

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87

***Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

*E-mail: n-savvin@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Аннотация. Рассматривается проблема оценки надежности функционирования инженерных систем зданий с использованием методов теории массового обслуживания и теории марковских процессов. Предложена математическая модель, позволяющая анализировать показатели эффективности работы различных инженерных систем, включая системы водо-, тепло- и электроснабжения, а также системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Модель основана на определении вероятностных характеристик отказов и восстановлений компонентов систем, а также на расчете норм затрат, связанных с обеспечением нормального функционирования. Особое внимание уделено вопросам повышения энергоэффективности и снижения экономических потерь при авариях и поломках инженерных систем. Приведены практические рекомендации по снижению рисков и повышению устойчивости функционирования инфраструктурных систем зданий. Проведен сравнительный анализ отечественных аналогов программного обеспечения для управления информацией о зданиях (BIM-технологии), выявлены перспективные направления развития информационных моделей инженерных систем. Результаты исследований позволяют оптимизировать процессы планирования, проектирования и эксплуатации современных зданий и сооружений. Обоснованы подходы к выбору оптимальной стратегии технического обслуживания и модернизации инженерных систем на протяжении всего жизненного цикла здания. Исследование ориентировано на инженеров-проектировщиков, строителей и специалистов, занимающихся управлением объектами недвижимости.

Ключевые слова: надежность, инженерные системы, вероятность отказа, моделирование, экономические затраты, жизненный цикл, информационные модели

Введение. Эффективность эксплуатации инженерных систем зданий существенно зависит от своевременного выявления неисправностей и предотвращения аварийных ситуаций. Современные методы диагностики и мониторинга требуют внедрения новых подходов к оценке надежности и долговечности технических систем [1-3]. Данная статья посвящена разработке математической модели для расчета показателей надежности инженерных систем с учетом особенностей их функционирования и возможных сбоев. Цель исследования - создание универсального метода анализа, позволяющего оптимизировать техническое обслуживание и снизить экономические риски, связанные с выходом систем из строя.

В статье [4] проанализирована структура контроля совокупностью насосных агрегатов определенной системы водоотведения, используя регулятор в основе которого лежит нечеткая логика с применением TSK-модели. Создана математическая модель и сделана имитация моделирования системы регулирования агрегатами. Итоги такого моделирования доказывают, что система способна решить задачу, давая при этом возможность практичного поддержания уровня воды в сосудах в рамках установленных пределов.

В работе [5] были проведены эксперименты, на основании которых сделан вывод о том, что

использование автоматики в системах отопления сокращает расходы, которые идут на теплоснабжение здания, а также увеличивают комфортную среду помещений.

В статье [6] установлено, что используя модуль MagiCAD предоставляется возможность за короткий срок создать чертежи вентиляционных систем. Также сокращается срок черчения инженерных систем и устранения ошибок. Предоставляется возможность сделать необходимые аэродинамические расчеты.

В рамках исследования [7] создана информационная модель функции которой заключаются в управлении вентиляционными системами больших промышленных комплексов. В основе лежит прямое газодинамическое моделирование. В статье также рассмотрена модель информационной системы, предназначенная для численного моделирования движения воздушной среды на большой промышленном здании. Эта модель позволяет решить задачи связанные с проектированием системы вентиляции. Создание инженерной системы основано на модульном принципе.

В работе [8] сделаны следующие выводы: в процессе проектирования любой инженерной сети в BIM - платформах нужно периодически проверять на пересечения, с целью недопущения появления коллизий; специалисты каждого раздела, создавая модель своего блока, обязаны

брать в учёт последующую работу других специалистов и сохранять пустое пространство для других разделов; на стадии выполнения работ по монтажу системы нужно руководствоваться поддержкой ВМ-отдела.

В статье [9] выявлено для чего создаётся интегрированная система ВМ ГИС. Рассмотрены отечественные аналоги ПО. Рассмотрены технологии необходимые для того чтобы осуществлять управление данными ВМ объектов инфраструктуры. Исследовано развитие информационных моделей, которые используются для создания цифровых двойников для контролирования всего жизненного цикла инженерных систем водоснабжения и водоотведения.

