

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

**Terentyeva I. E. Method of assessing the operational costs of telecommunication systems taking into account indicators of reliability.** The approach for assessing the effectiveness of operation of telecommunication systems is considered. The Total Cost of Ownership of a telecommunication system is proposed as complex indicator for assessing the effectiveness of operation. It is demonstrated that one of the main factors affecting the total cost are capital investments and operational costs. The method of assessing the operational costs is developed taking into account indicators of reliability of hardware systems. Analytical expressions for the evaluation of operating costs are obtained. The mean time between unscheduled repairs is proposed as the main indicator of the reliability which in turn is a function of the revealed and unrevealed failures. Also, the analytical dependences are developed subject to the intermittent failures which are typical for the equipment of telecommunication systems. It is shown that fault coverage effects on a value of operational costs. Thus, the complex technical and economic indicator is developed for assessing the operational costs subject to the main cost components and reliability indicators of an equipment of telecommunication systems. An example of calculation of the indicators is shown.

**Key words:** telecommunication systems, operational costs, reliability, revealed failures, unrevealed failures, intermittent failures

**Терентьева И. Е. Метод оцінки ефективності експлуатації телекомунікаційних систем з урахуванням показників надійності.** Розглянуто підхід до оцінки ефективності експлуатації телекомунікаційних систем. Розроблено аналітичні вирази для оцінки експлуатаційних витрат. Показано, що експлуатаційні витрати залежать від середнього часу напрацювання обладнання на дострокове знімання і є функцією інтенсивності явних, прихованих і повторювальних відмов, а також залежать від повноти контролю модулів. Запропоновано комплексний техніко-економічний показник для оцінки експлуатаційних витрат з урахуванням основних вартісних складових і показників надійності обладнання телекомунікаційних систем.

**Ключові слова:** телекомунікаційні системи, експлуатаційні витрати, надійність, явні відмови, приховані відмови, повторювальні відмови

**Терентьева И. Е. Метод оценки эксплуатационных затрат телекоммуникационных систем с учетом показателей надежности.** Рассмотрен подход к оценке эффективности эксплуатации телекоммуникационных систем. Разработаны аналитические выражения для оценки эксплуатационных затрат. Показано, что эксплуатационные затраты зависят от среднего времени наработки оборудования на досрочный съем и являются функцией интенсивности явных, скрытых и перемежающихся отказов, а также зависят от полноты контроля модулей. Предложен комплексный технико-экономический показатель для оценки эксплуатационных затрат с учетом основных стоимостных составляющих и показателей надежности оборудования телекоммуникационных систем.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, эксплуатационные затраты, надежность, явные отказы, скрытые отказы, перемежающиеся отказы

### 1. Введение

**Постановка задачи.** В настоящее время идет непрерывный процесс конвергенции новых технологий в телекоммуникационные системы (ТКС). При этом современное оборудование обладает не только расширенными функциональными возможностями, но и значительной стоимостью. В связи с повышенными требованиями к доступности (готовности) ТКС, возрастают и затраты на техническую эксплуатацию систем. Поэтому эффективность эксплуатации ТКС в значительной мере зависит от эксплуатационных затрат. Так, по последним данным компании Gartner, в бюджете крупных ИТ – компаний только 28% приходится на инвестиции в инфраструктуру и приложения, а остальные 72% бюджета

приходяться на обслуживание оборудования и инфраструктуры [1]. Поэтому задача оценки эффективности ТКС и определения эксплуатационных затрат является достаточно актуальной.

**Анализ литературных источников.** Для оценки затрат на внедрение и эксплуатацию ТКС разработано много различных показателей, но наиболее популярным в настоящее время является показатель в виде совокупной стоимости владения системой (англ. – Total Cost of Ownership, TCO) [1-9]. Как правило, предлагаемые методики оценивают две составляющие – капитальные затраты и эксплуатационные. Эксплуатационные затраты, в основном, оцениваются по бухгалтерским документам на текущие затраты [2-4]. Однако, такой подход не может дать полную картину затрат, поскольку очевидным является тот факт, что оборудование не является идеальным с точки зрения надежности и его отказы приводят к значительным издержкам. Очевидно, что эксплуатационные затраты зависят не только от капитальных затрат и плановых затрат на заработную плату, обучение персонала и т.д., но и от показателей надежности систем. Поскольку отказы модулей и их внеплановое восстановление может привести к простоям оборудования и дополнительным затратам. Такие затраты не являются плановыми, их можно определить только с помощью учета вероятностных показателей надежности. Поэтому без учета влияния показателей надежности на эксплуатационные затраты мы не сможем получить адекватные оценки.

