

УДК 621.396.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ С АВАРИЙНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

*Лев Сакович, Виталий Павлов, Вениамин Рыжяков\**

*Специфаккультет СБ Украины в составе ВИТИ НТУУ «КПИ»*

*\*Национальная академия обороны Украины*

*Аннотация:* Формализован порядок восстановления работоспособности радиоэлектронных средств с учетом количественной оценки показателей дефектации и диагностирования на основе полученных аналитических выражений.

*Summary:* The order of renewal the capacity of radio electronic means has been formalized considering the quantitative estimation of detection indices and diagnosis on the basis of the received formulas.

*Ключевые слова:* Радиоэлектронные средства, аварийные повреждения, кратные дефекты, ремонт, дефектация, диагностирование.

### I Введение

Радиоэлектронные средства (РЭС), составляющие основную часть оборудования систем защиты информации, в результате негативного воздействия неблагоприятных климатических условий, нарушений инструкций по эксплуатации, правил техники безопасности, условий хранения и транспортирования, при стихийных бедствиях, техногенных авариях и катастрофах могут получать повреждения, приводящие к возникновению кратных (множественных) дефектов. Технология восстановления работоспособности подобных объектов отличается от текущего ремонта и состоит из процессов дефектации, диагностирования, устранения неисправностей и проверки работоспособности.

### II Постановка задачи

Ремонт РЭС с аварийными повреждениями состоит из дефектации, диагностирования, устранения неисправностей и проверки работоспособности [1 – 3]. Под дефектацией понимается процесс определения степени повреждения объекта, выявления явных дефектов и устранения вызванных ими неисправностей. Дефектация проводится для установления реального технического состояния объекта, что является одной из задач технической диагностики [1]. Дефектация реализуется поэтапно: предварительная – на месте повреждения техники, полная – в ремонтном органе. Завершается дефектация выводом о целесообразности ремонта, его виде и месте проведения. Процесс технического диагностирования РЭС с учетом специфических особенностей эксплуатации и ремонта достаточно исследован [4 – 9], а вопросы формализации и оптимизации дефектации не получили должного решения. Таким образом, возникает задача формализации и оптимизации процесса дефектации РЭС по критерию максимума пропускной способности ремонтного органа. В статье впервые комплексно исследуются оба этапа ремонта РЭС и в результате математического моделирования процесса восстановления работоспособности определяются условия, минимизирующие время ремонта при ограничениях, зависящих от технических возможностей ремонтного органа. Задача решается без учета организационных потерь времени.

### III Основная часть

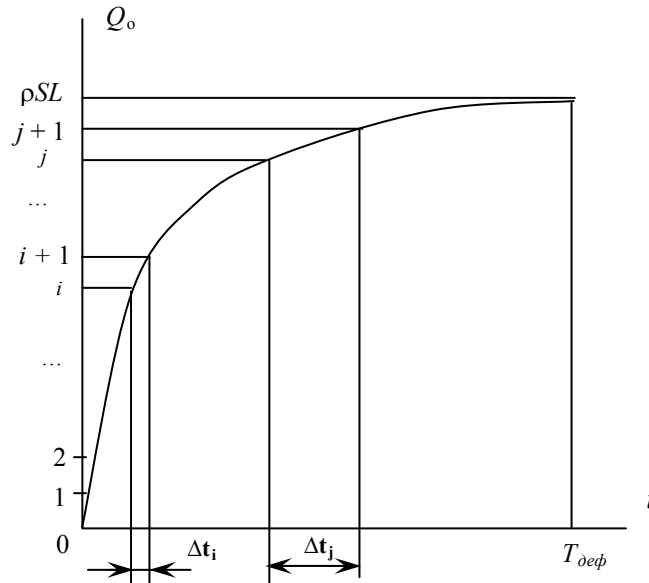
В результате экспертного опроса специалистов ремонтных органов установлено, что при дефектации в начальный момент времени сравнительно быстро обнаруживается большая часть явных дефектов (разбитые радиолампы, сломанные керамические детали, помятые или пробитые корпуса конденсаторов, обрывы проводов монтажа, обгоревшие резисторы и т. д.) и устраняются вызванные ими неисправности заменой отказавших электрорадиоэлементов. Затем процесс обнаружения дефектов замедляется, требуется дополнительная разборка ремонтируемого агрегата РЭС, использование средств измерений. Эмпирическая зависимость числа обнаруженных при дефектации дефектов ( $Q_o$ ) от времени дефектации ( $T_{деф}$ ), включающего в себя обнаружение дефекта и устранение неисправности, приведена на рис. 1, где  $L$  – число элементов в объекте,  $S$  – степень повреждения объекта,  $\rho$  – доля явных дефектов, обнаруживаемых при дефектации.

