] = 11,9$	$h_{к.д} = 1,7(1,2 + 0,2 \cdot 4) = 3,4$
	$\Sigma r_{к.д} = 36$	$\Sigma h_{к.д} = 10,4$
циклические:		
НС1, $N = 10$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 3$	$r_{к.ц} = 2[3 + 0,5(1 + 3 \cdot 3)] = 16$	$h_{к.ц} = 2[2 + 0,2 \cdot 4] = 5,6$
11С2, 21С2, 21С1, $N = 10$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 2$	$r_{к.ц} = 3 \cdot 2[3 + 0,5(1 + 3 \cdot 2)] = 39$	$h_{к.ц} = 3 \cdot 2(2 + 0,2 \cdot 3) = 15$
12С3, 22С3, $N = 3$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 3$	$r_{к.ц} = 2[3 + 0,5(1 + 3 \cdot 3)] = 16$	$h_{к.ц} = 2(2 + 0,2 \cdot 4) = 5,6$
12С1, 12С2, 22С1, 22С2, $N = 3$ квт, $n'_k = 1, n''_k = 2$	$r_{к.ц} = 4[3 + 0,5(1 + 3 \cdot 2)] = 26$	$h_{к.ц} = 4(2 + 0,2 \cdot 3) = 10,4$
1КПТ, $n'_k = 0, n''_k = 3$	$r_{к.ц} = 3 + 0,5(0 + 3 \cdot 3) = 7,5$	$h_{к.ц} = 2 + 0,2 \cdot 3 = 2,6$
2КПТ, $n'_k = 0, n''_k = 1$	$r_{к.ц} = 3 + 0,5(0 + 3 \cdot 1) = 4,5$	$h_{к.ц} = 2 + 0,2 \cdot 1 = 2,2$
	$\Sigma r_{к.ц} = 109$	$\Sigma h_{к.ц} = 42$
Реле промежуточное:		
1РД, 12РД, $n'_k = 1, n''_k = 2$	$r_p = [1 + 0,5(1 + 3 \cdot 2)] = 4,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 3 = 0,8$
1РПО, РН, $n'_k = 0, n''_k = 6$	$r_p = 2[1 + 0,5(0 + 3 \cdot 6)] = 20$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 6 = 1,4$
1РСК, $n'_k = 1, n''_k = 2$	$r_p = 1 + 0,5(1 + 3 \cdot 2) = 4,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 3 = 0,8$
2РСК, $n'_k = 0, n''_k = 5$	$r_p = 1 + 0,5(0 + 3 \cdot 5) = 8,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 5 = 1,2$
РНП, $n'_k = 2, n''_k = 2$	$r_p = 1 + 0,5(2 + 3 \cdot 2) = 5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 4 = 1$
РПТ, $n'_k = 3, n''_k = 2$	$r_p = 1 + 0,5(3 + 3 \cdot 2) = 5,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 5 = 1,2$
РТ, $n'_k = 4, n''_k = 1$	$r_p = 1 + 0,5(4 + 3 \cdot 1) = 4,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 5 = 1,2$
РИЗ, $n'_k = 3, n''_k = 1$	$r_p = 1 + 0,5(3 + 3 \cdot 1) = 4$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 4 = 1,0$
ШИ, $n'_k = 29, n''_k = 1$	$r_p = 1 + 0,5(29 + 3 \cdot 1) = 17$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 30 = 6,2$
РПО, $n'_k = 0, n''_k = 1$	$r_p = 1 + 0,5(0 + 3 \cdot 1) = 2,5$	$h_p = 0,2 + 0,2 \cdot 6 = 1,4$
	$\Sigma r_p = 76$	$\Sigma h_p = 16,2$
Путевые выключатели:		
РН, $n_k = 2$	$r_{п.в} = 1 + 0,7 \cdot 2 = 2,4$	$h_{п.в} = 0,5 + 0,7 \cdot 2 = 1,9$
ВО, ВЛС, ВД, $n_k = 1$	$r_{п.в} = 3(1 + 0,7 \cdot 1) = 5,1$	$h_{п.в} = 3(0,5 + 0,7 \cdot 1) = 3,6$

