

УДК 519.216.3+519.718.2

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ЦИКЛА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Калинин Владимир Михайлович,**

*канд. техн. наук, доцент,*

*e-mail: vk1958@mail.ru,*

*Московский университет им. С.Ю. Витте, г. Москва,*

**Шамраева Виктория Викторовна,**

*канд. физ.-мат. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой математики и информатики,*

*e-mail: vshamraeva@muiiv.ru,*

*Московский университет им. С.Ю. Витте, г. Москва*

*Рассмотрена проблема эффективности управления восстановительным циклом сложной технической системы. В процессе эксплуатации сложных технических систем происходят отказы некоторых элементов, и ухудшается качество функционирования системы в целом. При этом характер затрат на обеспечение и восстановление качества функционирования систем является антагонистическим. Для каждой конкретной системы необходимо исследование взаимосвязи параметров восстановительного цикла и показателей качества ее функционирования во взаимосвязи с комплексным показателем экономической эффективности функционирования системы на всех этапах ее жизненного цикла.*

*В статье рассматриваются вопросы оценки и обеспечения эффективности управления восстановительным циклом сложных технических систем на примере гражданских зданий. Как известно, в жилищном хозяйстве, при постоянно растущих материальных затратах на техническую эксплуатацию зданий, качественный уровень качества их функционирования изменяется крайне незначительно. Предложено адаптировать и дополнить современный аппарат управления эффективностью восстановительным циклом сложных технических систем, разработанный для высокотехнологических отраслей народного хозяйства для эксплуатации гражданских зданий с учетом их особенностей, как непроизводственных систем, имеющих очень высокий социальный статус. Первоочередными дополнениями, определяющими эффективность управления восстановительным циклом гражданских зданий, предложено использовать следующие показатели: частоту (повторяемость) возникновения неблагоприятных ситуаций у пользователей зданиями и совокупность общественно значимых затрат на обеспечение качества функционирования здания в течение продолжительного времени. Предлагаемые дополнения обеспечивают теоретическое обоснование применяемых методов управления восстановительным циклом сложных систем, основанных на вероятностном анализе сложившихся методов технической эксплуатации зданий.*

**Ключевые слова:** эффективность, восстановительный цикл, стохастический процесс, остаточный ресурс, прогнозирование, управление, сложная техническая система

## PROBABILISTIC ANALYSIS OF CHARACTERISTICS RECOVERY CYCLE OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM

**Kalinin V.M.,**

*Ph.D., Associate Professor, PhD in Technical Sciences,*

*e-mail: vk1958@mail.ru,*

*Moscow Witte University,*

**Shamraeva V.V.,**

*Ph.D., Associate Professor, PhD in Physics and Mathematics,*

*e-mail: vshamraeva@muiiv.ru,*

*Moscow Witte University*

*The problem of the efficiency of the recovery cycle management of a complex technical system is considered. In the process of operation of complex technical systems, failures of some elements occur, and the quality of the system as a whole deteriorates. At the same time, the nature of the costs of ensuring and restoring the quality of functioning of systems is antagonistic. For each specific system, it is necessary to study the relationship between the parameters of the recovery cycle and the indicators of the quality of its functioning in relation to the complex indicator of the economic efficiency of the system at all stages of its life cycle.*

*The article deals with the evaluation and effectiveness of management of the recovery cycle of complex technical systems on the example of civil buildings. As it is known, in the housing sector, with constantly growing material expenditures for the technical operation of buildings, the quality level of their functioning changes very slightly. It is proposed to adapt and Supplement the modern efficiency management apparatus with the recovery cycle of complex technical systems, developed for high-tech sectors of the national economy for the operation of civil buildings, taking into account their features as non-productive systems with a very high social status. Priority additions, determining the effectiveness of management of the rehabilitation cycle of civil buildings, proposed to use indicators of frequency (repeatability) of adverse situations in users of buildings and a set of socially significant costs to ensure the quality of the functioning of the building for a long time. The proposed additions provide a theoretical basis for the applied methods of management of the recovery cycle of complex systems based on the probabilistic analysis of the existing methods of technical operation of buildings.*

**Keywords:** efficiency, recovery cycle, stochastic process, residual life, forecasting, operation management of complex technical system

DOI 10.21777/2500-2112-2019-1-64-74

## Введение

Исследование технико-экономической эффективности и безопасности сложных технических систем в нашей стране началось с публикации в 1969 г. монографии Р. Барлоу и Ф. Прошана «Математическая теория надежности» [1]. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах Е.Ю. Барзиловича, Ю.К. Беляева, Б.В. Гнеденко, И.Б. Герцбаха, В.А. Каштанова, Б.А. Козлова, Х.Б. Кордонского, Г.Г. Маньшина, И.А. Ушакова и многих других ученых.

Математический аппарат исследования эффективности и безопасности сложных технических систем в значительной мере базируется на вероятностном анализе характеристик восстановительного цикла системы. К настоящему времени разработан математический аппарат и методики его практического применения для различных отраслей народного хозяйства – авиации, электронной промышленности, энергетики и т.д. Практическое использование теории надёжности позволяет обеспечить требуемое качество сложных технических систем при их создании и использовании, а также минимизацию эксплуатационных издержек, возникающих в процессе их функционирования.

