

**ОЦЕНИВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ
ПРИ РАСЧЕТЕ СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

В. А. ЗЕЛЕНЦОВ*, А. П. КОВАЛЕВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия
* v.a.zelentsov@gmail.com*

Аннотация. Предложены математические модели для оценивания вклада системы эксплуатации в совокупную стоимость владения территориально распределенными техническими комплексами. Рассматриваются базовые стратегии организации технического обслуживания комплексов — плановая календарная и по фиксации отказов. Полученные результаты могут быть использованы для предварительного расчета эксплуатационных затрат и уточнения стоимости жизненного цикла комплексов при их разработке или приобретении.

Ключевые слова: совокупная стоимость владения, распределенные технические комплексы, система эксплуатации, стратегия технического обслуживания и ремонта, эксплуатационные затраты

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00767.

Ссылка для цитирования: Зеленцов В. А., Ковалев А. П. Оценивание эксплуатационных затрат при расчете совокупной стоимости владения распределенными техническими комплексами // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 11. С. 789—795. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-789-795.

**ESTIMATION OF OPERATING COSTS
WHEN CALCULATING THE TOTAL COST OF OWNERSHIP
OF DISTRIBUTED TECHNICAL COMPLEXES**

V. A. Zelentsov*, A. P. Kovalev

*St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
St. Petersburg, Russia
* v.a.zelentsov@gmail.com*

Abstract. Mathematical models are proposed for estimating the contribution of the cost of the operating system to the total cost of ownership of geographically distributed technical complexes. The basic strategies in organization of the complexes maintenance are considered — planned calendar maintenance and maintenance for fixing failures. The results obtained can be used for preliminary calculation of operational costs and clarification of the cost of the life cycle of complexes during their development or acquisition.

Keywords: total cost of ownership, distributed technical complexes, operation system, maintenance and repair strategy, operating costs

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation N 22-19-00767.

For citation: Zelentsov V. A., Kovalev A. P. Estimation of operating costs when calculating the total cost of ownership of distributed technical complexes. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 11. P. 789—795 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-789-795.

Введение. Понятие совокупной стоимости владения (от англ. — total cost of ownership, TCO) используется для оценивания полного объема затрат, которые необходимо понести не только для разработки или приобретения какого-либо изделия или системы, но и для обеспечения их эксплуатации в течение всего жизненного цикла. Такой подход особенно актуален применительно к сложным распределенным техническим комплексам (РТК), таким как информационно-вычислительные системы, АСУ, информационно-телекоммуникационные

системы, системы телевидения и радиовещания, радиотехнические системы и др. Затраты на эксплуатацию подобных РТК могут в несколько раз превышать первоначальные затраты на их разработку и приобретение. Уровень эксплуатационных затрат существенно зависит от надежности компонентов РТК и системы эксплуатации (СЭ), на которую возлагаются задачи восстановления и поддержания работоспособности РТК в пределах жизненного цикла. В настоящее время в исследованиях, посвященных анализу совокупной стоимости владения (ССВ) [1—4], вопросам оценивания влияния способа построения и функционирования СЭ на ССВ РТК уделяется недостаточно внимания. Это определяет актуальность привлечения и развития результатов разработок, касающихся оптимизации структуры и алгоритмов функционирования СЭ РТК, для проведения детального расчета эксплуатационных затрат как составной части ССВ [5, 6].

Особенности оценивания ССВ с учетом системы эксплуатации РТК. Оценивание ССВ осуществляется на этапе создания (приобретения) РТК и включает расчет капитальных затрат, а также будущих эксплуатационных затрат, приведенных к моменту начала функционирования РТК с помощью коэффициента дисконтирования. Упрощенно такой расчет представляется выражением

$$C_{\text{ССВ}} = \sum_{i=1}^N (1+E)^{-i} C_3^i + C_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{к}}$ — капитальные затраты на создание (приобретение) РТК; C_3^i — эксплуатационные затраты за i -й период эксплуатации, обычно длительность периода принимается равной одному году; E — коэффициент дисконтирования; N — длительность жизненного цикла РТК (в годах).