Авторами статьи [10] опираясь на информационное моделирование проанализировано создание автоматизированного инструмента для формирования схем и графиков для расчёта, а также перечня материалов необходимых для систем водоснабжения и водоотведения. Рассмотрен процесс создания и программирования модуля для расчёта постоянного потребления воды. Полученное автоматизированное решение, даёт возможность специалистам в короткие сроки рассчитать показатели чертежа.

Материалы и методы. Описание жизненного цикла инженерных систем может быть осуществлено марковским процессом с непрерывным временем, т.к. параметры «прошлого», от которых зависит «будущее», могут быть приняты как «настоящее». Система, находясь в j -ом состоянии, с течением времени в непрерывный момент времени может перейти в заранее нефиксированное j -состояние. Переход системы из одного состояния в другое зависит от ряда факторов, в основном, от интенсивности отказа $\lambda(t)$ и восстановления $\mu(t)$. Как известно, интенсивность отказа зависит от вероятности безотказности системы, которая, в свою очередь, зависит от параметров конструкции. Переход в случайные моменты времени из состояния безотказности в отказное и, наоборот, как последовательное однородное событие, называется потоком событий, который выражается интенсивностью $\lambda(t)$ [11-15].

При длительном времени эксплуатации в системе устанавливается предельный стационарный режим, в ходе которого система случайным образом меняет свои состояния, но их вероятности «уже» не зависят от времени.

Имея в своем распоряжении интенсивности переходов, можно составить и решить уравнение Колмогорова [16], особого вида дифференциальные уравнения, в которых неизвестными являются вероятности состояний системы в определенные моменты времени.

В случае, когда вероятности состояний и их производные равны нулю, то дифференциальное уравнение Колмогорова преобразуется к линейным алгебраическим уравнениям, решениями которых является финальная вероятность состояний. Знание характеристик финальных вероятностей может помочь оценить среднюю эффективность работы системы. При этом возникает вопрос об оптимизации решения, т. е. о выборе путем регулирования оптимальных значений интенсивности переходов.

Регулирование процесса перехода с целью улучшения показателя качества системы входит в задачу марковского процесса принятия решений. Известный метод Ховарда [17] не позволяет решать задачи такого характера, в связи с чем используется итерационный алгоритм параметрических марковских PL-моделей, предложенной в работах [18].

Основная часть. Пусть рассматриваемая стержневая система с n -элементов - $x_u, v = \overline{1, n}$, время от времени выходит из строя и в последующем восстанавливается. В произвольный момент времени каждый элемент $x_u (v = \overline{1, n})$ может находиться в одном из двух состояний: рабочее (состояние 0) и отказное (состояние 1), кроме невозможного (состояние Φ). В конкретный момент времени возможно одно из двух состояний – множество, которое может быть определено следующим образом:

$$S = \frac{S_i}{S_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), x_u^i} \quad (1)$$

Предполагается, что элементы инженерных систем периодически раз в год ремонтируются (восстанавливаются), этот промежуток времени выбирается так, что за Δt время может произойти только одно событие. Каждый элемент x_u характеризуется двумя постоянными величинами λ_u и μ_u со следующими свойствами. Если в момент времени t элемент находится в рабочем состоянии, то вероятность того, что он требует ремонта до момента $t + \Delta t$ равняется $\lambda_u \Delta t$.

Наоборот, когда элемент x_u находится на ремонте, вероятность того, что время ремонта окончится до момента $t + \Delta t$ элемент вернется в рабочее состояние, равняется $\mu_u \Delta t$. Можно отметить, что если τ_u - среднее время безотказной работы u -го элемента, а ρ - среднее время ремонта, то:

$$\lambda_u = \frac{1}{\tau_u}, \quad (2)$$

$$\mu_u = \frac{1}{\rho_u}, \quad (3)$$

$$u = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Предполагается, что переходы системы из одного состояния в другое связаны с возможными затратами на потери несущей способности и на восстановление (расход) и, наоборот, отдачи от эксплуатации системы в безотказном состоянии (доход).