Под степенью повреждения объекта понимается отношение суммы явных ( $Q_o$ ) и скрытых ( $Q_c$ ) дефектов, необнаруживаемых при дефектации, к общему числу элементов

$$S = \frac{Q_o + Q_c}{L}, \quad (1)$$

тогда

$$\rho = \frac{Q_o}{SL}. \quad (2)$$



**Рисунок 1 – Эмпирическая зависимость числа обнаруженных дефектов от времени дефектации**

С учетом предыдущих рассуждений очевидно, что для  $i < j$  всегда  $\Delta t_i \leq \Delta t_j$ . В частном случае при  $\Delta t_j - \Delta t_i = \Delta t = const$  получаем

$$T_{def}^I = 0,5 \rho SL (t_1 + t_n), \quad (3)$$

где

$$t_n = t_1 + (\rho SL - 1) \Delta t, \quad (4)$$

$t_1$  – время обнаружения первого дефекта и его устранения, а  $t_n$  – последнего.

Подставляя (4) в (3), окончательно получаем

$$T_{def}^I = 0,5 \rho SL (2t_1 + (\rho SL - 1) \Delta t). \quad (5)$$

В другом частном случае при  $\Delta t_j / \Delta t_i = g = const$  получаем

$$T_{def}^{II} = \frac{t_1 (g^{\rho SL} - 1)}{g - 1}. \quad (6)$$

В общем случае зависимость  $T_{def}(\rho)$  близка к экспоненциальной и может быть аппроксимирована выражением

$$T_{def} = \sum_{i=1}^{\rho SL} \Delta t_i = \sum_{i=1}^{\rho SL} \frac{1}{V_i}, \quad (7)$$

где  $V_i$  – интенсивность дефектации (число обнаруженных дефектов и устраненных неисправностей за единицу времени)

$$V_i = b e^{-a T_{def}^i}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  в (8) находятся по экспериментальным данным о времени обнаружения

первых дефектов и устранения вызванных ими неисправностей:

$$v_i = \frac{1}{\Delta t_i}; v_j = \frac{1}{\Delta t_j}; i < j;$$

$$a = \frac{\ln(v_i/v_j)}{T_{\text{деф } j} - T_{\text{деф } i}}, \quad (9)$$

$$b = \exp(\ln v_i + aT_{\text{деф } i}). \quad (10)$$

Подставляя (9) и (10) в (8), получаем

$$T_{\text{деф } i} = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{b}{v_i}\right) = \frac{1}{a} \ln(b\Delta t_i). \quad (11)$$

Подставляя в (11) предельно допустимое значение времени обнаружения дефекта  $\Delta t_{\text{max}}$ , получаем максимальное значение времени дефектации:

$$T_{\text{деф max}} = \frac{1}{a} \ln(b\Delta t_{\text{max}}). \quad (12)$$

Среднее время обнаружения явного дефекта и устранения вызванной им неисправности равно

$$t_c = \frac{T_{\text{деф}}}{\rho LS}.$$

В зависимости от условий ремонта поиск скрытых дефектов целесообразно осуществлять с использованием процедуры пробной замены (ППЗ) блоков (при наличии заведомо исправных в ЗИП, резервного исправного комплекта аппаратуры или стендового оборудования), а отказавшие блоки после дефектации диагностировать с использованием усеченной процедуры поиска (УПП) и внешних средств технического диагностирования [4 – 8]. При ремонте РЭС в полевых условиях поиск дефектов ограничивается типовыми элементами замены (ТЭЗ) (агрегатами) из состава ЗИП или запаса мастерской связи [2 – 5]. В случае массового выхода из строя однотипной РЭС в одинаковых условиях (например, в результате длительного хранения при нарушении герметизации кузовов) по мере накопления статистических данных целесообразно корректировать порядок проверки подсистем и блоков – начинать с тех, в которых были выявлены дефекты при ремонте предыдущих образцов РЭС.

Для обоснованного выбора диагностических процедур и алгоритмов при поиске скрытых дефектов необходимо априорно знать число поврежденных элементов в конструктивных единицах (блоках) РЭС. Эта задача решается в настоящей статье для наихудшего с позиций диагностирования случая – равномерного распределения дефектов в ремонтируемом объекте.