К сложным техническим системам относятся гражданские здания. Следует отметить, что доля основных фондов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) составляет более 26 % от общего объема экономики. Но в силу ряда обстоятельств, для эффективного управления ЖКХ аппарат теории надежности используется весьма ограниченно [12, 13, 17, 19] (упоминается в ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и МДС 41-6.2000 Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах Российской Федерации). В большей мере управление этой отраслью базируется на эмпирических методах. Теоретические разработки, всесторонне обосновывающие эффективность выполнения эксплуатационного процесса, к настоящему времени весьма немногочисленны и, в большинстве своем, затрагивают лишь отдельные аспекты рассматриваемого вопроса. Сложившаяся ситуация требует развития имеющихся разработок, пересмотра качественных и количественных показателей эффективности управления восстановительным циклом зданий, как сложных систем.

**Представление восстановительного цикла элементов сложной технической системы стохастическим процессом**

Под восстановительным циклом сложной технической системы будем понимать – стохастический процесс между двумя последовательными регенерациями. Представим восстановительный цикл следующим образом (рисунок 1). В случайные моменты времени  $z_1, z_2, \dots$ , определяемые стратегическим управлением, выполняется регенерация конструктивного элемента (оборудования) системы. Регенерация выполняется силами различных специализированных организаций, которые для краткости в дальнейшем будут именоваться операторами. В зависимости от выбранной стратегии в составе восстановительного цикла могут возникать те или иные эксплуатационные события (э.с.)  $Y(z)$ , описывающие поведение системы  $Z$  в течение этого цикла и позволяющие исчерпывающе представить поведение системы во времени (включая время ожидания начала восстановительных работ операторов и время их выполнения). Эксплуатационный процесс разбивается на отдельные, тождественные по содержанию фазы, определяемые отрезками времени между двумя последовательными моментами восстановления (регенерации).

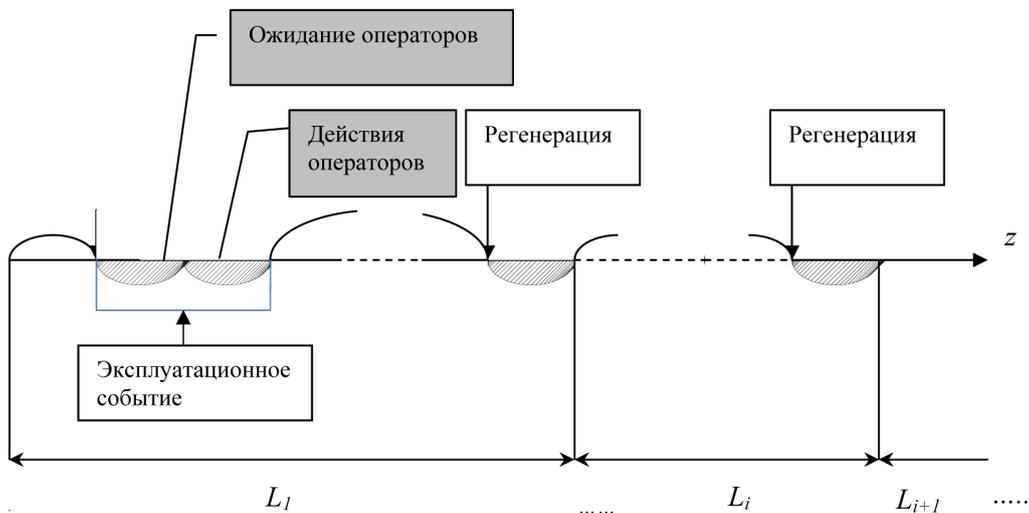


Рисунок 1 – Представление восстановительного цикла

Дефиниция всех эксплуатационных событий  $Y(z)$ , которые могут произойти в этом временном интервале, представляет собой стохастический процесс, описывающий поведение системы  $Z$  во времени [4]. Каждый конструктивный элемент или оборудование технической системы имеют конечную среднюю наработку, завершающуюся стационарным процессом восстановления, а деятельность операторов равномерно распределена на неограниченно большом временном периоде  $\dot{L} = \{L_i\}_{i=1}^{\infty}$  с вероятностями  $P = \{p_i\}_{i=1}^{\infty}$ ,  $p_i > 0$ . Обозначим через  $L = E\dot{L}$  – математическое ожидание случайной величины  $\dot{L}$  и тогда  $Z = \{L, [Y(z), 0 \leq z \leq L]\}$  – совокупность значений случайной величины  $L$ , определяющей длительность цикла регенерации, и случайного процесса  $Y(z)$ . Используя аппарат теории вероятностей [2, 7, 14], можно определить математическое ожидание числа э.с.  $Y(z)$  на заданном временном интервале. Исследования длительности восстановительного цикла и числа э.с. проводились для многих сложных систем. Например, если деятельность операторов равномерно распределена на счётном временном периоде времени, то в работах [15, 18] приведены результаты применительно к таким сложным системам как финансовые рынки, а в [10] к моделированию развития социально-экономических систем на примере финансовых потоков.