Пусть система находится на S_i -м состоянии и один из работающих элементов отказывает или наоборот отказанный элемент восстанавливается. Тогда система переходит в некоторое другое состояние S_j , которое назовем соседним к состоянию и обозначим следующим образом:

$$e_u = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0),$$

где n - мерный единичный координатный вектор, у которого u -я координата равна 1, остальные равны нулю. $u \in N = \{1, 2, \dots, n\}$. Если учесть 1, то для соседних состояний справедливо одно из следующих равенств:

$$S_i - S_j = \pm e_u. \quad (5)$$

В этих обозначениях элементы матрицы перехода, описывающие состояние системы, определяются как:

$$BA = \|a_{ij}\|. \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} \lambda_u & \text{если } S_i - S_j = -e_u \\ \mu_u & \text{если } S_i - S_j = e_u \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad a_{ij} = \sum_{j=1}^{2^{n-m}} a_{ij}, \quad (7)$$

где n - количество состояний; m - количество невозможных состояний.

Предположим, что в любой момент времени, когда система находится в некотором состоянии $S_i \in S$ и способствует получению «дохода» или наоборот требует затрат, если элементы в состоянии отказа. Пусть элемент x_u находится в рабочем состоянии и за Δt период времени дает доход $\varphi_u \Delta t$ в денежных единицах, находясь в отказном состоянии, требует расхода $\overline{\varphi_u} \Delta t$. Тогда общий доход системы за Δt период времени, получаемый на S_i -м состоянии, можно определить формулой.

Имея матрицу перехода A , вводя:

$$A = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \lambda_1 & \lambda_1 + \lambda_2 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & -(\lambda_2 + \mu_2) & 0 & 0 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & \mu_2 & 0 & 0 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2 + \lambda_3) & 0 & \lambda_1 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_2 + \mu_3) & 0 & 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & \mu_2 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_3 & \mu_3 & 0 & -(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3) & \mu_3 & 0 & \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3) & \lambda_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_3) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где λ_1 - вероятность полного отказа определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; λ_2 - вероятность частичного отказа

$$\tau_i \Delta t = \sum_{u=1}^n [(1 - x_u^i) \varphi_u^+ - x_u^i \varphi_u^-] \Delta t, \quad (8)$$

где $i = 1, 2^n - m$.

Из выражения расход / доход, можно определить для каждого i -состояния $S_i \in S$ соответствующую норму затрат q_i по формуле:

$$q_i = \tau_i + \sum_{j=1}^{\tau^{n-m}} a_{ij} \tau_j, \quad (9)$$

где $i = 1, 2^n$.

Требуется найти минимально возможное значение общих затрат q , являющееся критерием оптимальности марковских систем, функционирующих на бесконечном интервале времени.

Весь смысл задачи сводится к формированию и решению следующей системы уравнений (8).

$$q = q_i + \sum_{j=1}^{\tau^{n-m}} a_{ij} w_j, \quad (10)$$

где $i = 1, 2^{n-m}$.

Относительно q и $w_1, w_2, \dots, w_j^{n-m}$, полагая, что $u_2^{n-m} = 0$.

Матрицы перехода связана с графом, рассмотренным в статье [19]. На орграфе инженерные системы изображаются окружностями, а возможные переходы - стрелками. Номер каждой инженерной системы соответствует параметру, имеющему идентичный нижний индекс: 1 - электроэнергия; 2 - вентиляция; 3 - водоснабжение; 4 - газоснабжение; 5 - кондиционирование; 6 - водоотведение; 7 - теплоснабжение; 8 - системы безопасности; 9 - отопление.

В результате, можно составить матрицу перехода по следующему правилу. Если на графе имеется стрелка, ведущая из S_i в S_j (связывающая любые две инженерные системы), то значение стрелки является значением d_{ij} . Если такой стрелки нет, то $S_i = 0$. Значение элемента d_{ij} - определяется как сумма всех стрелок, выходящих из состояния S_i , принятого со знаком минус. Пользуясь таким правилом (10) записывается матрица A для комплекса инженерных систем.

(50 % функциональности) определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; λ_3 - вероятность критического отказа (20 %

функциональности) определенной инженерной системы в гарантийный срок службы; μ_1, μ_2, μ_3 – соответствующие вероятности восстановления полной работоспособности инженерной системы.

