

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

*В статье исследуются четыре тестовых объекта, различающиеся по своим надежностным и структурным характеристикам. Это позволило проверить и одновременно продемонстрировать “работоспособность” разработанных методик определения оптимальных параметров различных стратегий технического обслуживания при различных исходных данных.*

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, процесс моделирования, оптимальные параметры, характеристики процесса.

**Вступление.** Сложность процессов технического обслуживания (ТО) и многообразие влияющих на них факторов существенно затрудняют выбор между различными стратегиями ТО. Для объективного сравнения достоинств и недостатков различных стратегий ТО необходимо обеспечить примерное равенство (одинаковость) условий, в которых они применяются.

“Всплеск” количества теоретических работ по вопросам ТО сложных систем приходится на 70-е годы прошлого века, что можно объяснить массовым производством в то время сложной радиоэлектронной аппаратуры военного и специального назначения. В настоящее время наблюдается спад количества научных публикаций, посвященных вопросам ТО сложных технических объектов. Одной из причин этого, на наш взгляд, является резкое возрастание уровня интеграции и надежности комплектующих изделий. Благодаря этому разработчикам сложной техники удавалось решать вопросы обеспечения требуемого уровня безотказности без значительных затрат на ТО (или вообще без ТО). Однако та же причина (высокая интеграция и надежность комплектующих элементов) открыла возможность реализации все более сложной техники с новыми функциями, что при старой элементной базе было невозможно. Это вновь приводит объективно к проблемам обеспечения надежности и, следовательно, опять становится актуальным вопрос о необходимости ТО и выборе оптимальной стратегии его проведения.

При сравнении различных стратегий ТО мы будем руководствоваться следующими принципами:

– сравнивать различные стратегии ТО можно только по результатам их применения к одному и тому же объекту;

– тестовые объекты (на которых производится сравнение стратегий ТО) должны быть со-

поставимы по структуре временных и стоимостных затрат на ТО и текущий ремонт;

– показатели качества процесса ТО (целевые функции), по которым производится сравнение различных стратегий ТО, должны оцениваться на одинаковых интервалах эксплуатации объекта и при одинаковых параметрах процесса моделирования (если сравнение стратегий ТО производится по результатам моделирования);

– сравниваться должны характеристики процесса ТО, полученные при оптимальных параметрах стратегий ТО, то есть сравниваться должны потенциальные возможности различных стратегий ТО.

Задача исследования различных стратегий ТО сложных систем исследовалась в научных работах Барзиловича Е. Ю., Куликова Ю. Д., Сергеева Ю. А. [1, 2]. Однако в них не проводились сравнения по единой методике при равных исходных условиях и пр. различных стратегий, в том числе приведенных в [3]. Целью данной работы является исследование тестовых объектов, различающиеся по своим надежностным и структурным характеристикам, что позволяет проверить и одновременно продемонстрировать “работоспособность” разработанных методик определения оптимальных параметров различных стратегий ТО при различных исходных данных.

**Основная часть.** В настоящем исследовании используются 4 тестовых объекта, различающиеся по своим надежностным и структурным характеристикам [1, 2, 4]. Это, помимо прочего, позволяет проверить и одновременно продемонстрировать “работоспособность” разработанных методик определения оптимальных параметров различных стратегий ТО при различных исходных данных.

Для обеспечения сопоставимости структуры временных и стоимостных затрат на ТО и теку-

щий ремонт задавались одинаковые для всех элементов и объектов характеристики ремонтно-пригодности и стоимости:

- среднее время восстановления элемента  $\tau_{vi} = 1$  ч;
- средняя продолжительность ТО  $\tau_{toi} = 1$  ч;
- стоимость элемента  $C_i = 10$  у.е.;
- стоимость операции текущего ремонта (замены) элемента  $C_{tri} = 1$  у.е.;
- стоимость операции ТО элемента  $C_{toi} = 1$  у.е.

Характеристики СТД для тестовых объектов заданы следующие:

- продолжительность диагностирования при ТО  $\tau_d = 0,5$  ч;
- стоимость операции диагностирования при ТО  $C_d = 1$  у.е.