В предложенных моделях для оценки TCO используется показатель средней наработки на отказ (англ. – Mean Time Between Failures, MTBF) [8-10]. Для современных цифровых модулей ТКС этот показатель составляет порядка 50-100 тысяч часов, но на таком длительном интервале безотказной работы вероятностные показатели интенсивностей отказов практически не будут влиять на эксплуатационные затраты. Однако, как показывает анализ процесса эксплуатации, демонтаж оборудования происходит значительно чаще. Это обусловлено наличием перемежающихся отказов (сбоев), ошибочными решениями встроенных систем контроля об отказах, а также ошибками операторов. Поэтому, как показано в работах [11, 12], более адекватные оценки получаются при использовании показателя средней наработки модуля на досрочный съем (англ. – mean time between unscheduled repairs, MTBUR), впервые предложенном в стандарте [13]. Проведенный анализ показал, что в настоящее время отсутствуют математические модели и показатели, учитывающие при оценке эксплуатационных затрат этот показатель.

**Цель и задачи исследования.** Таким образом, целью статьи является разработка показателя для оценки эксплуатационных затрат на оборудование ТКС, который, в отличие от известных, позволит учесть показатели надежности оборудования и влияние различных видов отказов на затраты.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать комплексный показатель оценки эффективности эксплуатации ТКС;
- разработать выражения для оценки эксплуатационных затрат ТКС с учетом показателей надежности;
- произвести исследование полученных показателей.

## 2. Определение показателя TCO

На основе проведенного выше анализа известных показателей оценки эффективности использования ТКС в качестве интегрального показателя эффективности выбираем TCO – совокупную стоимость владения ТКС. Показатель TCO можно представить в следующем виде [2]:

$$TCO = OPEX \cdot TC + CAPEX , \quad (1)$$

где  $TC$  – период расчета совокупной стоимости владения.

Капитальные расходы CAPEX (Capital Expenditures) рассчитываются на основе учета стоимости оборудования (включая его монтаж, конфигурацию и необходимое программное обеспечение – ПО) и сооружений по балансовой стоимости.

Операционные расходы OPEX (Operational Expenditures) рассчитываются на основе учета текущих затрат. При этом их можно разделить на две составляющие:

– DOPEX (Direct Operational Expenditures) - определяются по данным бухгалтерии и включают: общие затраты на заработную плату, затраты на электроэнергию, коммунальные расходы, закупки оборудования и ПО, суммы начисляемой амортизации на основные фонды;

– MOPEX (Maintenance Operational Expenditures) – могут быть отнесены к эксплуатационным расходам, связанным непосредственно с процессом технического обслуживания и ремонта.

Причем, в разных ситуациях часть капитальных затрат можно отнести к OPEX, а некоторые эксплуатационные затраты можно включить в CAPEX. Это зависит от конкретной учетной политики предприятия и особенностей решаемых задач. В нашем случае расходы, связанные с дополнительной закупкой запасных резервных блоков и программных модулей, будем относить к эксплуатационным расходам MOPEX.

Поскольку, как отмечалось выше, затраты будут зависеть от показателей надежности, то можно показать, что TCO является функцией показателя MTBUR:

$$TCO(MTBUR) = \Psi [OPEX(MTBUR) \cdot TC + CAPEX] \quad (2)$$

В свою очередь, MTBUR является функцией интенсивности явных, скрытых и перемежающихся отказов, а также зависит от полноты контроля модулей. Таким образом, формализуя показатели, входящие в выражение (2), можно получить зависимость эксплуатационных затрат от показателей надежности.