Для этой матрицы производительность в течение жизненного цикла определяется:

$$\tau_1 = 0, \quad (12)$$

$$\tau_2 = \varphi_1^{-1}, \quad (13)$$

$$\tau_3 = \varphi_2^{-1}, \quad (14)$$

$$\tau_4 = \varphi_3^{-1}, \quad (15)$$

$$\tau_5 = \varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1}, \quad (16)$$

$$\tau_6 = \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (17)$$

$$\tau_7 = \varphi_1^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (18)$$

$$\tau_8 = \varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}, \quad (19)$$

$$\tau_9 = 2(\varphi_1^{-1} + \varphi_2^{-1} + \varphi_3^{-1}). \quad (20)$$

При этом интенсивность λ_u для рассматриваемой задачи зависит от сложности комплектации системы. Поэтому следует выбрать такое из числа $\prod_{u=1}^n m_u$ при решении $\theta = (v_u, u = \overline{1, n})$, чтобы общие затраты q были минимальными.

$$\gamma(\theta', \theta) = q(\theta') + A(\theta')w(\theta) - q(\theta) - A(\theta)w(\theta), \quad (23)$$

тогда при

$$\gamma = (\theta', \theta) \geq 0, \quad (24)$$

$$\gamma(\theta', \theta) \leq 0, \quad (25)$$

получим

$$g(\theta') > g(\theta), \quad (26)$$

$$g(\theta') < g(\theta). \quad (27)$$

Поиск оптимального решения путем сокращения ряда неконкурентоспособных вариантов проводится с помощью параметра γ .

Пусть θ' – оптимальное решение PL - модели. Тогда:

$$\theta' \in H, \quad (28)$$

где H - множество решений.

Тогда γ - оптимальное решение, при условии $\gamma(\theta', \theta) \neq 0$.

При нахождении g' - оптимального решения, рекомендуется соблюдать следующие принципы:

С учетом (7) и (11) можно получить норму затрат каждого состояния:

$$q_i = \tau_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^7 d_{ij} \tau_j, \quad (21)$$

Серия уравнений (12-20), определяющая затраты для рассматриваемой задачи, имеет вид:

$$q = q_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^7 d_{ij} w_j, \quad (22)$$

После этих предварительных выкладок можно перейти к вопросу оптимизации процесса содержания системы.

Предположим, что каждый элемент x может быть изготовлен в нескольких вариантах $x_u(v_u)$, $v_u = I, m_u$, где v_u - номер варианта u -го элемента. Каждый вариант характеризуется следующими величинами:

$\lambda_u(v_u)$ – интенсивность отказа;

$\mu_u(v_u)$ – интенсивность восстановления;

$\varphi_u^+(v_u)$ – расход при эксплуатации;

$\varphi_u^-(v_u)$ – расход во время восстановления.

Вопрос оптимизации решения, т.е. выбор значений интенсивности переходов связан с параметрическими марковскими моделями с непрерывным временем (PL - моделями) [18] и может быть решен по следующим соображениям. Пусть $\gamma(\theta^1, \theta) - (N + 1)$ – мерный вектор такой, что:

1. Преобразуется множество $\theta' = (\theta_1, \dots, \theta_R)$ в множество $\tilde{H} = (\tilde{\theta}_1, \dots, \tilde{\theta}_R)$, так что $\eta q(\tilde{\theta}_i) \geq n q(\tilde{\theta}_{i-1}), i = 1, R, 1$, где $\tilde{\theta} \in H$, а η - мерный вектор - строка, все элементы которого равны 1.

2. Пусть для $\theta', \theta \in H$ выполняется неравенство $\gamma(\theta', \theta) \neq 0$. Если $\eta q(\theta', \theta) > 0$, то предпочтение при выборе варианта отдается решению θ' , иначе $\eta q(\theta', \theta) \leq 0$.

Итерационный алгоритм, основанный на этих принципах, имеет следующую последовательность:

1. Для каждого $\theta \in H$ по формуле (9) вычисляется $q(\theta)$ – вектор «норма затрат», затем множество H преобразуется в множество $\tilde{H}$.

Вводится величина $t = I$ и полагается, что $\theta = \tilde{\theta}_1 (\tilde{\theta}_1 \in \tilde{H})$

2. Решается система уравнений (10) и определяются $q(\theta)$ и $w(\theta)$.

3. Проверяется условие $t = R$, если да, то θ – искомое решение и интеграция прекращается.