Одинаковым для всех тестовых объектов заданы также и показатели, зависящие от предназначения объекта – удельные потери стоимости, которые несет внешняя система (в которой используется данный объект) в состоянии отказа объекта  $c_{отк} = 10$  у.е./ч, и в состоянии ТО  $c_{то} = 1$  у.е./ч.

Для всех тестовых объектов по разработанным методикам [1, 5, 6] определены оптимальные параметры для трех стратегий ТО. Для краткости, как и ранее, будем называть их: “ТО по состоянию”, “адаптивное ТО” и “ТО по ресурсу”.

Все расчеты производились для продолжительности эксплуатации  $T_3 = 20$  лет при непрерывной работе объектов.

Оптимальные параметры различных стратегий ТО определялись при идеализированном предположении о существовании для тестовых объектов измеряемых определяющих параметров для наименее надежных элементов, относящихся к множеству восстанавливаемых элементов  $E_b$ . Подмножества потенциально обслуживаемых элементов  $E_{то}$  задавались таким образом, что в них включались все наименее надежные элементы. В тестовых объектах отсутствуют элементы, надежность которых была бы ниже, чем надежность любого из элементов  $E_{то}$  ( $E_{то} \subset E_b$ ). Очевидно, что при этом условии при оптимальных параметрах стратегий ТО обеспечивается максимальная, потенциально возможная эффективность ТО, скорее всего недостижимая на практике.

В табл. 1-4 представлены итоговые результаты расчетов оптимальных параметров различных стратегий ТО. На рис. 1-4 приведены графики средней наработки на отказ  $T_0$  и удельной стоимости эксплуатации  $c_{уд}$  от числа обслуживаемых элементов, получаемые при оптимальных параметрах соответствующих стратегий ТО. Все детальные расчеты, на основе которых построены эти таблицы и графики, были приведены ранее [5-7].

Таблица 1 – Сравнительные оценки показателей  $T_0$ ,  $c_{уд}$  и  $K_{ти}$  для объекта Test-1 при различных стратегиях ТО

Стратегия ТО		ТО по состоянию	Адаптивное ТО	ТО по ресурсу	Без ТО
Показатели (целевые функции)	$T_0$ , ч	1660	1662	1609	1236
	$c_{уд}$ , у.е./ч	0,01461	0,01408	0,01695	0,02187
	$K_{ти}$	0,99851	0,99877	0,99689	0,99919
	$\varepsilon$	0,180	0,179	0,184	0,085
Параметры оптимальной стратегии ТО ( $T_0^{оп} = 1500$ ч)		$ E_{то}^*  = 3$ $U_{то}^* = \{0,5; 0,4; 0,5\}$ $T_k^* = 1200$ ч	$ E_{то}^*  = 3$ $U_{то}^* = \{0,5; 0,4; 0,5\}$ $\gamma^* = 0,45; \beta = 0,5$	$N_{то}^* = 1$ $ E_{то1}^*  = 3$ $T_{то}^* = 1400$ ч	–

