В работе представлены основные показатели эффективности многоступенчатого контроля надежности путевых выключателей и изложена методика расчета этих показателей. Приведены сравнительные данные одноступенчатого и многоступенчатого контроля надежности путевых выключателей.

УДК621.316

В.П. Самошкин, канд. техн. наук,
Я.Б. Форкун, канд. техн. наук
Харьковская национальная академия городского хозяйства

МНОГСТУПЕНЧАТЫЙ КОНТРОЛЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПУТЕВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Введение. Путевые выключатели находят широкое применение в станках с программным управлением, автоматических линиях и других автоматических устройствах, и степень их надежности не только может резко снизить эффективность этих устройств, но и привести к большим экономическим потерям: так, например, на Запорожском автозаводе на автоматической линии обработки головок блоков двигателя установлено 9 тыс. путевых выключателей. В течении часа на этой линии совершается 400 тыс. переключений и если на каждые 100 тыс. переключений будет иметь место хотя бы один отказ путевого выключателя, то через каждые четверть часа автоматическая линия будет останавливаться. Поэтому борьба за непрерывный рост качества и технического уровня путевых выключателей становится исключительно актуальным требованием. Создание надежных путевых выключателей невозможно без разработки методов контроля показателей надежности. Ранее нами рассматривался план одноступенчатого контроля качества и надежности, но более широкое применение получили многоступенчатые планы контроля, которые более экономичны по сравнению с одноступенчатыми планами и вместе с тем их организация вызывает большие трудности.

Изложение основного материала. Нетрудно убедиться, что при многоступенчатом контроле, когда путевые выключатели делятся только на две категории – годные и дефективные, справедливы соотношения:

$$Q_Д = \sum_{k=1}^{N} \Delta Q_Д(k), \tag{1}$$

$$\beta_{бу} = \sum_{k=1}^{N} \Delta \beta_{бу}(k), \tag{2}$$

$$a_{бу} = \sum_{k=1}^{N} \Delta a_{бу}(k), \tag{3}$$

$$P_r = \sum_{k=1}^{N} \Delta P_r(k), \tag{4}$$

где $Q_Д$ - безусловная вероятность забракования дефективного выключателя или партии выключателей (вероятность того, что предъявляемый на контроль образец или партия окажется дефективной и будет забракован);

$\beta_{бу}$ - безусловная вероятность приема дефективного образца или партии выключателей (безусловный риск потребителя);

$a_{бу}$ - безусловная вероятность забркования годного образца или партии выключателей (безусловный риск поставщика);

P_r - безусловная вероятность приема годного образца или партии выключателей;

$\Delta Q_Д(k)$ - безусловная вероятность забракования дефектного образца на k-м шаге (вероятность того что предъявляемый образец является дефективным и будет забракован на k-м шаге);

$\Delta\beta_{бу}(k)$ - безусловная вероятность приема дефектного образца на k-м шаге;

$\Delta a_{бу}(k)$ - безусловная вероятность забракования годного образца на k-м шаге;

$\Delta P_r(k)$ - безусловная вероятность приема годного образца на k-м шаге;

N - максимально возможное количество шагов при данном плане контроля.

При этом очевидными становятся соотношения:

$$Q_Д + \beta_{бу} = \varphi_Д \tag{5}$$

$$a_{бу} + P_r = \varphi_r \tag{6}$$

$$\varphi_Д + \varphi_r = 1 \tag{7}$$

Где $\varphi_Д$ - удельный вес или доля дефектных изделий;

φ_r - удельный вес или доля годных изделий;

В случае контроля безотказности (наработки на отказ) и при непрерывном распределении вероятностей входного качества величины $\Delta Q_Д(k)$, $\Delta\beta_{бу}(k)$, $\Delta a_{бу}(k)$, $\Delta P_r(k)$ определяются следующими соотношениями:

$$\Delta Q_Д(k) = \int_0^{\pi} \varphi(T)\Delta Q(k,T)dT \tag{8}$$

$$\Delta\beta_{бу}(k) = \int_0^{T_r} \varphi(T)\Delta P(k,T)dT \tag{9}$$

$$\Delta a_{бу}(k) = \int_{T_r}^{\infty} \varphi(T)\Delta Q(k,T)dT \tag{10}$$

$$\Delta P_r(k) = \int_{T_r}^{\infty} \varphi(T)\Delta P(k,T)dT \tag{11}$$

где $\varphi(T)$ - плотность распределения входного качества (наработка на отказ);
$\Delta Q(k,T)$ - условная вероятность забракования на k-м шаге образца с наработкой на отказ T (вероятность того что предъявляемый на контроль образец будет забракован на k-м шаге если наработка отказ составляет T);
$\Delta P(k,T)$ - условная вероятность приема на k-м шаге образца с наработкой на отказ T (вероятность того что предъявляемый на контроль образец будет забракован на k-м шаге если наработка отказ составляет T);
Применительно к дискретному распределению вероятностей входного качества (наработки на отказ) соотношения (8) – (11) принимают вид:

$$\Delta Q_Д(k) = \sum_{i=0}^{r-1} q(T_i)\Delta Q(k,T_i) \tag{12}$$

$$\Delta\beta_{бу}(k)=\sum_{i=0}^{r-1}q(T_i)\Delta P(k,T_i) \qquad (13)$$

$$\Delta a_{бу}(k)=\sum_{i=0}^{n}q(T_i)\Delta Q(k,T_i) \qquad (14)$$

$$\Delta P_r(k)=\sum_{i=0}^{n}q(T_i)\Delta P(k,T_i) \qquad (15)$$

где $q(T_i)$ ($i=0,1,2,r...n$) – распределение вероятностей входного качества (наработка на отказ);

T_i - гарантированное значение наработки на отказ.

При контроле доли дефектных выключателей и непрерывном распределении вероятностей входного качества величины $\Delta Q_Д(k)$, $\Delta\beta_{бу}(k)$, $\Delta a_{бу}(k)$, $\Delta P_r(k)$ будут определяться выражениями:

$$\Delta Q_Д(k)=\int_{S_r}^{1}\varphi(S)\Delta Q(k,S)dS \qquad (16)$$

$$\Delta\beta_{бу}(k)=\int_{S_r}^{1}\varphi(S)\Delta P(k,S)dS \qquad (17)$$

$$\Delta a_{бу}(k)=\int_{0}^{S_r}\varphi(S)\Delta Q(k,S)dS \qquad (18)$$

$$\Delta P_r(k)=\int_{0}^{S_r}\varphi(S)\Delta P(k,S)dS \qquad (19)$$

где $\varphi(S)$ - плотность распределения входного качества (доли дефектных выключателей);

$\Delta Q(k,S)$ условная вероятность забракования на k-м шаге партии выключателей с долей дефектных изделий S (вероятность того что предъявляемая на контроль партия выключателей будет принята на k-м шаге , если доля дефектных изделий в партии составляет S)

$\Delta P(k,S)$ условная вероятность приема на k-м шаге партии выключателей с долей дефектных изделий S (вероятность того что предъявляемая на контроль партия выключателей будет принята на k-м шаге , если доля дефектных изделий в партии составляет S)

В свою очередь, для случая дисперсного распределения вероятностей входного качества(доли дефектных выключателей) уравнения (16) - (19) представляются в виде:

$$\Delta Q_Д(k)=\sum_{i=r+1}^{n}q(S_i)\Delta Q(k,S_i) \qquad (20)$$

$$\Delta\beta_{бу}(k)=\sum_{i=r+1}^{n}q(S_i)\Delta P(k,S_i) \qquad (21)$$

$$\Delta a_{бу}(k)=\sum_{i=0}^{r}q(S_i)\Delta Q(k,S_i) \qquad (22)$$

$$\Delta P_r(k)=\sum_{i=0}^{r}q(T_i)\Delta P(k,T_i) \qquad (23)$$

где $q(S_i)$ ($i=0,1,2,r...n$) – распределение вероятностей входного качества (доли дефектных выключателей);

S_i - гарантированное значение доли дефектных выключателей.