Ориентировочно значение  $S$  определяется в ходе предварительной дефектации на месте повреждения РЭС с участием специалистов ремонтного органа и уточняется при полной дефектации после доставки в ремонтный орган с разборкой изделия на конструктивные элементы, осмотром, обнаружением явных дефектов и устранением вызванных ими неисправностей [10]. После дефектации РЭС содержит

$$Q_c = SL(1 - \rho) \quad (13)$$

скрытых дефектов.

С учетом предыдущих замечаний число поврежденных подмножеств элементов РЭС ( $N_n$ ) линейно зависит от их размерности ( $l$ ) [11], которая может изменяться от единицы (моноблочная конструкция РЭС) до  $L$ :

$$N_n = al + b. \quad (14)$$

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  находятся подстановкой граничных условий:

$$\begin{cases} l = 1; N_n = Q_c; \\ l = L; N_n = 1. \end{cases}$$

В результате решения системы линейных уравнений получаем:

$$N_n = \frac{(l-1) + SL(1-\rho)(L-l)}{L-1}. \quad (15)$$

Конструктивно РЭС может подразделяться на  $M$  блоков и  $E$  типовых элементов замены (ТЭЗ). При равновеликих конструктивных элементах после дефектации РЭС будет содержать  $B$  неисправных блоков и  $D$

неисправных ТЭЗов:

$$B = \frac{L - M + SL^2(1 - \rho)(M - 1)}{M(L - 1)}, \quad (16)$$

$$D = \frac{L - E + SL^2(1 - \rho)(E - 1)}{E(L - 1)}, \quad (17)$$

где  $M = L/l_{\bar{o}}$ ,  $E = L/l_m$ ,  $l_{\bar{o}}$  – число электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в блоке,  $l_m$  – число ЭРЭ в ТЭЗе.

Поскольку в зависимости от степени повреждения РЭС блоки и ТЭЗы могут содержать кратные дефекты, то [11]:

$$B = \begin{cases} B, B < M; \\ M, B \geq M. \end{cases} \quad D = \begin{cases} D, D < E; \\ E, D \geq E. \end{cases}$$

Очевидно, что

$$\begin{cases} B < M, \text{ если } M > Q_c, \\ D < E, \text{ если } E > Q_c. \end{cases}$$

Отсюда получаем условия повреждения всех блоков ( $M = B$ ) и ТЭЗов ( $E = D$ ) в них (наличие в каждом конструктивном элементе по одному дефекту):

$$M = B : Q_c = \frac{M^2(L - 1) - L + M}{(M - 1)L} = d, \quad (18)$$

$$E = D : Q_c = \frac{E^2(L - 1) - L + E}{(E - 1)L} = c. \quad (19)$$

Реально РЭС состоит из разновеликих блоков и ТЭЗов. Очевидно, что вероятность повреждения конструктивной единицы пропорциональна числу входящих в нее ЭРЭ, поэтому крупные блоки могут содержать кратные дефекты, а значительная часть мелких за счет концентрации дефектов в крупных будет исправна. В этом случае при прогнозировании числа поврежденных конструктивных единиц РЭС предварительно необходимо осуществить их ранжировку в порядке убывания числа элементов:

$$l_{\bar{o}i} \geq l_{\bar{o}i+1}, i = 1, M; \quad l_{mj} \geq l_{mj+1}, j = 1, E.$$

Прогнозируемое число неисправных ТЭЗов в блоке вычисляется аналогичным образом.

При разработке диагностического обеспечения второго этапа ремонта для поиска скрытых дефектов условный алгоритм диагностирования целесообразно подразделять на  $n$  частей, что минимизирует время ремонта при использовании УПП. По данным [6 – 8] построена зависимость формы алгоритма диагностирования от степени повреждения объекта (рис. 2).

Вычисление числа поврежденных конструктивных единиц выполняется по алгоритму рис. 3 с округлением результата в большую сторону до исчерпания прогнозируемого числа дефектов.