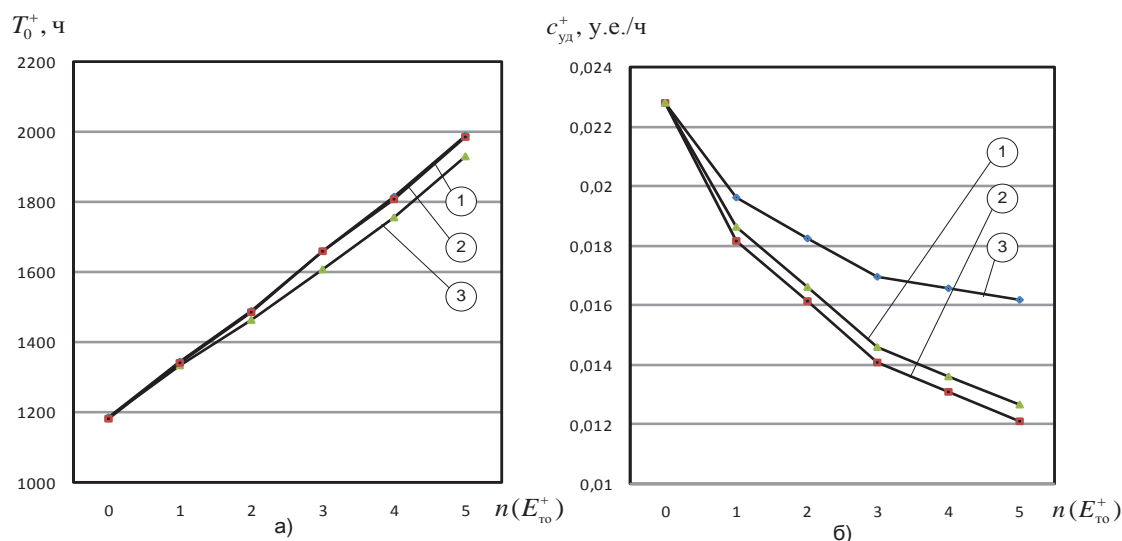


Рисунок 1 – Графики зависимости показателей  $T_0^+$  и  $c_{уд}^+$  от числа обслуживаемых элементов при различных стратегиях ТО (объект Test-1):  
 1 – ТО по состоянию; 2 – адаптивное ТО; 3 – ТО по ресурсу

Таблица 2 – Сравнительные оценки показателей  $T_0$ ,  $c_{уд}$  и  $K_{ти}$  для объекта Test-2 при различных стратегиях ТО

Стратегия ТО		ТО по состоянию	Адаптивное ТО	ТО по ресурсу	Без ТО
Показатели (целевые функции)	$T_0$ , ч	695	702	676	294
	$c_{уд}$ , у.е./ч	0,09852	0,08801	0,12009	0,66572
	$K_{ти}$	0,98610	0,99374	0,97564	0,99708
	$\varepsilon$	0,111	0,112	0,113	0,069
Параметры оптимальной стратегии ТО ( $T_0^{TP} = 600$ ч)		$ E_{то}^*  = 5$ $U_{то}^* = \{0,55; 0,45; 0,25; 0,6; 0,5\}$ $T_k^* = 250$ ч	$ E_{то}^*  = 5$ $U_{то}^* = \{0,6; 0,55; 0,6, 0,5; 0,6\}$ $\gamma^* = 0,45; \beta = 0,5$	$N_{то}^* = 1$ $ E_{то1}^*  = 5$ $T_{то}^* = 240$ ч	–

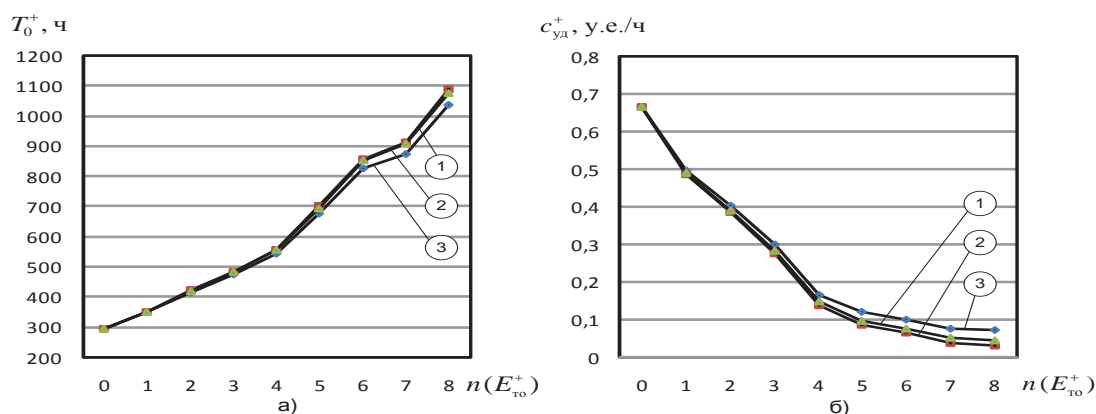


Рисунок 2 – Графики зависимости показателей  $T_0^+$  и  $c_{уд}^+$  от числа обслуживаемых элементов при различных стратегиях ТО (объект Test-2):  
 1 – ТО по состоянию; 2 – адаптивное ТО; 3 – ТО по ресурсу