Эксплуатационные затраты включают целый ряд составляющих. Например, при создании систем спутникового телевидения в состав эксплуатационных затрат входят затраты, связанные с арендой спутникового сегмента, обновлением программного обеспечения, оплатой труда персонала, содержанием офисов, покупкой расходных материалов и др. Кроме того, важнейшей частью эксплуатационных затрат являются затраты на эксплуатацию профессионального оборудования (не менее 30 %), а также затраты, обусловленные простоями РТК из-за отказов и планового технического обслуживания. Затраты на эксплуатацию оборудования и потери от простоев зависят от надежности РТК, а также от способов построения системы эксплуатации, в рамках которой осуществляется восстановление работоспособности РТК после отказов и поддержание работоспособности путем проведения профилактического технического обслуживания.

Необходимо отметить, что затраты, связанные с системой эксплуатации, включают также и капитальные затраты. Их достаточно просто учесть включением в состав общих капитальных затрат на создание или закупку РТК. Гораздо сложнее оценить эксплуатационные затраты, для расчета которых требуется разработка математических моделей, описывающих процессы отказов и восстановлений компонентов РТК, а также процессы их технического обслуживания в формируемых системах эксплуатации РТК. Именно этой составляющей ССВ будет уделено основное внимание в настоящей статье.

В состав системы эксплуатации в общем случае входят склады и комплекты ЗИП, центры и бригады технического обслуживания и ремонта, ремонтные органы, средства измерения параметров технического состояния компонентов РТК, средства сбора и обработки информации о техническом состоянии, органы управления, обслуживающий персонал, необходимая документация и программное обеспечение.

Вне зависимости от конкретного назначения РТК система его эксплуатации может быть представлена в виде совокупности нескольких функциональных подсистем — информационно-измерительной, информационно-управляющей, и подсистемы поддержания и восстановления работоспособности (ППВР) [5]. Информационно-измерительная и информационно-

управляющая подсистемы объединены едиными информационными процессами сбора и передачи информации о техническом состоянии компонентов РТК и по этому признаку могут быть объединены в одну подсистему сбора и обработки информации о техническом состоянии средств РТК (коротко — информационную подсистему (ИПС)).

Соответственно, при расчете ССВ примем, что для каждого i -го периода эксплуатации в состав параметра C_i из формулы (1) входят затраты $C_{СЭ}$, обусловленные функционированием системы эксплуатации:

$$C_{СЭ} = C_{ИПС} + C_{ППВР}, \quad (2)$$

при этом, в соответствии с постановкой задачи, оба слагаемых в данном выражении включают только эксплуатационные затраты и не учитывают капитальных расходов на построение СЭ.

В выражении (2) верхний индекс „ i “ опущен для упрощения записи, однако расчет производится применительно к годовым эксплуатационным затратам.

Рассмотрим далее порядок расчета составляющих формулы (2).

Расчет затрат на функционирование ИПС. Эксплуатационные затраты при функционировании ИПС складываются из затрат на решение задач по сбору и обработке элементами подсистемы измерительной информации о техническом состоянии компонентов РТК, а также затрат на передачу информации между элементами ИПС.

Для решения любой задачи может понадобиться информация двух видов: исходная, изначально имеющаяся и распределенная по элементам различных уровней иерархии ИПС — информация первого вида, и информация второго вида, получаемая в результате решения других, предшествующих задач. Примером информации первого вида могут служить результаты измерений параметров технического состояния (ТС) компонентов РТК, сведения о численности и квалификации персонала, привлекаемого для проведения технического обслуживания (ТО) и ремонтов, сведения о применении РТК по назначению и т.д. Информация второго вида — это спрогнозированные моменты выхода параметров ТС за пределы допусков, желаемые объемы и периоды ТО компонентов РТК и др. Наличие информации первого вида будем определять с помощью матрицы $\mathbf{V}^{(1)} = \|v_{kn}^{(1)}\|_N^K$, а информационную взаимосвязь между задачами будем описывать с помощью матрицы $\mathbf{V}^{(2)} = \|v_{kr}^{(2)}\|_K^K$, где $v_{kn}^{(1)}$ — объем информации (килобайт), необходимой для решения k -й задачи и имеющейся на n -м элементе; $v_{kr}^{(2)}$ — объем информации о результатах решения r -й задачи, необходимый для решения k -й задачи.

Обозначим через $\mathbf{X} = \|x_{kn}\|_N^K$ вариант распределения задач по элементам ИПС, где

$$x_{kn} = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-я задача решается } n\text{-м элементом,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Введем также обозначения:

— s_{kn} — затраты на решение k -й задачи n -м элементом;

— c_{nl} — затраты на передачу единицы объема информации между элементами n и l .