4. Принимается, что $t = t + I$ и вычисляется вектор:

$$\gamma_t = \tau(\tilde{\theta}_t) + A(\tilde{\theta}_t)w(\theta) - q(\theta), \quad (29)$$

и определяется величина $\eta\gamma_t$.

5. Проверяется условие $\eta\gamma_t > 0$. При удовлетворении полагается, что $\theta = \theta_t$ и управление передается в пункт 2, иначе пункту 3.

Данный алгоритм позволяет отсеивать конкурентоспособные варианты, не прибегая к решению для каждого варианта системы уравнений. Алгоритм позволяет в ряде случаев отыскать оптимальное решение. В силу того, что всякое решение θ из H является N -мерным вектором, т. е.:

$$\theta = (t_1, t_2, \dots, t_H), \quad (30)$$

$$P_{ij}(\theta) = P_{ij}(K_i), \quad (31)$$

для всех $i, j \in S$, то P -модели представляют собой управляемую марковскую модель с непрерывным временем. Оптимальные решения $\theta' \in H$ могут определяться с помощью итерационного алгоритма [18].

Норма затрат по всем состояниям рассматриваемой системы определяется по [20], т.е.:

$$q_1 = \tau_1 + \lambda_1\tau_2 + \lambda_2\tau_3 + \lambda_3\tau_4, \quad (32)$$

$$q_2 = \tau_2 + \mu_1\tau_1 + \lambda_2\tau_4, \quad (33)$$

$$q_3 = \tau_3 + \mu_2\tau_1 + \lambda_1\tau_5 + \lambda_3\tau_6, \quad (34)$$

$$q_4 = \tau_4 + \mu_3\tau_1 + \lambda_2\tau_6. \quad (35)$$

$$q_5 = \tau_5 + \mu_2\tau_2 - \mu_1\tau_3 - \lambda_3\tau_1 \quad (36)$$

$$q_6 = \tau_6 + \mu_3\tau_3 - \mu_2\tau_4 - \lambda_4\tau_1 \quad (37)$$

$$q_7 = \tau_7 + \mu_3\tau_2 - \mu_1\tau_6 \quad (38)$$

$$q_8 = \tau_8 + \mu_2\tau_1 + \lambda_1\tau_5 + \lambda_3\tau_6, \quad (39)$$

$$q_9 = \tau_9 + \mu_3\tau_3 - \mu_1\tau_3 - \lambda_2\tau_5 \quad (40)$$

Значения вероятностей отказа полного, частичного и критического зависят от типа инженерной системы. Порой проще выявить недееспособный элемент при полном выходе системы из строя или критической сокращения ее работоспособности чем при частичном. Зачастую серьезные нарушения в работоспособности сопровождаются видимыми нарушениями (дым, сильный нагрев, прорыв, задымление и т.д.). В табл. 1 представлены вероятности отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта.

Установлено, что наивысшая вероятность отказа может возникнуть в системе электроснабжения с вероятностью 27,5%. Данный факт связан с тем, что на этапе ввода строительного объекта в эксплуатацию отделочные работы сопровождаются значительными всплесками напряжений и кратного увеличения мощностей. Наименьшая вероятность полного отказа у системы газоснабжения – 5,2%. Это связано со строгими требованиями к проектированию и монтажу газовых сетей, регулярным проведением профилактических осмотров и проверок.

Таблица 1

Вероятность отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9
λ_1	27,5	6,3	9,5	5,2	8,4	7,6	11,2	5,4	14,2
μ_1	34,2	83,9	76,6	8,4	6,3	7,6	7,1	7,2	4,4
λ_2	8,5	5,5	8,4	9,4	6,3	5,3	7,4	5,1	13,2
μ_2	19,5	16,5	15,5	6,3	9,3	8,2	8,4	21	31
λ_3	6,5	4,3	6,2	5,2	5,4	5,1	6,5	4,3	12,2
μ_3	83,9	73,2	82,2	76,7	84,5	81,7	76,4	75,3	63,4
q_1	4,462	3,569	4,005	3,103	3,122	2,231	3,564	2,231	17,847
q_2	24,594	24,573	14,594	24,615	24,007	23,483	24,028	23,462	33,820
q_3	25,307	28,077	20,384	48,056	29,21	38,05	39,112	48,56	67,640
q_5	50,384	65,307	34,615	64,636	34,636	44,636	24,636	84,615	78,965
q_{10}	86,740	87,537	87,537	87,537	72,57	67,75	82,537	86,740	80,262
q_{15}	87,537	96,740	88,334	96,740	81,537	85,797	86,740	96,466	88,241
q_{20}	125,94	125,94	125,94	99,94	125,94	112,81	94,94	125,94	91,395
q_{30}	128,46	127,76	125,55	117,79	144,91	140,23	112,74	144,23	113,86
q_{50}	156,91	136,77	166,91	157,04	163,16	149,82	153,3	149,68	215,77