Продолжение таблицы

1	2	3
ДИ, $n_k = 30$	$r_{п.в} = 1 + 0,7 \cdot 30 = 22$ $\Sigma r_{п.в} = 29,5$	$h_{п.в} = 0,5 + 0,7 \cdot 30 = 21,5$ $\Sigma h_{п.в} = 27$
Микропереключатели: 1ВД, 12ВД, $n_k = 1$	$r_{мп} = 3 + 2 \cdot 1 = 5; \Sigma r_{мп} = 5$	$\Sigma h_{мп} = 0,5 + 0,7 = 1,2$
Электромагниты: М, МТ, МП, МО, МД МН, МЛС, МПС, МШ	$r_э = 17 \cdot 0,5 = 8,5; \Sigma r_э = 8,5$	$\Sigma h_э = 17 \cdot 0,4 = 6,8$
Кнопки управления: $n_k = 2$	$\Sigma r_{к.у} = 5(0,1 + 0,5 \cdot 2) = 5,5$	$\Sigma h_{к.у} = 5(0,1 + 0,1 \cdot 2) = 1,5$
Пакетные переключатели: ПА, ПТ, 4П, $n_k = 2$	$r_{п.п} = 3(3 + 0,5 \cdot 2) = 12$	$h_{п.п} = 3(3 + 0,1 \cdot 2) = 9,6$
ПС, $n_k = 4$	$r_{п.п} = 3 + 0,5 \cdot 4 = 5$ $\Sigma r_{п.п} = 17$	$h_{п.п} = 3 + 0,1 \cdot 4 = 3,4$ $\Sigma h_{п.п} = 13$

Погрупповой балл подверженности отказам электрооборудования равен

$$R_э = \alpha_4 (\Sigma r_{дл} + \Sigma r_{кр} + \Sigma r_{кл} + \Sigma r_{пп}) \cdot 10^{-6} + \alpha_1 (\Sigma r_{дс} + \Sigma r_{ку} + \Sigma r_p + \Sigma r_{пв} + \Sigma r_{мп} + \Sigma r_э + \Sigma r_{кш}) \cdot 10^{-6} = (4 + 36 + 61,5 + 17) \cdot 10^{-6} + \frac{1}{0,18} (3 + 109 + 76 + 29,5 + 5 + 8,5 + 5,5) \cdot 10^{-6} = 1432,4 \cdot 10^{-6}$$

Подгрупповая характеристика подверженности отказам электрооборудования

$$V_э = 4,5 \cdot 1432,4 \cdot 10^{-6} = 0,0064 \text{ мин}^{-1}$$

Таблица 2

Расчет баллов гидрооборудования

Элементы гидрооборудования ПЛХ-3	Количество	Относительные баллы			
		подверженности отказам $r_r \cdot 10^5$		длительности настройки $h_r \cdot 10^4$	
		на один элемент	для линии ПЛХ-3	на один элемент	для линии ПЛХ-3
Насосы	1	2,0	2,0	1,0	1,0
Цилиндры	6	2,8	16,8	1,1	6,6
Клапаны	6	1,4	8,4	0,2	1,2
Золотники	6	1,4	8,4	0,2	1,2
Дроссели	4	1,4	5,6	0,2	0,8

$$\Sigma r_r \cdot n_r = 41,2$$

$$\Sigma h_r \cdot n_r = 10,8$$

Погрупповой балл удельной длительности настройки

$$H_э = \frac{1}{\text{мин}} (15 + 24,6 + 10,4 + 13) \cdot 10^{-5} + \frac{1}{0,18} (24 + 42 + 16,2 + 27 + 1,2 + 6,8 + 1,5) \cdot 10^{-5} = 722,4 \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}.$$

Групповая характеристика удельной длительности настройки электрооборудования:

$$B_э = 5,4 \cdot 722,4 \cdot 10^{-5} = 0,039 \frac{\text{мин}}{\text{мин}}.$$

Реле заказа длин 1РД—12РД и микропереключатели 1РД—12РД в каждом цикле работают по одному. В расчете их число соответственно принято равным 1. Тоже сделано с электромагнитами МД.