С учетом заданного в СЭ распределения задач по сбору и обработке информации по элементам ИПС затраты на функционирование подсистемы определяются следующим образом:

$$C_{ИПС} = N_{\Pi} \sum_{k=1}^k \sum_{n=1}^N x_{kn} \left[s_{kn} + \sum_{l=1}^N v_{kl}^{(2)} c_{nl} + \sum_{r=1}^k \sum_{n=1}^N v_{kr}^{(2)} x_{rl} c_{nl} \right], \quad (3)$$

где N_{Π} — число циклов решения задач ИПС в течение рассматриваемого периода эксплуатации.

Расчет затрат на функционирование ППВР. Эксплуатационные затраты на функционирование ППВР включают в качестве основных составляющих расходы на содержание бригад ТО и ремонта, собственно расходы на проведение мероприятий по поддержанию и

восстановлению работоспособности РТК, а также транспортные расходы на выезды бригад к местам проведения ТО и ремонтов (либо доставку отказавших компонентов РТК к местам проведения работ):

Затраты на содержание бригад обслуживающего персонала определяются как

$$C_{\text{бр}} = \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^{p_j} C_{\text{бр},jk}, \quad (4)$$

где $C_{\text{бр},jk}$ — годовые затраты на содержание k -й бригады обслуживающего персонала в j -м центре ТО и ремонта (ЦТОР), $j = \overline{1, g}$; p_j — количество бригад обслуживающего персонала в j -м ЦТОР, g — общее количество ЦТОР.

Затраты на ТО и ремонты складываются из соответствующих затрат на каждый компонент РТК ($C_{\text{ТОР}} = \sum_{q=1}^Q C_{\text{ТОР}q}$, где Q — общее число компонентов) и существенным образом

зависят от характеристик надежности обслуживаемых компонентов, а также от принятой стратегии и конкретных значений периодичности и объемов ТО.

Рассмотрим математическую модель расчета эксплуатационных затрат для двух видов стратегий ТО, охватывающих широкий класс используемых на практике правил обслуживания.

Стратегия 1. ТО компонентов проводится через определенные календарные периоды времени T , при возникновении отказов на интервале между этапами ТО немедленно начинается их устранение.

Стратегия 2. Плановое ТО компонентов не проводится, обслуживание (ремонт) производится только при отказе.

Заметим, что стратегия 2 является частным случаем стратегии 1 при периоде $T \rightarrow \infty$. Поэтому остановимся подробнее на стратегии 1.

Будем считать, что в процессе ТО или ремонтов полностью восстанавливаются утрачиваемые в процессе эксплуатации свойства обслуживаемых технических средств (компонентов РТК), и введем в рассмотрение случайный процесс $\xi(t)$, характеризующий состояние компонента в момент времени t (индекс номера компонента РТК для упрощения записи здесь и ниже опущен). Полагаем, что

$$\xi(t) = \begin{cases} A_0, & \text{если в момент } t \text{ компонент работоспособен;} \\ A_1, & \text{если в момент } t \text{ компонент находится} \\ & \text{в состоянии отказа (на ремонте);} \\ A_2, & \text{если в момент } t \text{ проводится ТО компонента.} \end{cases}$$

В момент окончания ТО дальнейшее течение процесса $\xi(t)$ не зависит от прошлого, так как в этот момент происходит полное восстановление элемента и перепланирование последующего ТО. Длительности интервалов между моментами соседних обновлений являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами, формирующими процесс восстановления [7]. Это означает, что $\xi(t)$ является для данных стратегий регенерирующим случайным процессом, его точками регенерации будут моменты $\xi_k = kT_p$, $k = 1, 2, \dots$, где $T_p = T + \tau_{\text{ТО}}$ — период регенерации, T — период ТО, $\tau_{\text{ТО}}$ — длительность ТО.

Используя методы анализа регенерирующих случайных процессов [8, 9], получим следующее соотношение для средних удельных (приходящихся на единицу времени) затрат на ТО и ремонт компонента РТК:

$$C_{\text{уд}} = \frac{c_{\text{в}}M[\tau_{\text{в}}(T_p)] + c_{\text{ТО}}M[\tau_{\text{ТО}}]}{M[T_p]}, \quad (5)$$

где $M[\tau_B(T_p)] = \bar{\tau}_B(T)$ — математическое ожидание (МО) времени пребывания компонента в состоянии A_1 (в состоянии восстановления работоспособности) за период регенерации; $M[T_p]$ — МО длительности периода регенерации; $M[\tau_{ТО}] = \bar{\tau}_{ТО}$ — МО длительности ТО; c_B и $c_{ТО}$ — удельные затраты на восстановление работоспособности и ТО компонента соответственно.