**Эффективность управления восстановительным циклом**

Представление восстановительного цикла стохастическим процессом позволяет сделать временные оценки продолжительности каждого э.с.  $Y(z)$ , поскольку при планировании обязательно

назначается момент времени начала выполнения эксплуатационных действий. Назначение операторских действий может быть незамедлительным, т.е. практически сразу после возникновения э.с.  $Y(z)$ , или приуроченным к какому-то другому планируемому э.с. (например, к очередной технической экспертизе или планово-профилактическому ремонту). В первом случае продолжительность э.с. определяется только оперативностью эксплуатационной службы. Если момент начала операторских действий предопределен какими-либо другими факторами, то к оперативности следует прибавить продолжительность развития э.с. со случайного момента его возникновения. В зависимости от назначенных условий регенерации длительность восстановительного цикла может быть постоянной (при строго периодической регенерации) и случайной (при регенерации, связанной с возникновением какого-либо э.с.).

Традиционно, при анализе эффективности эксплуатации сложных технических систем, качество эксплуатации определяется следующими показателями – коэффициентом готовности и коэффициентом оперативной готовности. Применительно к элементам здания, как сложной технической системы, рассмотренные показатели имеют несколько ограниченные возможности [5, 16]. Это связано с тем, что средняя наработка на отказ любого элемента здания на порядки больше времени его восстановления. Значение коэффициента готовности в этом случае близко к единице и, даже значительные изменения стратегии эксплуатации, приводят к очень незначительным для восприятия изменениям. Коэффициент оперативной готовности предполагает прогнозируемую безотказность элемента на каком-то интервале времени, необходимом для выполнения системой своей задачи. Но, большинство элементов здания, находится в состоянии непрерывного выполнения своих функций. Поэтому показатель оперативной готовности для них не актуален. Анализ взаимоотношений операторов и пользователей здания показал, что наиболее существенными в них являются повторяемость нежелательных для пользователей нарушений при функционировании здания (которые вызываются отказами элементов) и быстрота устранения этих нарушений, а также совокупность материальных затрат, связанных с возникновением или предупреждением отказов. Таким образом, эффективность управления восстановительными циклами, в первую очередь должна определяться повторяемостью неблагоприятных для пользователей эксплуатационных ситуаций, количественно определяемой частотой отказов. Частота отказов – это отношение случайного числа отказов, возникающих на рассматриваемом интервале времени к длительности этого интервала.

Математическое ожидание числа событий, связанных с возникновением отказов и их предупреждением в произвольном интервале времени  $Z_i \in [z_i; z_{i+1}]$ ,  $i=1,2,\dots$  зависит от продолжительности рассматриваемого периода, а также от выбранной стратегии восстановления. В простейшем случае, когда регенерация системы предусматривается только в фиксированный момент времени  $z_{\text{вос}}$  (например, по результатам технической экспертизы), число отказов за период регенерации равно единице.

Длительность восстановительного цикла зависит от применяемой стратегии управления, т.е. от условий назначения и параметров регенерации системы. Для рассматриваемой сложной технической системы можно использовать приведенные в [6, 3, 11] варианты стратегий восстановительного цикла (рисунок 2). Соответствующие им длительности восстановительного цикла приведены ниже (таблица 1). Математическое ожидание числа отказов, возникающих при использовании каждой из приведенных стратегий, определяется индивидуально. Например, если в период регенерации предусмотрено проведение минимальных восстановлений, то математическое ожидание числа отказов за цикл регенерации  $Z_t$  равно так называемой накопленной интенсивности отказов  $\Lambda_{\text{аб}}(Z_t)$ . На основании анализа статистических данных можно предложить для ориентировочных расчетов использовать закон Вейбулла с параметром  $\beta = 2$ . В этом случае  $\Lambda_{\text{аб}}(Z_t)$  определяется следующим образом [6]:

$$I_{\text{аб}}^{\text{мин}} = \Lambda_{\text{аб}}(Z_t) = \int_0^{Z_t} \lambda(z) dz = \int_0^{Z_t} 2\alpha^2 z dz = \alpha^2 Z_t^2 \cong 0.79 \frac{Z_t^2}{Z_{\text{сп}}^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda(z)$  – интенсивность отказов;

$Z_{\text{сп}}$  – средний срок службы элемента.