Погрупповой балл подверженности отказам гидрооборудования

$$R_г = 2 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{0,18} (16,8 + 8,4 + 8,4 + 5,6) \cdot 10^{-5} = 220 \cdot 10^{-5} \text{ мин}^{-1}.$$

Погрупповой балл удельной длительности настройки

$$H_г = 1 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{0,18} (6,6 + 1,2 + 1,2 + 0,8) \cdot 10^{-4} = 55 \cdot 10^{-4}.$$

Групповая характеристика частоты отказов гидрооборудования

$$V_г = 1,2 \cdot 220 \cdot 10^{-5} = 0,00264 \frac{\text{мин}}{\text{мин}}.$$

Групповая характеристика удельной длительности настроек

$$B_г = 2,6 \cdot 55 \cdot 10^{-4} = 0,0143 \frac{\text{мин}}{\text{мин}}.$$

Общая характеристика электро- и гидрооборудования ПЛХ-3:

$$V_{\text{общ}} = V_э + V_г = 0,064 + 0,00264 = 0,009 \frac{1}{\text{мин}};$$

$$B_{\text{общ}} = B_э + B_г = 0,039 + 0,0143 = 0,0533 \frac{1}{\text{мин}}.$$

Возможный предельный коэффициент технического использования ПЛХ-3, ограниченный надежностью систем электро- и гидрооборудования,

$$\eta_{эг} = \frac{1}{1 + B_{\text{общ}}} = \frac{1}{1 + 0,0533} = 0,94.$$

Общий коэффициент технического использования ПЛХ-3 с достаточной точностью может быть определен произведением сомножителей, каждый из которых характеризует определенную систему или группу,

$$\eta = \eta_{эг} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{т}},$$

где  $\eta_{эг}$  — коэффициент технического использования гидро- и электроаппаратуры;

$\eta_{\text{м}}$  — коэффициент технического использования механических систем;

$\eta_{\text{т}}$  — коэффициент технического использования транспортных систем.

Погрупповые характеристики электро- и гидрооборудования, вычисленные выше, дают возможность определять надежность, как вероятность безотказной работы в течение  $t$  мин.

$$R(t) = e^{-vt} = e^{-0,009t}.$$

Среднее время безотказной работы при экспоненциальном законе распределения вероятности:

$$\bar{x} = \frac{1}{V} = \frac{1}{0,009} = 111 \text{ мин.}$$

Время безотказной работы при вероятности 0,9:

$$0,9 = e^{-0,009t},$$

отсюда  $t = 11,5$  мин.

Ремонтируемость, как вероятность проведения настройки системы управления за время  $t$  или меньше  $t$ , равна

$$H(t) = 1 - e^{-\frac{V}{B}t} = 1 - e^{-\frac{0,009}{0,053}t} = 1 - e^{-0,17t}.$$

Среднее время одной настройки

$$\bar{y} = \frac{B_{\text{общ}}}{V_{\text{общ}}} = \frac{0,053}{0,009} = 5,9 \text{ мин.}$$

Время одной настройки с вероятностью 0,9 может быть определено следующим образом:

$$0,9 = 1 - e^{-0,17t},$$

отсюда  $t = 13,5$  мин.

Коэффициент технического использования, ограниченный работоспособностью электро- и гидроаппаратуры системы управления, определенный с вероятностью 0,9, равен

$$\eta_i = \frac{11,5}{11,5 + 13,5} = 0,46.$$

Влияние надежности системы управления на производительность оценивается сравнением ее при имеющемся коэффициенте технического использования с производительностью, близкой к технически возможной, заданной конструкторами, т. е.

$$\Pi_i = \frac{\Pi_p \cdot \eta_i}{\eta_p},$$

где  $\Pi_p$  — расчетная предельная производительность;  
 $\eta_p$ ,  $\eta_i$  — соответственно расчетный и фактический коэффициенты использования линии.

Для условий Мостовского лесоучастка Оленинского леспромхоза

$$\Pi_p = \frac{420 - \Pi}{t} = \frac{420 - 100}{1,55} = 206 \text{ м}^3/\text{см},$$

где  $\Pi$  — подготовительно-заключительное время;

$t$  — затраты времени на обработку 1 м<sup>3</sup> древесины, мин.

$$\text{При } \eta_p = 0,85 \quad \Pi_i = \frac{206 \cdot \eta_i}{0,85} = 242,3 \eta_i \text{ м}^3/\text{см.}$$

Себестоимость раскряжки 1 м<sup>3</sup> древесины определяется как частное от деления себестоимости машиносмены (табл. 3) с учетом зарплаты на производительность, т. е.

$$C_i = \frac{Ц}{\Pi_i} = \frac{Ц \cdot \eta_p}{\eta_i},$$

где  $Ц$  — себестоимость машиносмены.