### 3. Метод определения эксплуатационных затрат

Обозначим через  $T$  интервал планирования обслуживания ТКС. Тогда средние ожидаемые затраты на обслуживание всех съемных модулей – RC (Removable Components) за средний цикл регенерации обозначим, как ECC (Expected Cost per Cycle). Количество модулей ( $N_{RC}$ ) определяется базовой комплектацией поставляемого оборудования и будет равно кратности резервирования, если эксплуатируется только один (не резервированный) стив, в котором расположены данные модули.

Ожидаемые затраты на обслуживание RC в течение интервала  $T$  определим, как

$$N_{RC,j} \cdot MTBUR_j \cdot ECC_j,$$

где  $N_{RC,j}$  – количество эксплуатируемых RC  $j$ -го типа;  $MTBUR_j$  – средняя наработка RC между незапланированными восстановлениями RC  $j$ -го типа.

Отношение  $T/MTBUR$  равно количеству восстановлений RC на интервале  $T$ . Таким образом, для RC  $j$ -го типа эксплуатационные затраты на интервале  $T$  будут равны

$$MOPEX_j = N_{RC,j} \cdot (T/MTBUR_j) \cdot ECC_j + MCAPEX_j, \quad (3)$$

где  $MCAPEX_j$  – капитальные затраты на закупку дополнительных резервных (запасных) CM и программных модулей  $j$ -го типа на интервале  $T$ .

Отсюда, полные эксплуатационные расходы для всех RC  $j$ -го типа

$$MOPEX = \sum_{j=1}^{JRC} [N_{RC,j} \cdot (T/MTBUR_j) \cdot ECC_j + MCAPEX_j], \quad (4)$$

где  $JRC$  – количество типов RC  $j$ -го типа.

А полные расходы для всего оборудования

$$MOPEX_{\Sigma} = L \sum_{j=1}^{JRC} [N_{RC,j} \cdot (T/MTBUR_j) \cdot ECC_j + MCAPEX_j], \quad (5)$$

где  $L$  – количество типов RC (здесь и далее принимаем, что для одного типа оборудования эксплуатационные расходы одинаковы).

Поскольку эксплуатация ТКС, как правило, планируется на несколько лет, необходимо учитывать разновременность затрат на техническое обслуживание и разновременность капитальных вложений. Поэтому формулу (2) можно представить в следующем виде

$$MOPEX_j = \frac{T_{0,j}}{MTBUR_j} \left\{ \sum_{t=1}^{T_K} N_{RC,j,t} ECC_{j,t} (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \sum_{t=1}^{T_K} MCAPEX_{t,j} (1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (6)$$

где  $T_{0,j}$  – среднее время наработки RC  $j$ -го типа за год;  $T_K$  – календарная продолжительность обслуживания RC, определяемая числом лет эксплуатации (принимаем эту величину одинаковой для всех типов RC);  $ECC_{j,t}$  – ожидаемые средние затраты на одно восстановление RC  $j$ -го типа в году  $t$ ;  $MCAPEX_{j,t}$  – капитальные вложения в эксплуатацию RC  $j$ -го типа в году  $t$ ;  $\varepsilon$  – норма дисконта времени, выражаемая в долях единицы или в процентах за год (одинакова для всех типов RC);  $N_{RC,j,t}$  – количество RC  $j$ -го типа, эксплуатируемых в году  $t$ .

Далее будем рассматривать определение эксплуатационных затрат только в период послегарантийного обслуживания. Ожидаемые затраты ( $ECC_{w,j}$ ) на этапе послегарантийного обслуживания определяются из выражения

$$ECC_{w,j} = C_{L,j} (DT_j + INT_j) + C_{TR,j} + C_{R,j},$$

где  $C_{R,j}$  – средняя стоимость восстановления RC в сервисном центре поставщика;  $C_{TR,j}$  – средняя стоимость транспортировки RC в сервисный центр поставщика;  $DT_j, INT_j$  – среднее время монтажа и демонтажа RC;  $C_{L,j}$  – стоимость одного часа работы инженера, обслуживающего систему.