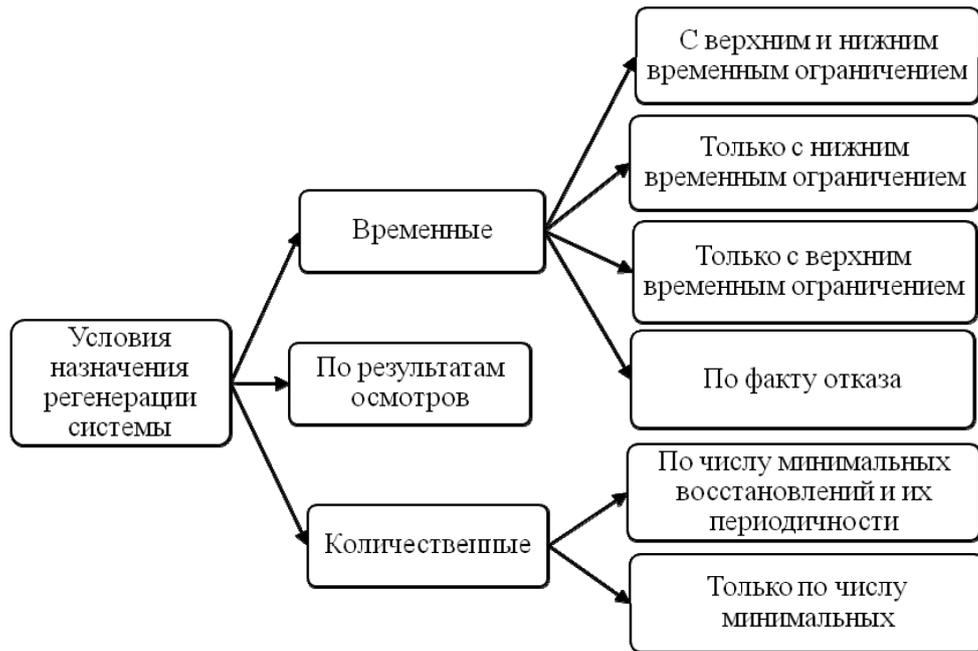


Рисунок 2 – Типовые варианты условий регенерации сложного объекта

Таблица 1 – Длительности восстановительного цикла для типовых стратегий

№	Типовые стратегии назначения регенерации системы	Длительность восстановительного цикла
1	Элемент восстанавливается в заранее запланированный момент времени $Z_{вр}$ , но не раньше некоторого «нижнего временного порога» $Z_{нр}$	$Z_{нр} + \int_0^{Z_{вр}} \frac{P(Z_{нр} + z)}{P(Z_{нр})} dz$
2	Элемент восстанавливается в заранее запланированный момент времени ( $Z_{вр}$ ). Если отказ элемента происходит до назначенного срока, выполняется аварийное восстановление, а срок очередного планового ремонта переносится	$\int_0^{Z_{вр}} P(z) dz$
3	Элемент восстанавливается по факту отказа, но не раньше некоторого «нижнего временного порога» $Z_{нр}$	$Z_{нр} + \int_0^{\infty} \frac{P(Z_{нр} + z)}{P(Z_{нр})} dz$
4	Регенерация элемента выполняется только по факту отказа	$\int_0^{\infty} P(z) dz$
5	Восстановление элемента проводится только в том случае, если его отказ обнаружен во время очередного планового осмотра, при котором проводятся диагностики технического состояния этого элемента. Осмотры проводятся строго периодически с интервалов времени $z$	$\sum_{k=0}^{\infty} \int_{z_k}^{z_{k+1}} (z_{k+1} - z) dF(z)$
6	Первые $k-1$ отказов элемента устраняются только путем восстановления его работоспособности (без изменения вероятности его безотказной работы). При $k$ -м отказе проводится регенерация элемента	$\sum_{k=1}^n \int_0^{\infty} \frac{(\Lambda(z))^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\Lambda(z)} dz$

Если предусматривается регенерация системы при проведении аварийного ремонта, число отказов в рассматриваемом временном интервале определяется из решения, так называемого основного уравнения восстановления [6]:

$$H(Z_t) = F(Z_t) + \int_0^{Z_t} H(Z_t - z) dF(z) \tag{2}$$

где  $H(Z_t)$  – число полных восстановлений за период  $Z_t$ .

Решение приведенных уравнений (1)-(2) весьма затруднительно и вряд ли будет проводиться на практике технической эксплуатации зданий. Чтобы сделать расчеты доступными предлагается создать унифицированную форму в виде таблиц (или графиков), в которой приводятся относительные значения частоты возникновения эксплуатационных событий для всех возможных стратегий технической эксплуатации элементов здания. Для этого в лабораторных условиях выполняется расчет искомых показателей в зависимости от отношения всего разумного диапазона возможных сроков (или периодов) назначения выполнения эксплуатационных мероприятий к средней наработке элемента на отказ. Пример унификации для стратегии ремонтов, предусматривающей только строго периодическое полное восстановление (2), приведен в таблице 2 [8].

Таблица 2 – Зависимость ожидаемого числа полных восстановлений от соотношения среднего срока службы и длительности рассматриваемого периода

Соотношение $Z_t/Z_{cp}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$H(Z_t)$	0,031	0,121	0,263	0,449	0,674	0,933	1,227	1,555	1,922	2,321
Значение функции наработки на отказ	0,031	0,118	0,246	0,395	0,544	0,677	0,785	0,866	0,922	0,957
Соотношение $Z_t/Z_{cp}$	2,2	2,5	2,7	3	3,2	3,5	3,7	4	4,5	5
$H(Z_t)$	2,767	3,455	4,004	4,632	4,921	5,211	5,212	5,22	5,32	5,92
Значение функции наработки на отказ	0,978	0,993	0,997	0,999	1	1	1	1	1	1

На практике лицо, выбирающее оптимальный межремонтный период, на основании нормативных данных или экспертных оценок определяет среднюю наработку элемента  $Z_{cp}$ . Затем, исходя из поставленной перед ним задачи, назначает периодичность выполнения эксплуатационного мероприятия  $Z_t$ . Далее берет отношение  $Z_t/Z_{cp}$  и по таблице находит относительное значение числа полных восстановлений или других, интересующих его показателей. Умножая найденное значение на значение средней наработки получается фактическое значение интересующего его параметра.