Таблиця 3 – Сравнительные оценки показателей  $T_0$ ,  $c_{уд}$  и  $K_{ти}$  для объекта Test-3 при различных стратегиях ТО

Стратегия ТО		ТО по состоянию	Адаптивное ТО	ТО по ресурсу	Без ТО
Показатели (целевые функции)	$T_0$ , ч	15194	15136	15009	9458
	$c_{уд}$ , у.е./ч	0,00154	0,00151	0,00169	0,00232
	$K_{ти}$	0,99982	0,99984	0,99967	0,99978
	$\varepsilon$	0,487	0,448	0,493	0,367
Параметры оптимальной стратегии ТО ( $T_0^{пр} = 15000$ ч)		$ E_{то}^*  = 3$ $U_{то}^* = \{0,5; 0,5; 0,5\}$ $T_k^* = 10500$ ч	$ E_{то}^*  = 3$ $U_{то}^* = \{0,7; 0,6; 0,5\}$ $\gamma^* = 0,4; \beta = 0,5$	$N_{то}^* = 1$ $ E_{то1}^*  = 4$ $T_{то}^* = 16000$ ч	–

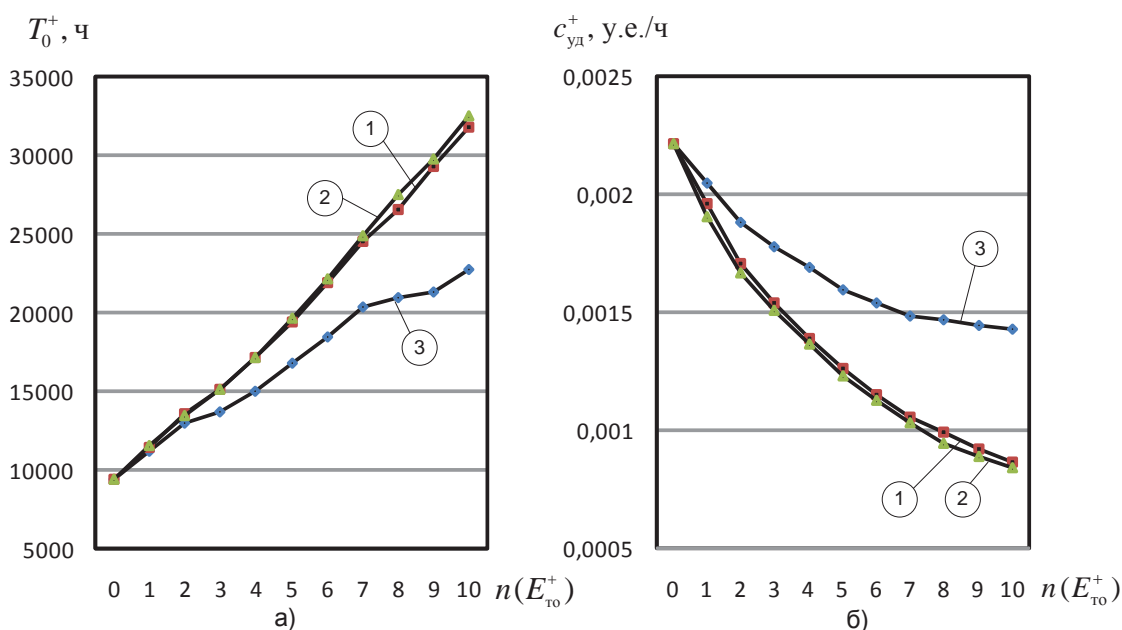


Рисунок 3 – Графики зависимости показателей  $T_0^+$  и  $c_{уд}^+$  от числа обслуживаемых элементов при различных стратегиях ТО (объект Test-3):  
1 – ТО по состоянию; 2 – адаптивное ТО; 3 – ТО по ресурсу.