В случае заключения договора на одну из программ сервисного пост-гарантийного обслуживания величина  $C_{R,S,j}$  будет определяться как средняя удельная стоимость годового сервисного обслуживания, приходящаяся на обслуживание данного RC, где  $S = \overline{1, \dots, 4}$ .

Пример программ сервисного обслуживания, по которым можно определить  $C_{R,S,j}$ , приведены в Табл. 1 [14].

**Программы пост-гарантийного обслуживания  
компании Huawei Technology Ltd**

Табл. 1

Тариф		Удаленная поддержка	Замена оборудования	Поддержка на объекте заказчика	Стоимость
1.	Базовый	7×24 «Горячая линия»; 5×8 Удаленная техподдержка	5×8×NBD-s отправка из центра на следующий рабочий день (англ. – Next Business Day)	Не предусмотрено	$C_{R,1,j}$
2.	Стандартный	7×24 «Горячая линия»; 5×8 Удаленная техподдержка	5×8×NBD авансовая замена на следующий рабочий день	5×8×NBD (дополнительно)	$C_{R,2,j}$
3.	Расширенный	7×24 «Горячая линия»; 7×24 Удаленная техподдержка	5×8×4 авансовая замена в течение 4-х часов (в рабочие часы)	5×8×4 (дополнительно)	$C_{R,3,j}$
4.	Премиум	7×24 «Горячая линия»; 7×24 Удаленная техподдержка	7×24×4 авансовая замена в течение 4-х часов (7 дней в неделю, круглосуточно)	7×24×4 (дополнительно)	$C_{R,4,j}$

Как видно из таблицы типы обслуживания и их стоимости могут существенно меняться, что оказывает влияние на эксплуатационные затраты. Конкретные стоимости каждого тарифа определяются непосредственно контрактом.

Также принимаем допущение, что имеется достаточный объем резервного фонда RC и отсутствуют потери из-за простоя системы в случае отказа RC. Тогда MCAPEX будет определяться стоимостью запасных RC.

Выражения для  $MTBUR$  в этот период определяются по методике, разработанной автором. При этом для экспоненциального распределения наработки RC до отказа этот показатель можно определить из следующего выражения:

$$MTBUR_j = \frac{1}{\theta_j + \mu_j}, \quad (7)$$

где  $\theta_j$  – интенсивность перемежающихся отказов RC  $j$ -го типа;  $\mu_j$  – интенсивность явных отказов RC  $j$ -го типа.

Полноту контроля  $a$  определим, как отношение интенсивности отказов контролируемой части RC к сумме интенсивностей отказов контролируемой и неконтролируемой частей RC по формуле:

$$a_j = \frac{\lambda_{CBT,j}}{\lambda_{CBT,j} + \lambda_{NCBT,j}} = \frac{\mu_j}{\mu_j + \lambda_j}, \quad (8)$$

где  $\lambda_{CBT,j}$  – интенсивность отказов той части  $j$ -го RC, которая охвачена контролем (тестом);  $\lambda_{NCBT}$  – интенсивность отказов той части  $j$ -го RC, которая не охвачена контролем (тестом);  $\lambda$  – интенсивность скрытых отказов  $j$ -го RC.

Отсюда находим зависимость между интенсивностями явных и скрытых отказов

$$\lambda_j = \mu_j \frac{1 - a_j}{a_j}. \quad (9)$$

Таким образом, значения интенсивностей явных и скрытых отказов для  $j$ -го RC связаны между собой системой уравнений

$$\begin{cases} \lambda_j = \mu_j \frac{1 - a_j}{a_j}; \\ \lambda_j = \Lambda_j - \mu_j, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Lambda_j = 1 / MTBF_j$  – интенсивность отказов  $j$ -го RC.

**Пример.** Исследуем влияние на эксплуатационные затраты ( $MOPEX$ ) показателей надежности при следующих исходных данных:  $T_k = 10$  ч;  $T_0 = 8600$  ч;  $JRC = 6$ ;  $C_{TR} = 50$  у.е.;  $C_r = 1000$  у.е.;  $C_L = 5$  у.е.;  $DT = INT = 0,25$  ч;  $MCAPEX = 1000$  у.е.  $\theta = 10^{-4}$  1/ч. Для упрощения расчетов полагаем, что все показатели равнозначны для всех JRC типов RC.