Для упрощения вычислений зависимость рис. 2 аппроксимируется многочленом вида

$$\frac{n}{L} = r \left( \frac{Q_c}{L} \right)^2 + y \left( \frac{Q_c}{L} \right) + v, \quad (20)$$

где число скрытых дефектов после дефектации  $Q_c$  определяется (13), а значения коэффициентов  $r$ ,  $y$ ,  $v$  находятся в результате решения системы линейных уравнений, образующейся в результате подстановки в (20) граничных условий (рис. 2):

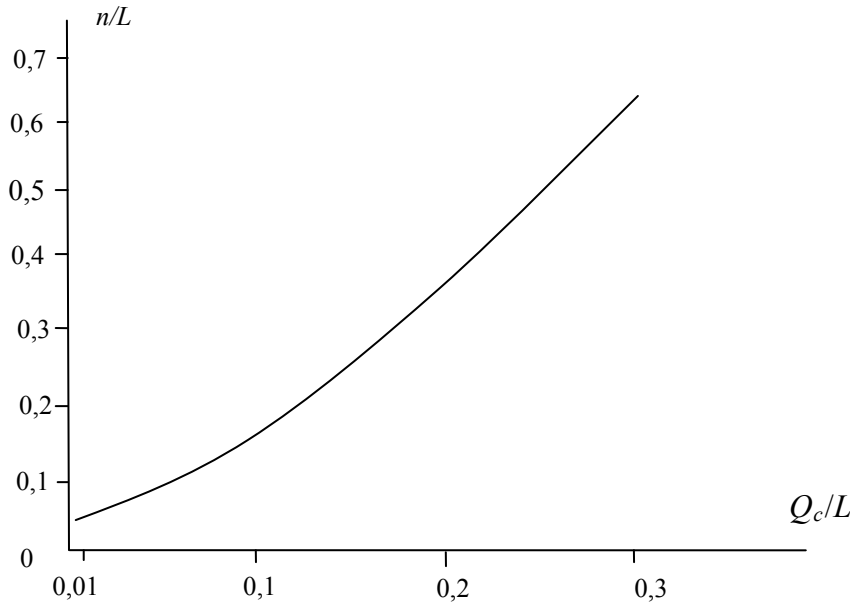
$$\begin{cases} 0,04 = 0,01^2 r + 0,01y + v \\ 0,162 = 0,1^2 r + 0,1y + v \\ 0,36 = 0,2^2 r + 0,2y + v. \end{cases}$$

После подстановки значений коэффициентов  $r$ ,  $y$ ,  $v$  в (20) получаем:

$$n = 0,03L(33,1S(1 - \rho)(3,3S(1 - \rho) + 1) + 1). \quad (21)$$

Рассмотрим возможные варианты разработки диагностического обеспечения РЭС (табл. 1) [1, 4 – 8], где  $w$  – номер варианта диагностического обеспечения,  $O$  – окончание поиска (отсутствие дефектов),  $K_O$  – общее

число проверок при локализации всех дефектов.



**Рисунок 2 – Зависимость формы алгоритма диагностирования от степени повреждения объекта**

Среднее время ремонта РЭС составляет

$$T_g = T_{def} + tK_0 + t_y Q_c, \quad (22)$$

где  $t$  – среднее время выполнения проверки,  $t_y$  – среднее время устранения неисправности.

Поскольку с увеличением доли явных дефектов, обнаруживаемых и устраняемых при дефектации, время дефектации возрастает, а диагностирования – убывает, функция  $T_g(\rho)$  может иметь минимум. Результаты вычислений для  $w = 2$  при  $L = 100$ ;  $S = 0,1$ ;  $t_1 = 5$  мин;  $g = 1,2$ ;  $t = 2$  мин;  $t_y = 3$  мин приведены на рис. 5 и подтверждают наличие минимума  $T_2 = 1,95$  часа при  $\rho = 0,6$ .

Зависимости  $T_w(\rho)$  для  $w = \overline{1,7}$  показаны на рис. 6 при тех же исходных данных. Из их анализа следует, что применение 3-го и 6-го вариантов диагностического обеспечения в данных условиях не целесообразно, наиболее просто реализуется и дает хорошие результаты вариант 2, но могут использоваться варианты 4, 5 и 7 при оптимизации значения  $0,5 \leq \rho \leq 0,8$ . Отклонение от оптимального значения  $\rho$  повышает  $T_g$  в 1,2 – 1,5 раза (рис. 5). Преимущества поэлементной проверки (варианты 3 и 6) проявляются только при сильной степени повреждения РЭС ( $S > 0,2$ ).