Таблиця 4 – Сравнительные оценки показателей  $T_0$ ,  $c_{уд}$  и  $K_{ти}$  для объекта Test-4 при различных стратегиях ТО

Стратегия ТО		ТО по состоянию	Адаптивное ТО	ТО по ресурсу	Без ТО
Показатели (целевые функции)	$T_0$ , ч	6575	5566	4879	914
	$c_{уд}$ , у.е./ч	0,00668	0,00637	0,01180	0,02296
	$K_{ти}$	0,99736	0,99776	0,99323	0,99890
	$\varepsilon$	0,268	0,209	0,311	0,113

Стратегія ТО	ТО по состоянию	Адаптивное ТО	ТО по ресурсу	Без ТО
Параметры оптимальной стратегии ТО $(T_0^{*p} = 5000 \text{ ч})$	$ E_{\text{то}}^*  = 4$ $U_{\text{то}}^* = \{0,5; 0,55; 0,65; 0,85\}$ $T_k^* = 500 \text{ ч}$	$ E_{\text{то}}^*  = 3$ $U_{\text{то}}^* = \{0,55; 0,55; 0,55\}$ $\gamma^* = 0,5; \beta = 0,5$	$N_{\text{то}}^* = 3$ $ E_{\text{то}1}^*  = 3$ $T_{\text{то}1}^* = 600 \text{ ч}$ $ E_{\text{то}2}^*  = 3$ $T_{\text{то}2}^* = 6000 \text{ ч}$ $ E_{\text{то}3}^*  = 4$ $T_{\text{то}3}^* = 22000 \text{ ч}$	—

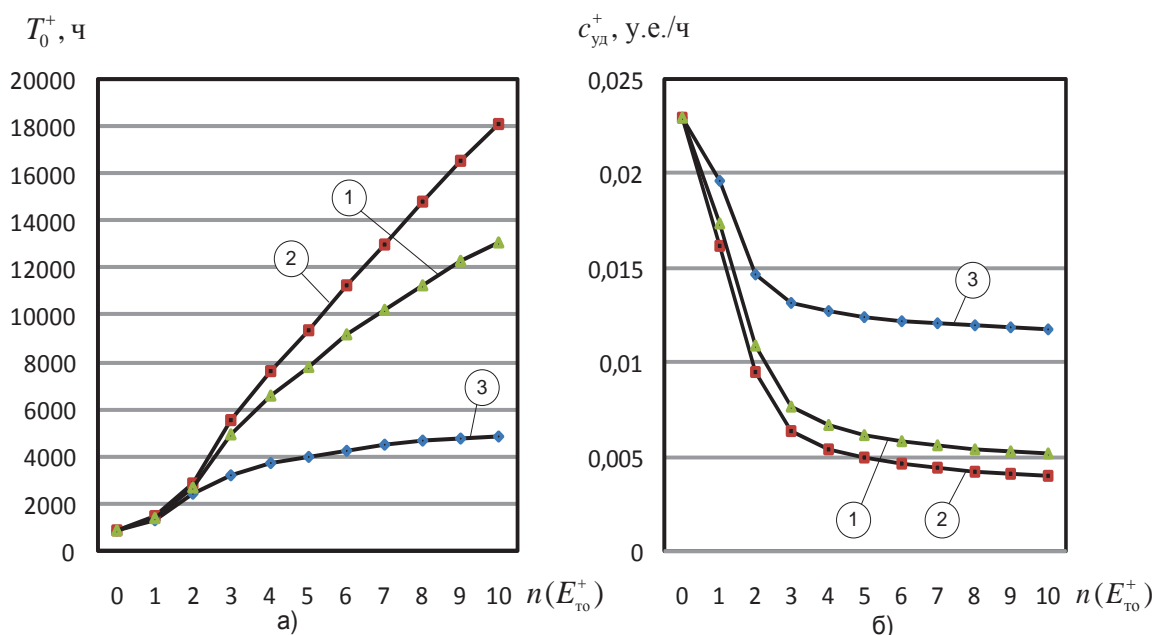


Рисунок 4 – Графики зависимости показателей  $T_0^+$  и  $c_{\text{уд}}^+$  от числа обслуживаемых элементов при различных стратегиях ТО (объект Test-4):  
 1 – ТО по состоянию; 2 – адаптивное ТО; 3 – ТО по ресурсу.