Нетрудно убедиться, что величина $\Delta Q_Д(k,H)$ (где $H = T \cdot S$) определяется уравнением

$$\Delta Q_Д(k,H) = \sum_{i_H, j_H}^{i_B j_B} B_{ep}(m=i) \qquad \text{при } a = a_{k-1}$$

$$B_{ep}(m \geq j) \qquad \text{при } a = \Delta a_k \qquad (24)$$

$$\text{где } i_H = m_{np(k-1)} + 1; \qquad j_H = m_{npk} - i_H \qquad (25)$$

$$i_B = m_{бp(k-1)} - 1; \qquad j_B = m_{бpk} - i_B \qquad (26)$$

a_{k-1} - объем испытаний соответствующий $k-1$ шагам или выборкам;

Δa_k - увеличение объема испытаний за счет k-го шага;

$m_{np(k-1)}, m_{бp(k-1)}$ - приемное и браковочное число отказов или дефектных выключателей для объема испытаний

$a_{k-1}, m_{np(k-1)}, m_{бp(k-1)}$ - приемное и браковочное число отказов или дефектных выключателей для объема испытаний a_k

Заметим, что при любых планах многоступенчатого контроля имеют место соотношения:

$$m_{np(k-1)} \leq m_{npk} \qquad (27)$$

$$m_{бp(k-1)} \leq m_{бpk} \qquad (28)$$

Соответственно величина $\Delta P(k,H)$ (где $H = T \cdot S$) находится по соотношению:

$$\Delta P(k,H) = \sum_{i_H, j_H}^{i_B j_B} B_{ep}(m=i) \qquad \text{при } a = a_{k-1}$$

$$B_{ep}(m \leq j) \qquad \text{при } a = \Delta a_k \qquad (29)$$

Где

$$\begin{matrix} i_H = m_{np(k-1)} + 1 \\ j_H = m_{npk} - i_H \end{matrix}; \qquad (30)$$

$$i_B = \begin{cases} m_{npk} & если \;\; m_{npk} \leq m_{бp(k-1)} - 1 \\ m_{бp(k-1)} - 1 & если \;\; m_{npk} > m_{бp(k-1)} - 1 \end{cases} \qquad (31)$$

$$i_B = \begin{cases} 0 & если \;\; m_{npk} \leq m_{бp(k-1)} - 1 \\ m_{бp(k-1)} - 1 & если \;\; m_{npk} > m_{бp(k-1)} - 1 \end{cases} \qquad (32)$$

В свою очередь на каждом шаге $B_{ep}(m=i)$ при $a = a_k$ вычисляется по выражению:

$$B_{ep}(m=i) \text{ при } a = a_k = \sum_{i_H, j_H}^{i_B j_B} B_{ep}(m = i' \_ при \_ a = a_{k-1}) B_{ep}(m = j' \_ при \_ a = \Delta a_k) \qquad (33)$$

Где

$$\begin{matrix} i'_H = m_{np(k-1)} + 1 \\ j'_H = m_{npk} - i'_H \end{matrix} \qquad (34)$$

$$i'_B = \begin{cases} i & если\ i \le m_{бр(k-1)} - 1 \\ m_{бр(k-1)} - 1 & если\ i > m_{бр(k-1)} - 1 \end{cases} \quad (35)$$

$$i'_B = \begin{cases} 0 & если\ i \le m_{бр(k-1)} - 1 \\ m_{бр(k-1)} - 1 & если\ i > m_{бр(k-1)} - 1 \end{cases} \quad (36)$$

Если поток отказов путевых включателей и число дефектных выключателей в выборке можно полагать распределенными по закону Пуассона, как это обычно имеет место, то величины $B_{ep}(m \le j)$ при $a = \Delta a_k$, $B_{ep}(m \ge j)$ при $a = \Delta a_k$, $B_{ep}(m = j)$ при $a = \Delta a_k$ входящие в уравнения (24), (29), (33) будут определяться соотношениями

$$B_{ep}(m \ge j) \text{ при } a = \Delta a_k = \sum_{m=j}^{\infty} \frac{\Delta a_k{}^m \cdot e^{-\Delta a_k}}{m!} \quad (37)$$

$$B_{ep}(m \le j) \text{ при } a = \Delta a_k = \sum_{m=0}^{j} \frac{\Delta a_k{}^m \cdot e^{-\Delta a_k}}{m!} \quad (38)$$

$$B_{ep}(m = j) \text{ при } a = \Delta a_k = \frac{\Delta a_k{}^{j'} \cdot e^{-\Delta a_k}}{j'!} \quad (39)$$