Оптимальное значение  $\rho$  для варианта 2 находится методами математического анализа:

$$\frac{dT_2}{d\rho} = \frac{d}{d\rho} \left( \frac{t_1(g^{\rho SL} - 1)}{g - 1} + (2(1 - \rho)SL + (1 - \rho)SL \log_2 \frac{1}{(1 - \rho)S} + 1)t + (1 - \rho)SLt_y \right) = 0.$$


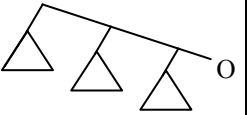

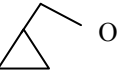
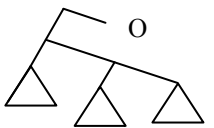
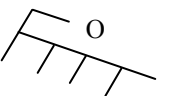
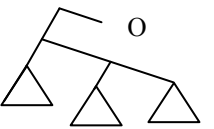
Решение трансцендентного уравнения относительно  $\rho$  позволяет оптимизировать процесс дефектации:

$$SL \left( t_1 \frac{\ln g}{g - 1} g^{\rho SL} - t \log_2 \frac{1}{S(1 - \rho)} + \frac{t}{\ln 2} - 2t - t_y \right) = 0. \quad (23)$$

Отсюда следует, что экстремум функции  $T_2(\rho)$  является минимумом при соблюдении условия

$$\frac{t_1}{t} > \frac{1,44(g - 1)}{LS(\ln g)^2(1 - \rho)g^{\rho SL}}. \quad (25)$$

Таблица 1 – Варианты диагностического обеспечения радиоэлектронных средств

$w$	Форма алгоритма	$n$	$K_0$
1		1	$(1 + Q_c) \log_2 L$
2		$Q_c$	$\left(2 + \log_2 \frac{L}{Q_c}\right) Q_c + 1$
3		$L$	$L$
4		1	$1 + (1 + \log_2 L) Q_c$
5		$\left(3,29 \left(\frac{Q_c}{L}\right)^2 + 0,99 \frac{Q_c}{L} + 0,03\right) L$	$Q_c + 1 + \frac{(n - Q_c)(n + 2Q_c)}{2nQ_c} + (Q_c - 1) \left(1 + \frac{n(L - Q_c)}{Q_c L}\right) + Q_c \log_2 \frac{L}{n}$
6		$L$	$L \left(1 - \frac{0,5}{Q_c}\right) + Q_c + 1$
7		$Q_c$	$\left(3 + \log_2 \frac{L}{Q_c}\right) Q_c - 1$