Период ТО в общем случае может быть случайной величиной с функцией распределения $\Phi(t)$. Тогда

$$C_{уд} = \frac{\int_0^\infty \left\{ c_B \left[T - \int_0^\infty R(t, T) dt \right] + c_{ТО} \bar{\tau}_{ТО} \right\} d\Phi(T)}{\int_0^\infty (T + \bar{\tau}_{ТО}) d\Phi(T)}, \quad (6)$$

где $R(t, T) = P\{\tau_{б,р}(T) > t\}$ — дополнительная функция распределения случайной величины $\tau_{б,р}(T)$ времени пребывания компонента в состоянии A_0 за период регенерации, т.е. времени его безотказной работы за период регенерации.

При детерминированном периоде ТО

$$C_{уд} = \frac{c_B [T - \bar{\tau}_{б,р}(T)] + c_{ТО} \bar{\tau}_{ТО}}{T + \bar{\tau}_{ТО}}, \quad (7)$$

где $\bar{\tau}_{б,р}(T)$ — МО времени безотказной работы компонента за период регенерации.

Таким образом, общие затраты на ТО и ремонт одного произвольного компонента РТК за оцениваемый период эксплуатации T_3 при использовании 1-й стратегии ТО будут равны

$$C_{ТОР} = \frac{T_3}{T + \bar{\tau}_{ТО}} \{ c_B [T - \bar{\tau}_{б,р}(T)] + c_{ТО} \bar{\tau}_{ТО} \}. \quad (8)$$

В частном случае, при отсутствии профилактических мероприятий, т.е. при $T \rightarrow \infty$, что соответствует стратегии 2, получим известное соотношение

$$C_{ТОР} = T_3 c_B \frac{\bar{\tau}_B}{\bar{\tau}_{б,р} + \bar{\tau}_B}, \quad (9)$$

Наконец, транспортные расходы определяются как средние суммарные за год эксплуатации затраты на передвижения, связанные с проведением ТО или ремонтов. Величина транспортных затрат зависит от взаимного расположения обслуживаемых компонентов и элементов ППВР, особенностей организации логистики, а также от надежности компонентов и используемой стратегии ТО и ремонта, характеризующих частоту поездок для проведения обслуживаний. Кроме того, транспортные затраты зависят от того, где проводятся ТО и ремонт — в центрах ТО и ремонта или на местах расположения компонентов. Исходя из этого, величина среднегодовых транспортных затрат при использовании плановой стратегии ТО определяется следующим образом:

$$C_{тр} = \sum_{j=1}^g \sum_{n \in I_j} T_3 c_{трjn} \left[\frac{1}{\bar{\tau}_{б,рn}(T_n)} + \frac{1}{T_n} \right], \quad (10)$$

где I_j — множество номеров компонентов, расположенных в зоне обслуживания j -го ЦТОР; $c_{трjn}$ — затраты на проезд между j -м ЦТОР и n -м элементом из зоны обслуживания j -го ЦТОР; $\bar{\tau}_{б,рn}$, T_n — средняя наработка на отказ и период ТО n -го элемента соответственно.

В случае использования стратегии ТО по фиксации отказа

$$C_{\text{тр}} = \sum_{j=1}^g \sum_{n \in I_j} T_3 \frac{C_{\text{тр } jn}}{T_{jn}}, \quad (11)$$

Таким образом, общая величина затрат по рассмотренным составляющим за один период эксплуатации равна

$$C_{\text{ППВР}} = C_{\text{б.р}} + \sum_{m=1}^M C_{\text{ТОР}_m} + C_{\text{тр}}, \quad (12)$$

где M — общее число обслуживаемых компонентов РТК, стоимость ТО и ремонта каждого из которых за период эксплуатации рассчитывается по формуле (8) или (9) в зависимости от принятой стратегии ТО.

Результаты расчетов затрат на функционирование ИПС и ППВР, формулы (3) и (12), для каждого периода эксплуатации далее необходимо подставить в соотношение (1) на место соответствующих составляющих эксплуатационных затрат для оценивания совокупной стоимости владения.