Произведем анализ соотношения показателей MTBF и MTBUR. Положим  $MTBF = 10000$  ч, тогда: при  $a = 0,1$ , получаем:  $MTBUR = 9090$  ч, а при  $a = 0,2$ , получаем  $MTBUR = 8330$  ч. Отсюда видно, что при определенных данных показатель MTBUR может существенно отличаться от значений MTBF.

Поэтому использование показателя MTBF для расчета эксплуатационных затрат приведет к заниженным значениям затрат. Это иллюстрируют графики, приведенные на Рис. 1, на котором показаны зависимости эксплуатационных затрат от интенсивности отказов RC ( $\Lambda = 1 / MTBF$ ).

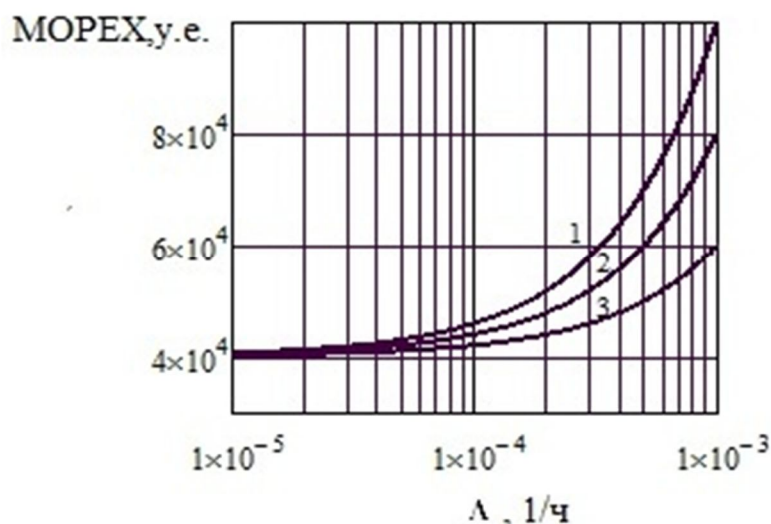


Рис.1. Зависимости эксплуатационных затрат от интенсивности отказов РС  
 1 –  $a = 0,3$ ;      2 –  $a = 0,2$ ;      3 –  $a = 0,1$

Как видно из рисунка, чем меньше средняя наработка РС до отказа, тем выше эксплуатационные затраты. Таким образом, данные результаты показывают, что показатели надежности оказывают существенное влияние на эксплуатационные затраты и их необходимо учитывать при оценке ТСО. Причем использование показателя MTBUR позволяет получить более точные результаты.

#### 4. Выводы

В работе рассмотрен метод оценки эффективности эксплуатации ТКС. В качестве общего показателя эффективности предложено использовать полную стоимость владения системой – ТСО, поскольку, как показал проведенный анализ, его широко используют в зарубежной практике. Приведены выражения для определения составляющих полной стоимости. Разработаны аналитические выражения для оценки эксплуатационных затрат. Показано, что эксплуатационные затраты зависят от надежностного показателя – среднего времени наработки на досрочный сьем, который, в свою очередь, является функцией интенсивности явных, скрытых и перемежающихся отказов, а также зависит от полноты контроля модулей.

Впервые получен комплексный технико-экономический показатель для оценки эксплуатационных затрат с учетом основных стоимостных составляющих процесса эксплуатации и показателей надежности оборудования ТКС. На примере проиллюстрировано, что показатели надежности оборудования ТКС существенно влияют на эффективность эксплуатации.

Данные результаты могут быть полезны организациям, разрабатывающим и эксплуатирующим ТКС, и позволяют провести оценки затрат и произвести выбор оптимальных вариантов построения и эксплуатации ТКС.

Дальнейшим развитием полученных результатов будет разработка математических моделей для оценки эксплуатационных затрат с учетом формирования запасного обменного фонда модулей и оптимизации структур резервирования оборудования ТКС.