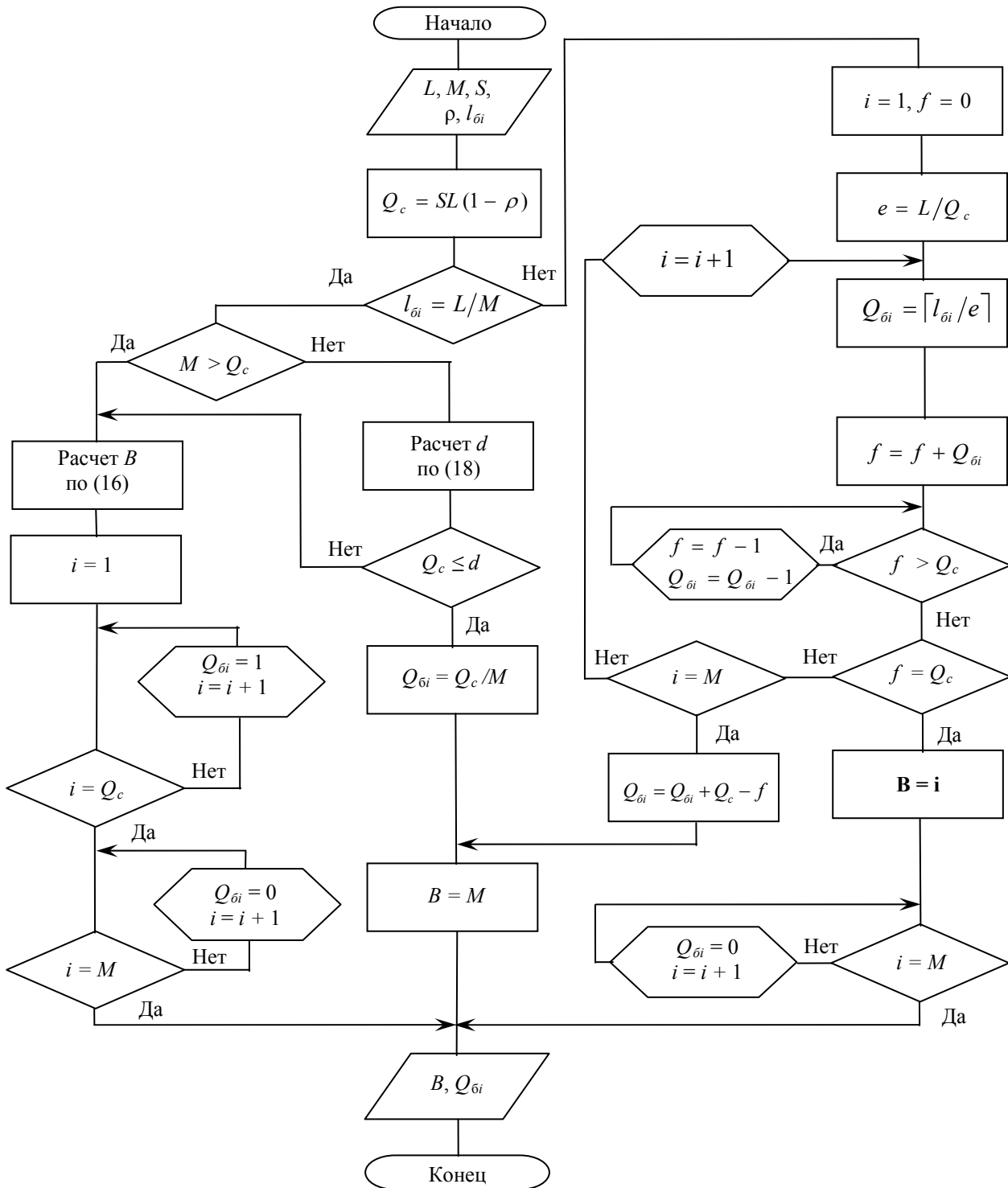


Рисунок 3 – Алгоритм прогнозирования числа неисправных блоков и дефектов в них

Вычисление значений  $T_v$ ,  $T_{деф}$ ,  $T_{диагн} = tK_0 + t_y Q_c$ , выполняется по алгоритму рис. 4.

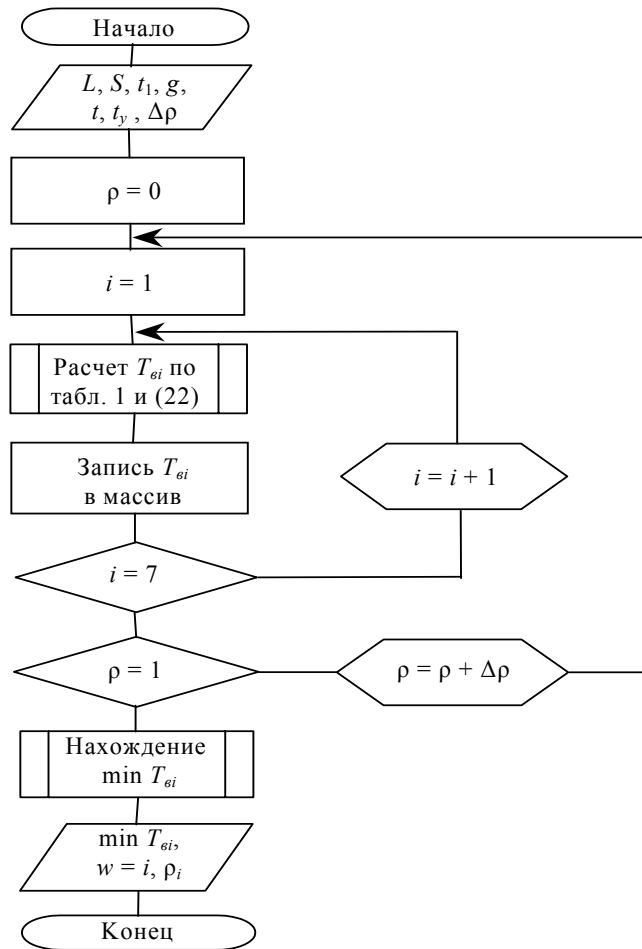


Рисунок 4 – Алгоритм выбора варианта диагностического обеспечения ремонта РЭС с аварийными повреждениями

Из выражения (24) следует, что задача оптимизации доли явных дефектов, обнаруживаемых при дефектации, имеет решение при

$$A(\rho = 0) < B(\rho = 0), \quad (26)$$

где  $A = dg^{cp}$ ;  $B = f - t \log(1 - \rho)$ .