Наконец величины a_{k-1} и Δa_k входящие в соотношения (24), (29), (33), (37) – (39) определяются соотношениями:

$$a_{k-1} = \begin{cases} \Delta tu_{k/T} \ \textit{при контроле наработки на отказ} \\ n_{(k-1)} \cdot S \ \textit{при контроле доли дефектных выключателей} \end{cases} \quad (40)$$

$$\Delta a_k = \begin{cases} \Delta t_{uk} / T \ \textit{при контроле наработки на отказ} \\ n_{(k)} \cdot S \ \textit{при контроле доли дефектных выключателей} \end{cases} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{uk} &= t_{uk} - t_{(k-1)} \\ n_k &= n_k - n_{(k-1)} \end{aligned} \quad (42)$$

где $t_{u(k-1)}, t_{uk}$ – суммарная наработка выключателей с момента начала испытаний до завершения $(k-1)$-го и $k-$ го шага.

$n_{k-1}, n_k -$ суммарный объем выборки с момента начала испытаний до завершения $(k-1)$-го и $k-$ го шага.

На ряду с безусловным риском потребителя и поставщика, вторым существенным показателем эффективности многоступенчатого контроля является средний объем испытаний.

При контроле наработки выключателя на отказ средний объем испытаний характеризуется средним временем испытаний, определяемым соотношением

$$t_u = \sum_{k=1}^{N} \Delta\varphi(k) t_{uk} \quad (43)$$

где $\Delta\varphi(k)$ - вероятность принятия решения (т.е. прием или браковка выключателя) на $k-$ м шаге

При этом

$$\Delta\varphi(k) = \Delta Q_Д(k) + \Delta\beta_{бу}(k) + \Delta a_{бу}(k) + \Delta P_r(k) \quad (44)$$

В свою очередь, при контроле доли дефектных выключателей средний объем испытаний характеризуется средним объемом выборки определяемом выражением

$$n = \sum_{k=1}^{N} \Delta\varphi(k) n_k \qquad (45)$$

где $\Delta\varphi(k)$ определяется соотношением (44) и представляют собой вероятность принятия решения (приема или забракования выключателей на $k-$ м шаге или при $k-$й выборке)

Для иллюстрации в таблицах 1-4 представлены основные показатели многоступенчатого контроля, рассчитанные по изложенной методике. При этом в таблицах 1-3 приведены двухступенчатые планы контроля, а в табл. 4 рассмотрен план четырехступенчатого контроля. В этих примерах распределение вероятностей входного качества (средней наработки на отказ) соответствует данным табл. 4, а значение граничной, т.е. минимальной допустимой с точки зрения потребителя наработки на отказ составляет $T_{cp} = 80$ час.

Например, план двухступенчатого контроля, представленный в табл.2 обеспечивает безусловный риск и потребителя и поставщика соответственно равными $\beta_{бу} = 0.110$ и $a_{бу} = 0.102$ при среднем объеме испытаний $t_u / T_{cp} = 1.19$

Вывод

Из приведенных данных следует, что план одноступенчатого контроля для рассматриваемых условий обеспечивает риски равными $\beta_{бу} = 0.110$ и $a_{бу} = 0.102$ при среднем объеме испытаний $t_u / T_{cp} = 1.90$ и оценочном нормативе $c = 3$. Следовательно, план двухступенчатого контроля (табл.2) сокращает объем испытаний в 1,90/119=1,6 раза по сравнению с одноступенчатым контролем

Таким образом, и в случае учета априорной информации о входном качестве многоступенчатый контроль является более экономичным по сравнению с одноступенчатым контролем.

Таблица 1

Показатели эффективности контроля	Номер шага k		Сумма
	1	2	
T_{uk} / T_{cp}	1	2	-
m_{npk}	2	3	-
$m_{бpk}$	4	4	-
$\Delta Q_Д(k)$	0,0111	0,0157	0,0268
$\Delta\beta_{бу}(k)$	0,128	0,00438	0,132
$\Delta\varphi_Д(k)$	0,139	0,020	0,159
$\Delta Q_{бу}(k)$	0,0150	0,0304	0,0454
$\Delta P_r(k)$	0,777	0,0179	0,795
$\Delta\varphi_r(k)$	0,792	0,049	0,841
$\Delta\varphi(k)$	0,931	0,069	1,0
$\Delta\varphi(k)(T_{uk} / T_{cp})$	0,931	0,138	1,07