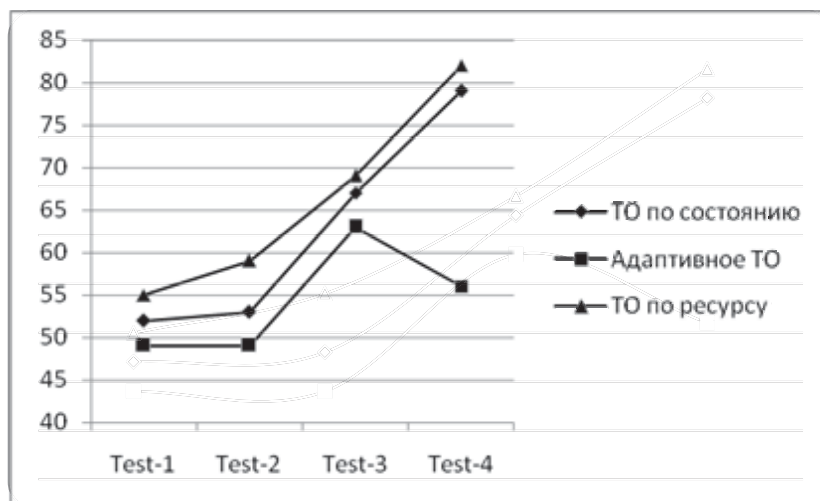


Рисунок 5 – Коэффициент относительных потерь уровня безотказности  $\delta_{T_0}$ , %

**По полученным результатам можно сделать такие выводы:**

1. Лучшей по показателям средней наработки на отказ  $T_0$  и удельной стоимости эксплуатации  $c_{уд}$  является стратегия “адаптивное ТО”. Затем следует стратегия “ТО по состоянию”. Худшей является стратегия “ТО по ресурсу”. Стратегия ТО считается лучшей, если график функции  $T_0^+$  располагается выше (для функции  $c_{уд}^+$  – ниже) по отношению к соответствующему графику для сравниваемой стратегии. Стратегия ТО, лучшая по показателю  $T_0^+$ , как правило, является лучшей и по показателю  $c_{уд}^+$ , и наоборот.

2. Стратегии “ТО по состоянию” и “адаптивное ТО” весьма близки по получаемым показателям. Это объясняется их общей сущностью – при проведении ТО используется информация о фактическом текущем состоянии объекта.

3. Эффективность различных стратегий ТО существенно зависит от надежность-стоимостной структуры объекта. Если распределение стоимости восстанавливаемых (в том числе и обслуживаемых) элементов близко коррелируется с распределением их показателей безотказности, различие в эффективности различных стратегий ТО сокращается. Это хорошо видно на примере объекта Test-2, для которого наименее надежные элементы одновременно являются и наиболее дорогостоящими.

4. Оптимальные параметры различных стратегий ТО существенно зависят как от надежность-стоимостной структуры объекта, так и от заданного требования к уровню безотказности объекта  $T_0^{тп}$ . Чем больше заданное значение  $T_0^{тп}$ , тем большее количество обслуживаемых элементов должно включаться в оптимальную стратегию ТО.

Для объекта Test-4 заданное требование  $T_0^{тп} = 5000$  ч при оптимальной стратегии “ТО по ресурсу” не обеспечивается<sup>1</sup> (несмотря на то, что использованы все потенциально обслуживаемые элементы).

Стратегия “адаптивного ТО” отдельно не исследовалась. Параметр адаптивного ТО  $\beta$  (постоянная экспоненциального сглаживания) был задан равным 0,5 для всех тестовых объектов. Это соответствует нейтральной ситуации, когда “вес” исходных данных о показателях безотказ-

ности элементов (априорная информация) и данных о фактических измеренных значениях определяющих параметров (апостериорной информации) примерно одинаков.