Очевидно, что условие (26) принимает вид  $d < f$ , откуда

$$t_1 \ln g \leq (g - 1)((0,56 - \log_2 S)t + t_y) \quad (27)$$

и может использоваться при анализе исходных данных.

Трансцендентное уравнение (24) решается графически или на ПЭВМ. Контрольное решение для рассматриваемого примера при  $\Delta\rho = 0,001$  (рис. 7) подтверждает полученные на рис. 5 результаты:  $\rho = 0,6 \approx \rho_{opt} = 0,589$ .

Значение  $T_2$  минимально, так как соблюдается условие (25):

$$\frac{t_1}{t} = 2,5 > \frac{1,44(1,2 - 1)}{100 \cdot 0,1(1 - 0,589)(\ln 1,2)^2 \cdot 1,2^{0,1 \cdot 100 \cdot 0,589}} = 0,721.$$

После подстановки оптимального значения  $\rho$  в (6) или (7) получаем количественную оценку продолжительности дефектации при заданных условиях. Использование результатов моделирования процесса ремонта РЭС с аварийными повреждениями за счет определения рациональных трудозатрат на дефектацию (оптимального значения доли явных дефектов, обнаруживаемых без применения диагностических программ) и обоснованного выбора диагностических процедур повышает интенсивность восстановления [1]



$$\mu = 1/T_6 \quad (28)$$

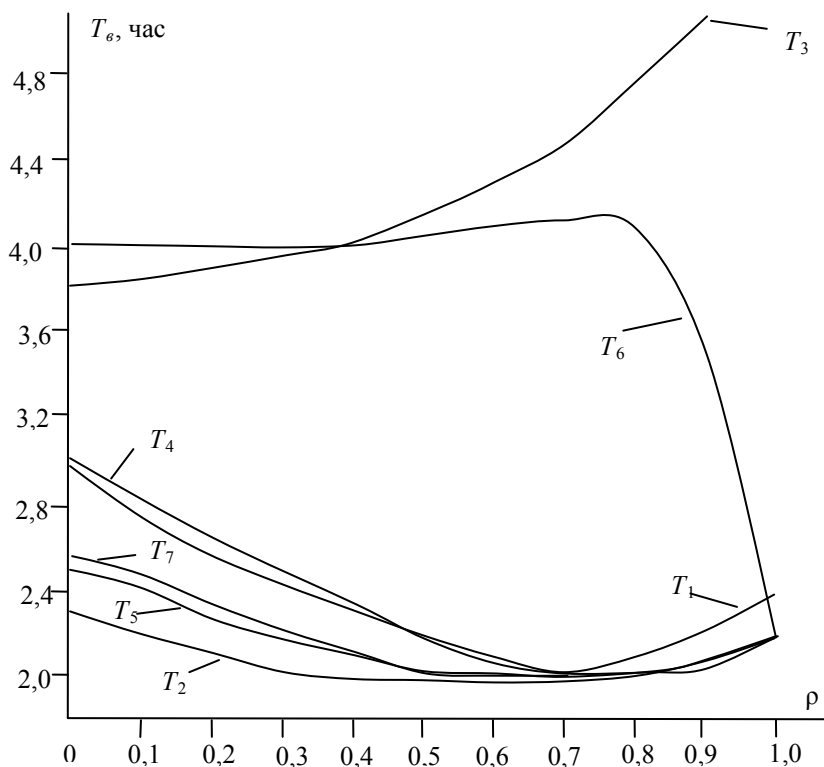


Рисунок 6 – Зависимость среднего времени восстановления РЭС при различных вариантах диагностирования от доли обнаруживаемых дефектов