Таблица 2

Показатели эффективности контроля	Номер шага k		Сумма
	1	2	
T_{uk} / T_{cp}	1	2	-
m_{npk}	1	3	-
$m_{бpk}$	3	4	-
$\Delta Q_Д(k)$	0,311	0,0176	0,0806
$\Delta \beta_{бу}(k)$	0,0883	0,0218	0,0782
$\Delta \varphi_Д(k)$	0,119	0,040	0,159
$\Delta Q_{бу}(k)$	0,634	0,0379	0,234
$\Delta P_r(k)$	0,630	0,109	0,606
$\Delta \varphi_r(k)$	0,693	0,148	0,841
$\Delta \varphi(k)$	0,814	0,186	1,0
$\Delta \varphi(k)(T_{uk} / T_{cp})$	0,814	0,372	1,36

Таблица 3

Показатели эффективности контроля	Номер шага k		Сумма
	1	2	
T_{uk} / T_{cp}	1	2	-
m_{npk}	0	3	-
$m_{бpk}$	2	4	-
$\Delta Q_Д(k)$	0,0705	0,0101	0,806
$\Delta \beta_{бу}(k)$	0,0357	0,0425	0,0782
$\Delta \varphi_Д(k)$	0,106	0,053	0,159
$\Delta Q_{бу}(k)$	0,211	0,0230	0,234
$\Delta P_r(k)$	0,324	0,282	0,606
$\Delta \varphi_r(k)$	0,535	0,306	0,841
$\Delta \varphi(k)$	0,642	0,358	1,0
$\Delta \varphi(k)(T_{uk} / T_{cp})$	0642	0,716	1,36

Таблица 4

Показатели эффективности контроля	Номер шага k				Сумма
	1	2	3	4	
T_{uk} / T_{cp}	0,5	1,0	1,5	2,0	-
m_{npk}	0	1,0	2,0	3,0	-
$m_{бpk}$	2	3	4	4	-
$\Delta Q_Д(k)$	0,281	0,00991	0,00350	0,00367	0,0452
$\Delta \beta_{бу}(k)$	0,015	0,0263	0,00922	0,00325	0,114

Продолжение таблицы 4

Показатели эффективности контроля	Номер шага k				Сумма
	1	2	3	4	
$\Delta\varphi_{Д}(k)$	0,103	0,362	0,0127	0,0692	0,159
$\Delta Q_{бу}(k)$	0,0723	0,0215	0,00647	0,00840	0,109
$\Delta P_{r}(k)$	0,521	0,152	0,0446	0,0132	0,731
$\Delta\varphi_{r}(k)$	0,593	0,174	0,0511	0,0216	0,841
$\Delta\varphi(k)$	0,626	0,210	0,0638	0,0285	1,0
$\Delta\varphi(k)(t_{uk}/T_{cp})$	0,348	0,210	0,0957	0,0570	0,711

Литература

1. Венцель Е.С. Теория вероятностей. Изд-во “Наука”, 1964г.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Изд-во “Наука”, 1965г
3. Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ. Изд-во “Наука”, 1969г
4. Шар Я.Б. Статистические методы контроля качества и надежности промышленной продукции. Изд-во “Знание”, 1968г
5. Шар Я.Б., Кузьмин Ф.И. таблицы для анализа и контроля надежности. Изд-во “Световое радио”, 1968г
6. Штор М.Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества под редакцией Н.С. Райбмана. Изд-во “Наука”, 1970г
7. Румшинский Л.З. математическая обработка результатов эксперимента. Изд-во “Наука”, 1971г

БАГАТОСТУПЕНЕВИЙ КОНТРОЛЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ШЛЯХОВИХ ВИМИКАЧІВ

В.П. Самошкін, Я.Б. Форкун

У роботі представлені основні показники ефективності багатоступеневого контролю надійності шляхових вимикачів і викладена методика розрахунку цих показників. Приведені зрівняні данні одноступеневого і багатоступеневого контролю надійності шляхових вимикачів.

MULTI-STAGE CONTROL OF RELIABILITY OF THE GROUND SWITCHES INDEXES

V.P. Samoshkin, I.B. Forkyn

In-process presented basic indexes of efficiency of multi-stage control of reliability of the ground switches and the method of calculation of these indexes is expounded. Comparative information of single-stage and multi-stage control of reliability of the ground vyklyu-chateley is resulted.