Частота отказов обязательно должна нормироваться. Если речь идет о безопасности пользования зданием, то значение накопленной интенсивности отказов следует принимать не больше  $10^{-6}$ . В остальных случаях должен быть проведен технико-экономический анализ последствий отказов.

Суммарное значение частот возникновения э.с. определяет частоту обращений к операторам, а также трудоемкость всех эксплуатационных мероприятий. Поскольку возможности операторов не безграничны, то время ожидания (и, соответственно оперативность выполнения) начала выполнения любого эксплуатационного мероприятия от объема поступающих к операторам требований на выполнение работ, связанных с э.с., и внутренней собственной организации (производительности операторов, дисциплины обслуживания требований и т.д.). Объем требований, поступающих операторам, складывается из плановых мероприятий по регенерации системы и операторских действий при возникновении каких-либо э.с. Оба слагаемых предопределяются при стратегическом управлении, а именно, частотой проведения плановых восстановлений оборудования и частотой возникновения и сущностью эксплуатационных ситуаций в восстановительном цикле. Таким образом, эргономические свойства объекта обуславливают прямое и опосредственное влияние планирования на продолжительность отклонения социальных и экологических параметров системы от регламентированных значений. Прямое влияние реализуется через запрограммированное время от случайного момента возникновения э.с. до планируемого срока его завершения, а косвенное – изменением оперативности эксплуатационной службы (рисунок 3).

### Экономическая эффективность управления восстановительным циклом сложной системы

Экономическая эффективность технической эксплуатации для большинства сложных технических систем определяется интенсивностью эксплуатационных затрат – отношением суммарных затрат, связанных с ремонтами системы за определенный промежуток времени, и издержек, связанных с ее неисправным состоянием к продолжительности этого периода. Общественно значимыми экономически-

ми затратами в восстановительном цикле являются: 1) затраты, связанных с проведением регенерации сложной системы; 2) потери ресурсов при возникновении неисправностей в системе; 3) издержки на восстановление работоспособности системы в аварийном порядке. Количественные значения единовременных и удельных материальных затрат, сопутствующих каждому эксплуатационному событию, могут быть определены из нормативных источников или по статистическим данным. Материальные издержки, вызванные развитием эксплуатационного события во времени, могут определяться как произведение продолжительности эксплуатационного события и связанных с ним удельных материальных затрат. Тогда интенсивность материальных (трудовых) затрат  $\bar{C}(\bar{R})$  может быть определена как отношение всей совокупности затрат к длительности восстановительного цикла  $Z_{\text{вц}}$  [20]:

$$\bar{C}(\bar{R}) = \frac{\sum_{i=1}^N C_i^3(R_i) + \sum_{j=1}^M C_j^и \cdot Z_j(0)}{Z_{\text{вц}}} \quad (3)$$

где  $C_i^3(R_i)$  – единовременные материальные (трудовые) затраты, связанные с проведением  $i$ -го эксплуатационного мероприятия;

$C_j^и$  – удельные материальные затраты (издержки в единицу времени), связанные с  $j$ -м неисправным состоянием или простоем элемента;

$Z_j$  – продолжительность  $j$ -го неисправного состояния или простоя;

$N$  – число эксплуатационных мероприятий всех типов за время восстановительного цикла;

$M$  – количество простоев и неисправных состояний элемента в течение восстановительного цикла.

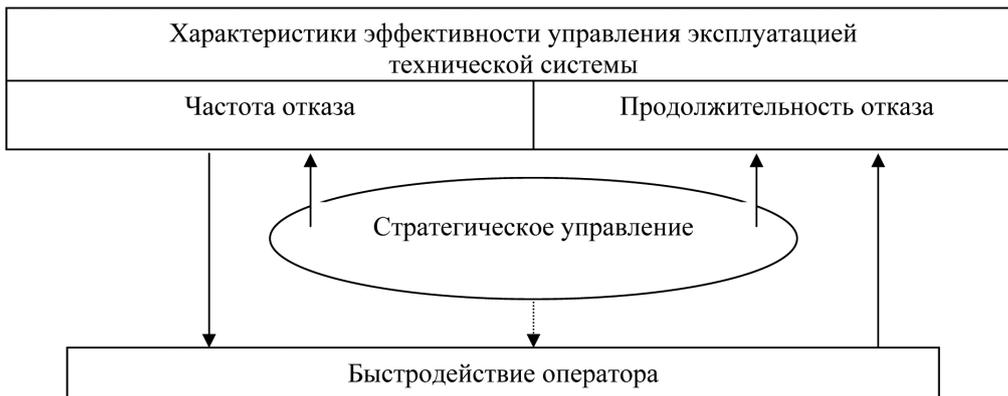


Рисунок 3 – Схема прямого и опосредственного влияния стратегического управления на характеристики эффективности управления эксплуатацией технической системы