Таблица 3

Структура себестоимости машиносмены ПЛХ-3

Наименование затрат	Величина затрат в смену, руб.	
	при стоимости 1 квч = 2 коп.	при стоимости 1 квч = 5 коп.
Зарплата с начислениями	11,60	11,60
Электроэнергия	4,96	12,41
Амортизация	7,60	7,60
Текущий ремонт	4,60	4,60
Итого . . .	28,76	32,21

При  $Ц = \text{const}$ ,  $\eta_p = \text{const}$ ,  $\Pi_p = \text{const}$   $C_i$  является функцией  $\eta_i$ .

Следовательно, себестоимость раскряжки 1 м<sup>3</sup> древесины выражается как  $C_i = \frac{2876 \cdot 0,85}{206 \cdot \eta_i} = \frac{11,87}{\eta_i}$  коп./м<sup>3</sup> при стоимости 1 квч = 2 коп.;

$$C_i = \frac{3621 \cdot 0,85}{206 \cdot \eta_i} = \frac{14,95}{\eta_i} \text{ коп./м}^3 \text{ при стоимости 1 квч} = 5 \text{ коп.}$$

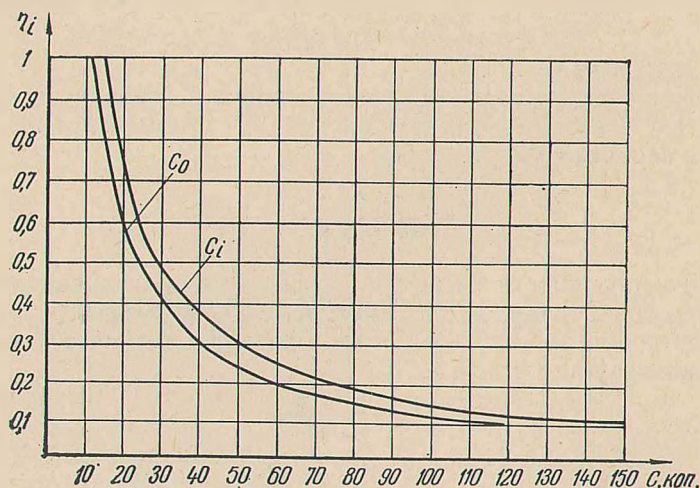


Рис. 1. График зависимости себестоимости раскряжки древесины на линии ПЛХ-3 Мостовского ЛПХ от величины коэффициента технического использования.

На графике представлены  $C_i$  и  $C_0$ , как функции  $\eta_i$ .

Как следует из графика (рис. 1), при стоимости электроэнергии 2 коп. за 1 квч и себестоимости раскряжки 1 м<sup>3</sup> древесины электропилы 21,9 коп. эксплуатация ПЛХ-3 становится убыточной при  $\eta_i \leq 0,52$ .

При стоимости электроэнергии 5 коп. за 1 квч и себестоимости раскряжевki 1 м<sup>3</sup> древесины электропилой 22,34 коп. эксплуатация ПЛХ-3 становится убыточной при  $\eta_i \leq 0,61$ . Следовательно, необходимо принять все меры к тому, чтобы коэффициент использования линии был значительно выше.

Экономическая эффективность повышения коэффициента технического использования линии ПЛХ-3 при стоимости электроэнергии 2 коп. за 1 квч представлена на графике (рис. 2).

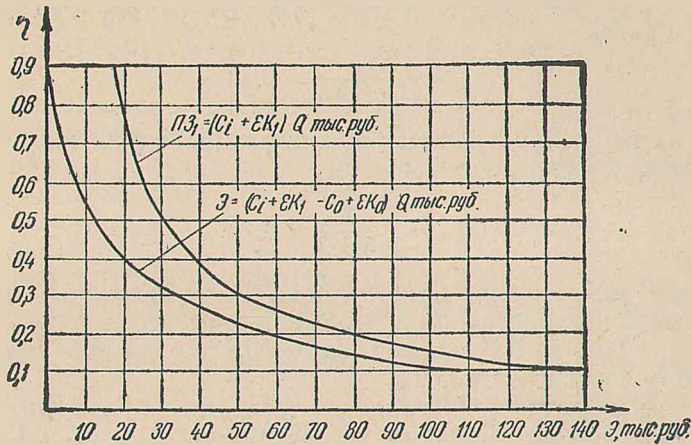


Рис. 2. График зависимости годового экономического эффекта от роста коэффициента технического использования при его изменении от  $\eta_i$  до  $\eta = 0,85$  для Мостовского ЛПХ.