Заключение. Предложены модели расчета затрат на эксплуатацию РТК при оценке ССВ, позволяющие учесть особенности построения и функционирования системы эксплуатации этих комплексов, а также проанализировать влияние принятых стратегий ТО и ремонта на итоговые результаты расчетов. С учетом доли эксплуатационных затрат в совокупной стоимости владения это влияние может быть достаточно существенным. Поэтому важнейшим принципом создания сложных распределенных технических комплексов различного назначения является необходимость совместной разработки РТК и систем их эксплуатации. Цель такой разработки — оптимизация структуры и алгоритмов функционирования системы эксплуатации конкретного РТК по критерию минимума совокупной стоимости владения РТК и в итоге максимизации дохода от РТК при выполнении требований к целевым показателям качества его функционирования. В статье рассмотрены лишь основы подхода к оценке вклада СЭ в итоговую ССВ. Полное решение подобных задач требует проведения дальнейших исследований по оцениванию составляющих ССВ с детальным учетом структурного построения систем эксплуатации РТК и алгоритмов их функционирования, ограниченных возможностей СЭ по одновременному обслуживанию нескольких компонентов РТК и других особенностей организации эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипкин К. Т. Экономическая эффективность информационных систем. М.: ДМК-Пресс, 2002. 256 с.
2. Карпычев В. Ю. Управление совокупной стоимостью владения информационной системой: современное состояние и перспективы // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 8(107). С. 25—37.
3. Хубаев Г. Н., Родина О. В. Модели, методы и программный инструментарий оценки совокупной стоимости владения объектами длительного пользования (на примере программных систем). Ростов н/Д: РГЭУ (РИНХ), 2011. 336 с.
4. Борисов С. А., Плеханова А. Ф., Клименко О. Н. Особенности учета затрат на осуществление проектов в области информационных систем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2 [Электронный ресурс]: <<https://science-education.ru/ru/article/view?id=12655>>, 21.07.2022.
5. Ковалев А. П. Формирование требований к надежности и системам эксплуатации распределенных технических комплексов. СПб: Оракул, 1999. 96 с.
6. Зеленцов В. А., Ковалев А. П. Ресурсосберегающие технологии создания и эксплуатации сложных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 3.
7. Кокс Д. Р., Смит В. Л. Теория восстановления. М.: Сов. радио, 1967. 299 с.

8. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Организация обслуживания при ограниченной информации и надежности системы. М.: Сов. радио, 1975.
9. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов и др.; под ред. Б. В. Гнеденко. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Зеленцов** — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; гл. научный сотрудник; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Александр Павлович Ковалев** — д-р техн. наук, профессор; СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: kbarsenal@peterlink.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 30.09.2022.

REFERENCES

1. Skripkin K.T. *Ekonomicheskaya effektivnost' informatsionnykh system* (Economic Efficiency of Information Systems), Moscow, 2002, 256 p. (in Russ.)
2. Karpuchev V.Yu. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2015, no. 8(14), pp. 25–37. (in Russ.)
3. Khubaev G.N., Rodina O.V. *Modeli, metody i programmnyy instrumentariy otsenki sovokupnoy stoimosti vladeniya ob"yektami dlitel'nogo pol'zovaniya (na primere programmykh sistem)* (Models, Methods and Software Tools for Assessing the Total Cost of Ownership of Durable Objects (On the Example of Software Systems)), Rostov-on-Don, 2011, 336 p. (in Russ.)
4. Borisov S.A., Plekhanova A.F., Klimenko O.N. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 2, <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12655>. (in Russ.)
5. Kovalev A.P. *Formirovaniye trebovaniy k nadezhnosti i sistemam ekspluatatsii raspredelennykh tekhnicheskikh kompleksov* (Formation of Requirements for Reliability and Operation Systems of Distributed Technical Complexes), St. Petersburg, 1999, 96 p. (in Russ.)
6. Zelentsov V.A., Kovalev A.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2000, no. 3. (in Russ.)
7. Cox D.R. *Renewal Theory*, Netherlands, Springer, 1967, 142 p.
8. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. *Organizatsiya obsluzhivaniya pri ogranichennoy informatsii i nadezhnosti sistemy* (Service Organization with Limited Information and System Reliability) Moscow, 1975. (in Russ.)
9. Barzilovich E.Yu., Belyaev Yu.K., Kashtanov V.A. et al. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti* (Questions of the Mathematical Theory of Reliability), Moscow, 1983, 376 p. (in Russ.)

Data on authors

- Viacheslav A. Zelentsov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Chief Researcher; E-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
- Alexander P. Kovalev** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: kbarsenal@peterlink.ru

Received 18.07.2022; approved after reviewing 25.07.2022; accepted for publication 30.09.2022.