Выше был рассмотрен подход к оценке экономической эффективности технической эксплуатации большинства сложных систем. Специфической особенностью здания как сложной системы является некоторая неопределенность в понятии отказ элемента. Например, для несущих конструкций регламентировано четыре варианта их технического состояния, один из которых является исправным, а остальные нежелательными. При этом, находясь в любом из состояний (кроме четвертого – аварийного) допускается при определенных ограничениях дальнейшая эксплуатация элемента. Рассмотренная неопределенность является причиной критического отношения к широко распространенной стратегии эксплуатации, называемой системой планово-предупредительных ремонтов (ППР). Системой ППР предусматривается строго периодическое проведение ремонтов. По достижению назначенного срока, независимо от эксплуатационных событий, возникших в межремонтный период, предполагается выполнять полное восстановление оборудования. В этом случае длительность восстановительного цикла равна назначенному межремонтному периоду  $Z_{\text{пр}}$ , а наработка оборудования не будет превышать этого значения. Основным недостатком подобного подхода является то, что возможны ситуации, когда элемент технической системы заменяется, несмотря на то, что он далеко не полностью исчерпал свой

ресурс. Таким образом, системное обоснование плановых мероприятий технической эксплуатации элементов требует включения в оценку экономической эффективности понятия затраты, связанные с неполным использованием ресурса элементов здания при их плановой замене. Для решения этой проблемы предлагается следующий подход.

При достижении объектом определенного возраста, обычно коррелированного с каким-либо эксплуатационным событием, необходимо оценить ожидаемое дальнейшее время его безотказной работы, а также количественные показатели, влияющие на качество среды обитания. В первую очередь подобные оценки требуются при назначении периодичности выполнения плановых ремонтно-восстановительных работ, когда желательно максимально полностью использовать возможности элементов здания [5]. Кроме того, при выполнении планово-предупредительных ремонтов технологической группы оборудования, остаточный ресурс является критерием выбраковки элементов. При устранении неисправностей аварийного характера остаточный ресурс является одним из определяющих факторов для определения степени восстановления – минимальное восстановление или замена оборудования.

Другое обстоятельство, требующее определение остаточного ресурса, связано с экономическим обоснованием проведения эксплуатационных мероприятий. Проблема заключается в том, что до настоящего времени, при очевидной значимости, экономический аспект остаточного ресурса не является обосновывающим аргументом выполнения замены оборудования.

До сих пор распространена точка зрения, что изменение первоначальной стоимости оборудования, вызванное износом, происходит согласно формуле [9]:

$$C_{\text{рес}} = C_{\text{нач}} - \Delta C_{\text{нач}} \times z,$$

где  $C_{\text{нач}}$  – первоначальная стоимость объекта;

$\Delta C_{\text{нач}} = C_{\text{нач}} / Z_{\text{норм}}$ ;  $Z_{\text{норм}}$  – нормативный срок службы объекта;

$z$  – время эксплуатации объекта.

В соответствии с приведенной выше формулой, при достижении объектом возраста, равного нормативному сроку службы, его стоимость равна нулю. А при превышении этого возраста результаты расчетов по формуле становятся некорректными, поскольку принимают отрицательное значение.

Однако на практике широко распространены случаи, когда время эксплуатации оборудования достигает и превышает нормативный срок службы и, при этом, оборудование остается в исправном состоянии и выполняет свои функции. Это явление позволяет предположить, что оборудование, независимо от возраста, обладает некоторой остаточной стоимостью  $C_{\text{ост}}$ , которая изменяется пропорционально наработке. Таким образом, мы приходим к такому предложению:

**Предложение 1.** Остаточная стоимость оборудования может быть вычислена следующим образом:

$$C_{\text{ост}} = C_{\text{нач}} \frac{Z_{\text{ост}}}{Z_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где  $Z_{\text{ост}}$  и  $Z_{\text{ср}}$  – соответственно остаточный и средний сроки службы оборудования.

Использование остаточного ресурса оборудования приводит к переносу срока его вывода из состава системы и, соответственно, моменту установки нового оборудования. Таким образом, возникает «отсрочка» в необходимости вложения материальных средств, связанных с установкой нового оборудования, которая экономически может быть оценена следующим образом. Известно, что перспективные материальные вложения, которыми являются затраты на замену оборудования (приведённые затраты)  $C(Z_{\text{нач}})$ , преобразуются к моменту времени, с которого осуществляется анализ, по следующей формуле [9, 21]:

$$C(Z_{\text{нач}}) = \frac{C(Z_{\text{расч}})}{(1 + v)^{Z_{\text{расч}}}},$$

где  $C(Z_{\text{расч}})$  – средства, выделяемые в расчетный момент времени  $Z_{\text{расч}}$ ;

$v$  – процентная ставка, определяемая, например, Центральным Банком Российской Федерации.

Предположим, что плановая замена оборудования намечается на момент времени  $Z_{\text{пл}}$  (рисунок 4). Если к назначенному моменту времени не произошел отказ, то, соответственно имеется некоторый остаточный ресурс оборудования  $Z_{\text{ост}}$ . Пусть имеется возможность продолжить эксплуатацию оборудо-

вания до истощения ресурса. Тогда затраты на восстановление оборудования, приведенные к первоначально назначенному моменту планового ремонта, будут составлять:

$$C_{\text{восст.}}(Z_{\text{пл}}) = \frac{C_{\text{расч}}^{\text{восст}}}{(1 + \nu)^{Z_{\text{ост}}}}$$

где  $C_{\text{расч}}^{\text{восст}}$  – сметная стоимость замены оборудования.