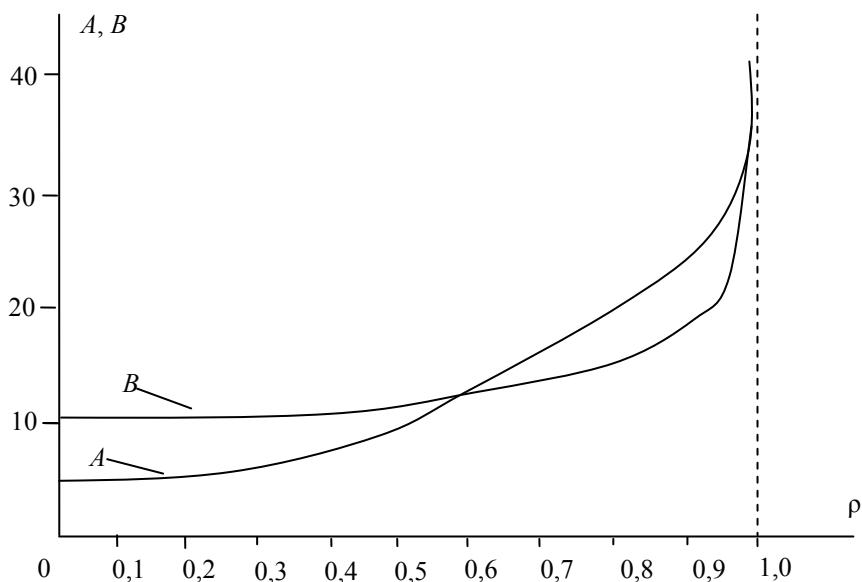


Рисунок 7 – Пример графического решения задачи по определению оптимального значения доли дефектов, обнаруживаемых при дефектации

Относительное увеличение интенсивности восстановления количественно оценивается показателем эффективности

$$\eta = \frac{\mu - \mu'}{\mu'} = \frac{T'_e}{T_e} - 1 > 0, \quad (29)$$

где  $\mu'$  – интенсивность восстановления в существующей, а  $\mu$  – в предлагаемой системе ремонта.

#### IV Выводы

1. Для повышения пропускной способности ремонтных органов при восстановлении работоспособности РЭС с аварийными повреждениями необходимо комплексно рассматривать процессы дефектации, диагностирования и устранения неисправностей в зависимости от степени повреждения объекта.

2. Математическое моделирование процесса ремонта РЭС позволяет обоснованно выбирать глубину дефектации и диагностические процедуры, минимизирующие среднее время восстановления работоспособности в конкретных условиях.

3. В результате моделирования процесса ремонта РЭС с аварийными повреждениями получено условие существования решения сформулированной задачи и формализован порядок нахождения оптимального значения доли явных дефектов, обнаруживаемых при дефектации

4. Научная новизна работы заключается в комплексном исследовании всех составляющих процесса ремонта РЭС, получении аналитических выражений, адекватно отражающих процесс дефектации в зависимости от степени повреждения объекта, а также в формализации решения задачи выбора рационального способа восстановления работоспособности РЭС.

5. Полученные результаты целесообразно использовать при планировании работы ремонтных органов, а также при разработке диагностического обеспечения существующих и перспективных образцов РЭС.

*Литература:* 1. Ксенз С. П. *Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств*. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с. 2. Литвиненко В. *Техническое обеспечение в армии США // Техника и вооружение*. – 1990. – № 9. – С. 36–38. 3. Буроменский Н., Минцкер В. *Ремонт радиоэлектронного вооружения в армии США // Техника и вооружение*. – 1991. – № 6. – С. 38 – 39. 4. *Диагностирование средств связи и управления при эксплуатационных отказах и множественных аварийных повреждениях / Под ред. С. П. Ксенза*. – Л.: ВАС, 1987. – 172 с. 5. *Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации / Под ред. С. П. Ксенза*. – Л.: ВАС, 1990. – 336 с. 6. Сакович Л. Н., Елисов Ю. Н. *Повышение эффективности агрегатного метода ремонта техники связи // Зв'язок*. – 1995. – № 1. – С. 47–48. 7. Сакович Л. Н., Рыжаков В. А. *Усеченная процедура поиска кратных дефектов по однородным небинарным условным алгоритмам диагностирования // Інформатизація та нові технології*. – 1996. – № 4. – С. 43–44. 8. Сакович Л. Н., Елисов Ю. Н. *Усеченная процедура поиска кратных дефектов в радиоэлектронной аппаратуре // Радиоелектроніка*. – 1996. – № 5. – С. 73–76. 9. Цицарев В. М., Тарашквич С. С., Рыжаков В. А. *Підхід до математичного моделювання системи відновлення радіоелектронної техніки спеціального призначення // Зв'язок*. – 1999. – № 4. – С. 43–45. 10. Павлов В. П. *Обґрунтування рекомендацій по розробці апаратних технічного забезпечення модульного типу / Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ”*. – Вип. № 4. – 2003 р. – С. 93–97. 11. Сакович Л. М., Політов В. І. *Використання систем підтримки прийняття рішення під час експлуатації та ремонту засобів і комплексів зв'язку // Зв'язок*. – 2000. – № 5. – С. 37–39.