Как видно из графиков, повышение  $\eta_i$  даже на 0,1 влечет за собой экономический эффект, измеряемый тысячами рублей.

Данные к построению графиков  $C_i = f(\eta_i)$  коп./м<sup>3</sup>

$\eta_i$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$C_0$	118,67	59,33	39,55	29,66	23,73	19,77	16,95	14,83	13,18	11,867
$C_i$	149,4	47,7	49,80	37,3	29,88	24,9	21,34	18,67	16,6	14,94

Данные для построения графиков  $ПЗ = f(\eta_i) = C_0 + \epsilon K_0$  и  $Э = f(\eta_i) = [(C_1 + \epsilon K_1) - (C_0 + \epsilon K_0)] Q_0$

$\eta_i$ , руб./м <sup>3</sup>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$C_1$ , руб./м <sup>3</sup>	1,186	0,593	0,395	0,296	0,237	0,198	0,169	0,148	0,130
$K_1$ , руб./м <sup>3</sup>	1,76	0,88	0,58	0,44	0,35	0,3	0,25	0,22	0,15
$\epsilon K_1$ , руб./м <sup>3</sup>	0,352	0,176	0,116	0,088	0,70	0,060	0,050	0,044	0,03
$ПЗ_1$ , руб./м <sup>3</sup>	1,538	0,769	0,511	0,484	0,307	0,248	0,219	0,192	0,18
$ПЗ$ , тыс. руб.	153,8	76,9	51,1	38,4	30,7	24,8	21,9	19,2	18,5
$Э$ , тыс. руб.	116,6	58,3	34,1	19,8	12,1	6,2	3,3	0,6	0

В графиках применены обозначения:

- $Э$  — годовой экономический эффект (в руб.) от повышения  $\eta_i$  до расчетной величины  $\eta_0 = 0,85$ ;
- $C_0$  — первоначальная себестоимость раскряжевki 1 м<sup>3</sup> древесины;
- $C_i$  — себестоимость раскряжевki 1 м<sup>3</sup> древесины после повышения  $\eta_i$ ;
- $K_0$  — капитальные вложения на 1 м<sup>3</sup> до повышения  $\eta_i$ ,  $K_0 = 0,16$  руб.;
- $K_i$  — капитальные вложения на 1 м<sup>3</sup> после повышения  $\eta_i$ , руб.;
- $Q$  — расчетный годовой объем раскряжеванной древесины (100 тыс. м<sup>3</sup>);
- $\epsilon$  — нормативный коэффициент экономической эффективности,  $\epsilon = 0,2$ .

Например, за счет применения функциональной циклограммы среднее время восстановления работоспособности ПЛХ-3 сокращается с 5,9 до 3 мин. Соответственно  $\eta_{\text{эг}} = \frac{x}{x+y} = \frac{111}{111+3} = 0,97$  (при неизменном значении  $\eta_m, \eta_r, \eta_t$ ).

При длительности безотказной работы, определенной с вероятностью 0,9 и равной 11,5 мин, и длительности простоев, определенной с вероятностью 0,9 и равной 13,5 мин, коэффициент технического использования, ограниченный надежностью электро- и гидроаппаратуры системы управления, равен

$$\eta_{\text{гэ}} = \frac{11,5}{11,5+13,5} = 0,46.$$

Применение функциональной циклограммы ограничивает длительность цикла простоев 3 мин. При этом

$$\eta_{\text{эг}} = \frac{11,5}{11,5+3} = 0,79.$$

Следовательно, можно ожидать повышения величины коэффициента технического использования ПЛХ-3 при применении функциональных циклограмм от 0,94 до 0,97 с вероятностью 0,5 (по средним данным) или от 0,46 до 0,79 с вероятностью 0,9.

По отчетным данным Оленинского леспромхоза коэффициент технического использования линии на складе Мостовая равен 0,45—0,55, в среднем 0,5.

С вероятностью 0,9 можно утверждать, что применение функциональных циклограмм повысит его до  $\eta = 0,5 \frac{0,79}{0,46} = 0,86$ .

По средним данным с вероятностью 0,5 эта величина составит

$$\eta = 0,5 \frac{0,97}{0,94} = 0,516.$$

Соответственно в денежном выражении экономический эффект в год может быть получен до 12 тыс. руб. при средней величине 600 руб.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Владзиевский. Автоматические линии в машиностроении. М., 1958.