#### Литература

1. Равшанов Я. О. Сколько стоит корпоративный ЦОД: методики расчета ТСО [Электронный ресурс] / Я. О. Равшанов // Технологии и средства связи. – 2010. – №4. – Режим доступа : <http://tsonline.ru/articles2/fix-corp/skolko-stoit-korporativnii-cod-metodiki-rascheta-tso> (10.12.2015г).

2. Ellram L. Total Cost of Ownership: Elements and Implementation Issue / L. Ellram // International Journal of Purchasing and Materials Management. – 1993. – Vol. 29. Is. 3. – P. 2-11.
3. Минухин С. В. Методика выбора и расчета затрат совокупной стоимости владения вычислительным кластером / С. В. Минухин, С. В. Знахур // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №1 (49). – С. 90-96.
4. Волков И. Оценка эффективности информационных систем [Электронный ресурс] / И. Волков, А. Денисов // IBM DeveloperWorks. – 2010. – Режим доступа : [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-otcenka\\_efektivnosti\\_3/index.html](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-otcenka_efektivnosti_3/index.html) (10.12.2015г).
5. Щетинин И. Стоимость владения и системы управления [Электронный ресурс] И. Щетинин // Открытые системы. – 2005. – №9 – Режим доступа : <http://www.i-teco.ru/article60.html> (10.12.2015г).
6. Torell W. TCO Analysis of a Traditional Data Center vs. a Scalable, Prefabricated [Электронный ресурс] / W. Torell // Data Center Schneider Electric. – Режим доступа : [http://www.apcmmedia.com/salestools/WTOL-8NDS37/WTOL-8NDS37\\_R1\\_EN.pdf?sdirect=true](http://www.apcmmedia.com/salestools/WTOL-8NDS37/WTOL-8NDS37_R1_EN.pdf?sdirect=true) (10.12.2015г).
7. Morey T. Using Total Cost of Ownership to Determine Optimal PC Refresh Lifecycles / T. Morey, R. Nambiar // Wipro Consulting Service Product Strategy and Architecture Practice. – 2012. – 27 с.
8. Hurkens K. Total Cost of Ownership in the Services Sector: A Case Study / K. Hurkens, W. V. Valk, F. Wynstra // The Journal of Supply Chain Management. – 2006. – Vol. 42. – P. 27-37.
9. Sohn S. Y. Cost of ownership model for a CRM system / S. Y. Sohn . J. S. Lee // Science of Computer Programming. – 2006. – Vol. 60. – P. 68-81.
10. Танцюра Л. І. Оцінка показників надійності інфокомунікаційних мереж як складних систем / Л. І. Танцюра, Е. Д. Амірханов, О. В. Галаган // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №5(33). – С. 80-87.
11. Уланский В. В. Стратегия обслуживания одноблочной системы авионики при наличии явных и скрытых отказов / В. В. Уланский, И. А. Мачалин // Математичні машини і системи. – 2007. – №3. – С. 245-256.
12. Уланский В. В. Обобщенные функции стоимости обслуживания до безопасного отказа легкозаменяемых блоков систем авионики / В. В. Уланский, И. А. Мачалин // Електроніка та системи управління. – 2008. – №1(15). – С. 86-97.
13. Electronic reliability design handbook: MIL-HDBK – 338B. – Virginia: Air Force Research Laboratory Information USA. – 1991. – 1046 p. – (Standard Air Force USA).
14. Warranty Policy for Network, Secospace and UC&C [Электронный ресурс] // Copyright Huawei. – 2012. – Режим доступа : <http://support.huawei.com/enterprise/#tabname=serSolveProject> (10.12.2015г).

*Автор статті*

**Терентьева Ирина Євгенівна** – аспірант, асистент кафедри телекомунікаційних систем, Національний авіаційний університет, Київ. Тел.: +380 (97) 590 68 68. E-mail: i.terentyeva@ukr.net.

*Author of the article*

**Terentyeva Iryna Yevhenivna** – post graduate student, assistant of the telecommunication systems department, National Aviation University, Kyiv. Tel.: +380 (97) 590 68 68. E-mail: i.terentyeva@ukr.net.

Дата надходження в редакцію: 16.12.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Г. Ф. Конахович