Не углубляясь в исследования стратегии “адаптивного ТО” можно предположить, что адаптивное ТО является более выгодным в случае недостоверной исходной информации о показателях безотказности элементов объекта. Это предположение проверим следующим образом.

Произведем расчеты показателей  $T_0$  и  $c_{уд}$  для тестовых объектов в случае, когда средняя наработка до отказа всех восстанавливаемых элементов  $T_{срi}$  в 2 раза меньше по сравнению с показателями, при которых были рассчитаны параметры оптимальной стратегии ТО  $STO^*$ .

Очевидно, что получаемые в этом случае показатели  $T_0'$  и  $c_{уд}'$  должны быть хуже, по сравнению с показателями  $T_0$  и  $c_{уд}$ , полученными при исходных значениях  $T_{срi}$ . В табл. 5 и 6 приведены значения коэффициентов относительных потерь в уровне безотказности  $\delta_{T_0}$  и в удельной стоимости эксплуатации  $\delta_{c_{уд}}$ , которые определялись по формулам:

$$\delta_{T_0} = \frac{T_0 - T_0'}{T_0} \cdot 100; \quad \delta_{c_{уд}} = \frac{c_{уд}' - c_{уд}}{c_{уд}} \cdot 100,$$

где  $T_0$  ( $c_{уд}$ ) – средняя наработка на отказ (удельная стоимость эксплуатации), полученная при оптимальных параметрах  $STO^*$  при условии, что показатели  $T_{срi}$  соответствуют значениям, заданным для тестовых объектов в контрольных примерах;

$T_0'$  ( $c_{уд}'$ ) – те же показатели, полученные при оптимальных параметрах  $STO^*$ , но при условии, когда показатели  $T_{срi}$  в исходных данных уменьшены в 2 раза.

На рис. 5 и 6 эти же коэффициенты показаны в виде графиков.

Полученные данные полностью подтверждают выдвинутое предположение о том, что стратегия “адаптивного ТО” является более предпочтительной в случае недостоверной (неточной) информации о показателях надежности элементов объекта.

<sup>1</sup> При неоптимальной стратегии ТО это требование может быть обеспечено, например, простым уменьшением периодичности ТО.

Таблиця 5 – Коэффициент относительных потерь уровня безотказности  $\delta_{T_0}$  (в %)

Вид стратегии ТО	Технический объект			
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4
ТО по состоянию	52	53	67	79
Адаптивное ТО	49	49	63	56
ТО по ресурсу	55	59	69	82

Таблиця 6 – Коэффициент относительных потерь удельной стоимости эксплуатации  $\delta_{C_{уд}}$  (в %)

Вид стратегии ТО	Технический объект			
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4
ТО по состоянию	110	144	187	192
Адаптивное ТО	98	100	167	117
ТО по ресурсу	121	712	185	166

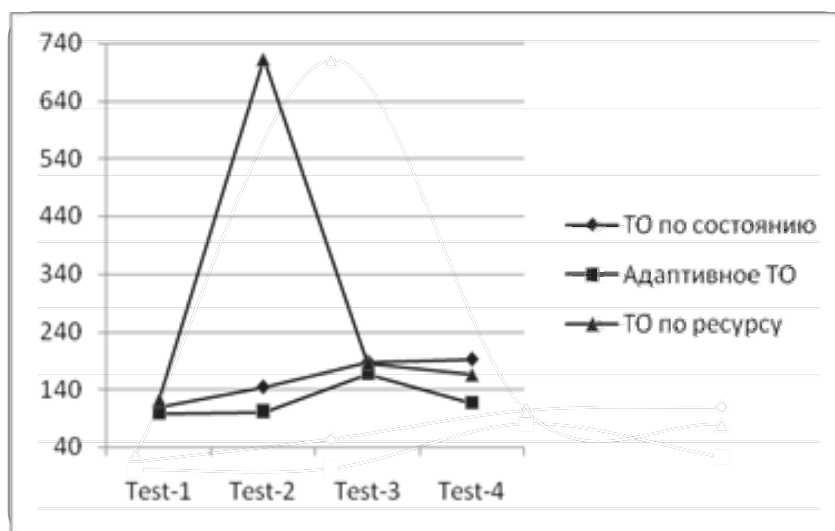


Рисунок 6 – Коэффициент относительных потерь удельной стоимости эксплуатации  $\delta_{C_{уд}}$ , %