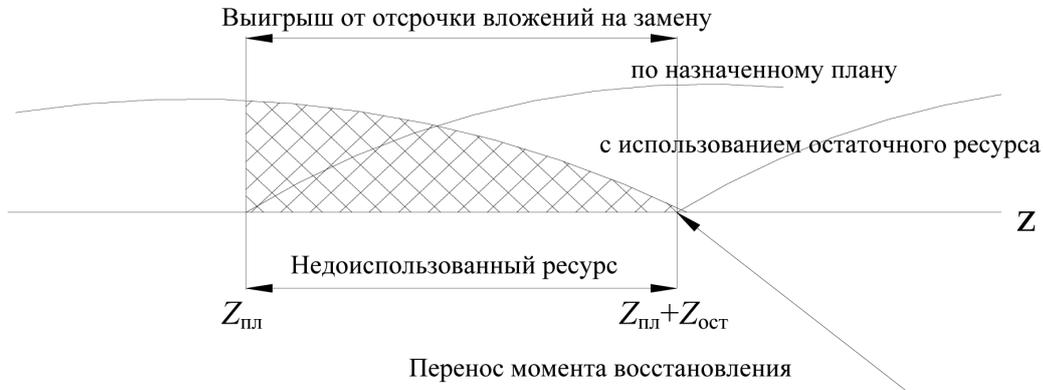


Рисунок 4 – Представление зависимостей неиспользованного ресурса и выигрыша в капитальных вложениях от остаточного ресурса объекта

Экономический выигрыш от переноса срока восстановления составит:

$$\Theta = C_{\text{расч}}^{\text{восст}} \left( 1 - \frac{1}{(1 + \nu)^{Z_{\text{ост}}}} \right) \quad (5)$$

С учетом формул (4) и (5) можно посчитать общий экономический эффект (или издержки при неиспользовании) остаточного ресурса оборудования. Итак, имеем:

**Предложение 2.** Издержки при неиспользовании остаточного ресурса оборудования могут быть вычислены следующим образом:

$$C_{\text{рес}} = C_{\text{обор}} \frac{Z_{\text{ост}}}{Z_{\text{ср}}} + C_{\text{расч}}^{\text{восст}} \left( 1 - \frac{1}{(1 + \nu)^{Z_{\text{ост}}}} \right),$$

где  $C_{\text{обор}}$  – сметная стоимость оборудования.

**Предложение 3.** Формула вычисления интенсивности эксплуатационных затрат (3) эквивалентна следующей:

$$\bar{C}(\bar{R}) = \frac{\sum_{i=1}^N C_i^3(R_i) + \sum_{j=1}^N C_j^I \cdot Z_j(0) + C_{\text{рес}}}{Z_{\text{вц}}}.$$

### Заключение

В статье проведено теоретическое обоснование эффективности планирования основных эксплуатационных мероприятий-ремонтов, технического обслуживания и технической диагностики зданий как сложных систем с учетом их специфики. Предложены формулы для вычисления остаточной стоимости оборудования, расчёта общего экономического эффекта и интенсивности эксплуатационных затрат.

### Список литературы

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М.: Радио и связь, 1969.
2. Вентцель А.Д., Овчаров Л.А. Курс теории случайных процессов и ее инженерных приложения. – М.: Наука, 1991.

3. Герцбах И. Теория надежности с приложениями к профилактическому обслуживанию. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГТУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003.
4. Калинин В.М., Сокова С.Д. Оценка технического состояния зданий. – М.: ИНФРА-М, 2016.
5. Калинин В.М. Оценка эффективности эксплуатации внутриквартальных инженерных систем. / В.М. Калинин, В.Н. Исаев // Сантехника. – 2004. – № 2. – С. 36–42.
6. Каштанов В.А. Общие принципы постановки и решения проблемы технического обслуживания сложных систем // Надежность. – 2002. – № 2. – С. 47–56.
7. Купер Дш. Макгиллен С. Вероятностные методы анализа систем. – М.: Радио и связь, 1990.
8. Надежность в технике: Справочник Т8: Эксплуатация и ремонт. – М.: Машиностроение 1990.
9. Новая экономическая энциклопедия / Румянцева Е.Е. – 4-е изд. – М.: ИНФРА-М Издательский Дом, 2016. – 882 с.
10. Пителинский К.В., Шамраева В.В., Киселёв А.В. Вопросы применения фрактального подхода к моделированию развития социально-экономических систем на примере финансовых потоков. Устойчивое развитие: общество, экология, экономика: материалы XV международной научной конференции; в 4-х ч./ под ред. А.В. Семёнова, Н.Г. Малышева. – М.: изд. МУ им. С. Ю. Витте, 2019. – Ч. 2. – С. 189–196.
11. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
12. Порывай Г.А. Организация, планирование и управление эксплуатацией зданий. – М.: Стройиздат, 1984.
13. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. – М.: ЦНИИПромзданий, 2001.
14. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 276 с.
15. Shamraeva V. Some class of the interpolating martingale measures on a countable probability space. Global and Stochastic Analysis. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 121–127.
16. Труханов В.М., Матвеевко А.М. Надежность сложных систем на всех этапах жизненного цикла. – М.: ООО ИД «Спектр», 2012.
17. Указания по повышению надежности систем коммунального теплоснабжения – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 2008.
18. Шамраева В.В., Цветкова И.В. Бесконечномерная задача оптимизации при исследовании финансового рынка со счётным числом состояний. В книге: Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование тезисы докладов международной научной конференции. Южный математический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук и Правительства Республики Северная Осетия-Алания. – 2011. – С. 179–180.
19. Шубин Л.Ф. (ред.) Примеры расчетов по организации и управлению эксплуатацией зданий. – М.: Стройиздат, 1991.
20. Эдельман В.И. Надежность технических систем: Экономическая оценка. – М.: Экономика, 1989.
21. Юркова Т.И., Юрков С.В. Экономика предприятия. – 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aup.ru/books/m88/> (дата обращения: 18.03.2019).