Полученное для объекта Test-4 значение коэффициента потерь  $\delta_{C_{уд}} = 712\%$  не является случайным выбросом или ошибкой. Такие большие потери в удельной стоимости при “ТО по ресурсу” объясняются высокой стоимостью наименее надежных элементов объекта Test-4. Этот результат является дополнительным подтверждением критической чувствительности оптимальных параметров стратегии “ТО по ресурсу” в случае недостоверности исходных данных о надежности объекта.

#### Список использованных источников

1. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высш. школа, 1992. – 231 с.
2. Барзилович Е. Ю. Проблемы обеспечения эффективности сложных систем / Е. Ю. Барзилович, Ю. Д. Куликов, Ю. А. Сергеев // Основ-

ные вопросы теории и практики надежности. – Мн.: Наука и техника, 1992. – С. 155-167.

3. Боряк К.Ф. Дослідження процесу технічного обслуговування складних відновлюваних об'єктів радіоелектронної техніки за допомогою імітаційної статистичної моделі // Вісник інженерної академії України. – К., 2008. – № 2. – С. 85 – 91.

4. Банзак Г. В. Оптимизация процессов технического обслуживания сложных технических объектов / С. В. Ленков, О. Б. Лантвойт, Г. В. Банзак // IV-міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», НАУ. – Київ, 2011. – С. 474 – 475.

5. Банзак Г. В. Моделирование и оптимизация процес сов технического обслуживания сложных технических объектов / Г. В. Банзак, В. О. Браун // Науково-практична конференція «Актуальні задачі фінансового, психологічного,

правового, топогеодезичного, радіотехнічного та лінгвістичного забезпечення підрозділів та частин Збройних Сил України». – Київ, 2011. – С. 112.

6. Браун В. О., Боряк К. Ф., Лантвойт О. Б., Цыцарев В. Н. Моделирование процессов технического обслуживания сложных восстанавливаемых объектов радиоэлектронной техники // Вісник інженерної академії України. – К., 2008. – №1. – С. 47 – 52.

7. Банзак Г. В. База данных о надежности

сложных объектов радиоэлектронной техники / К. Ф. Боряк, В. Н. Цыцарев, Г. В. Банзак // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2010. – № 27. – С. 89 – 97.

*Поступила в редакцію 19.05.2015*

**Рецензент:** д.т.н., проф. Мокрицкий В. А., Одесский национальный политехнический университет, г. Одеса.

**Г. В. Банзак**, к.т.н., **О. В. Банзак**, к.т.н., **О. І. Лещенко**, к.т.н.

### ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ СТРАТЕГІЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*У статті досліджуються чотири тестові об'єкти, що розрізняються за своїми надійнісними і структурними характеристиками. Це дозволило перевірити і одночасно продемонструвати "працездатність" розроблених методик визначення оптимальних параметрів різних стратегій технічного обслуговування при різних початкових даних.*

**Ключові слова:** *технічне обслуговування, процес моделювання, оптимальні параметри, характеристики процесу.*

**G. V. Banzak**, PhD, **O. V. Banzak**, PhD, **O. I. Leshenko**, PhD

### COMPARATIVE RESEARCH OF VARIOUS STRATEGY OF MAINTENANCE SERVICE

*In clause four test objects differing on reliability and structural characteristics are investigated.. That allows to check up and simultaneously to show "working capacity" of the developed techniques of definition of optimum parameters various strategy of maintenance service at various initial data.*

**Keywords:** *maintenance service, process of modeling, optimum parameters, characteristics of process.*