### References

1. Barlou R., Proshan F. Matematicheskaya teoriya nadezhnosti. – М.: Radio i svyaz', 1969.
2. Ventcel' A.D., Ovcharov L.A. Kurs teorii sluchajnyh processov i ee inzhenernyh prilozheniya. – М.: Nauka, 1991.
3. Gercbah I. Teoriya nadezhnosti s prilozheniyami k profilakticheskomu obsluzhivaniyu. – М.: GUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGTU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2003.
4. Kalinin V.M., Sokova S.D. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy. – М.: INFRA-M, 2016.
5. Kalinin V.M. Ocenka effektivnosti ekspluatatsii vnutrikvartal'nyh inzhenernyh sistem. / V.M. Kalinin, V.N. Isaev // Santekhnika. – 2004. – № 2. – S. 36–42.
6. Kashtanov V.A. Obshchie principy postanovki i resheniya problemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnyh sistem / V.A. Kashtanov // Nadezhnost'. – 2002. – № 2. – S. 47–56.
7. Kuper Dsh. Makgilllen S. Veroyatnostnye metody analiza sistem. – М.: Radio i svyaz', 1990.

8. Nadezhnost' v tekhnike: Spravochnik T8: Eksplyuatsiya i remont. – M.: Mashinostroenie 1990.
9. Novaya ekonomicheskaya enciklopediya / Rumyancheva E.E. – 4-e izd. – M.: INFRA-M Izdatel'skij Dom, 2016. – 882 s.
10. Pitelinskij K.V., Shamraeva V.V., Kiselyov A.V. Voprosy primeneniya fraktal'nogo podhoda k modelirovaniyu razvitiya social'no-ekonomicheskikh sistem na primere finansovykh potokov. Ustojchivoe razvitie: obshchestvo, ekologiya, ekonomika: materialy XV mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii; v 4-h ch. / pod red. A.V. Semyonova, N.G. Malysheva. – M.: izd. MU im. S.Yu. Vitte, 2019. – Ch. 2. – S. 189–196.
11. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti. – SPb.: BHV-Peterburg, 2006.
12. Poryvaj G.A. Organizatsiya, planirovanie i upravlenie eksplyuatsiej zdaniy. – M.: Strojizdat, 1984.
13. Rekomendatsii po ocenke nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij zdaniy i sooruzhenij po vneshnim priznakam. – M.: CNIIPromzdaniy, 2001.
14. Ryabinin I.A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem. – SPb.: Politekhnik, 2000. – 276 s.
15. Shamraeva V. Some class of the interpolating martingale measures on a countable probability space. Global and Stochastic Analysis. – 2018. – T. 5. – № 2. – S. 121–127.
16. Truhanov V.M., Matveenko A.M. Nadezhnost' slozhnykh sistem na vsekh etapah zhiznennogo cikla. – M.: OOO ID «Spektr», 2012.
17. Ukazaniya po povysheniyu nadezhnosti sistem kommunal'nogo teplosnabzheniya. – M.: AKKH im. K.D. Pamfilova, 2008.
18. Shamraeva V.V., Cvetkova I.V. Beskonechnomernaya zadacha optimizatsii pri issledovanii finansovogo rynka so schyotnym chislom sostoyaniy. V knige: Teoriya operatorov, kompleksnyy analiz i matematicheskoe modelirovanie tezisy dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Yuzhnyy matematicheskij institut Vladikavkazskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk i Pravitel'stva Respubliki Severnaya Osetiya-Alaniya. – 2011. – S. 179–180.
19. Shubin L.F. (red.) Primery raschetov po organizatsii i upravleniyu eksplyuatsiej zdaniy. – M. Strojizdat, 1991.
20. Edel'man V.I. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: Ekonomicheskaya ocenka. – M.: Ekonomika, 1989.
21. Yurkova T.I., Yurkov S.V. Ekonomika predpriyatiya. – 2006. [Electronic resource]. URL: <http://www.aup.ru/books/m88/> (date accessed: 18.03.2019).