Наивысшей степенью вероятности восстановления обладает система кондиционирования 84,5 % в следствии простоты и доступности комплектующих материалов.

Анализ экономической составляющей жизненного цикла показал, что система отопления является наиболее ресурсоемкой среди инженерно-технических подсистем здания, поскольку суммарные издержки, требуемые для поддержания ее функциональности и возобновления утраченных свойств в течение нормативного срока службы продолжительностью 50 лет, превышают совокупные эксплуатационные расходы

почти в три раза (215,7 %). Минимальную величину удельных расходов демонстрирует вентиляционная система, характеризующаяся коэффициентом экономического воздействия равным 136,7 %, что свидетельствует о сравнительно низком уровне капитальных вложений относительно текущих эксплуатационных затрат на протяжении всего периода эксплуатации объекта.

Финальная матрица в виде систем уравнений выглядит следующим образом:

$$g = q_1 - (\mu_1 + \lambda_3) \cdot \omega_1 + \lambda_4 \cdot \omega_2 + \lambda_2 \cdot \omega_3, \quad (41)$$

$$g = q_2 + \mu_1 \cdot \omega_1 + (\mu_2 + \lambda_2) \cdot \omega_2 + \lambda_1 \cdot \omega_4 + \lambda_3 \cdot \omega_5, \quad (42)$$

$$g = q_3 + \mu_2 \cdot \omega_2 + (\mu_3 + \lambda_1) \cdot \omega_3 + \lambda_2 \cdot \omega_5, \quad (43)$$

$$g = q_4 + \mu_3 \cdot \omega_3 + (\mu_1 + \lambda_2) \cdot \omega_4 + \lambda_3 \cdot \omega_1 + \lambda_1 \cdot \omega_2, \quad (44)$$

$$g = q_5 + \mu_1 \cdot \omega_4 + (\mu_2 + \lambda_3) \cdot \omega_5 + \lambda_2 \cdot \omega_1, \quad (45)$$

$$g = q_6 + \mu_2 \cdot \omega_5 + (\mu_3 + \lambda_2) \cdot \omega_2 + \lambda_1 \cdot \omega_1, \quad (46)$$

$$g = q_7 + \mu_3 \cdot \omega_5 + (\mu_1 + \lambda_1) \cdot \omega_3 + \lambda_2 \cdot \omega_4. \quad (47)$$

Далее необходимо определить вероятность поочередного выхода из строя двух инженерных систем. В соответствии с алгоритмом проведем ранжировку по $\sum q_i$ (см. табл. 1), что позволит провести организованный анализ вариантов. В результате, вероятности сведем в табл. 2.

Вероятность зависит от той системы, которая первой выйдет из строя, поэтому значения вероятностей при пересечении строки - столбца и столбца – строки отличаются.

Таблица 2

Вероятность одновременного выхода из строя двух инженерных систем

	Θ_1	Θ_2	Θ_3	Θ_4	Θ_5	Θ_6	Θ_7	Θ_8	Θ_9
Θ_1	0,00	3,29	2,27	3,30	5,60	4,85	5,39	6,64	6,67
Θ_2	3,84	0,00	4,04	3,84	5,70	5,50	6,16	5,66	6,58
Θ_3	3,39	3,85	0,00	5,46	3,56	5,82	8,92	2,43	7,98
Θ_4	5,11	3,56	2,67	0,00	4,71	3,58	6,06	3,81	6,84
Θ_5	4,57	3,57	3,22	3,53	0,00	3,65	5,50	5,57	6,49
Θ_6	2,54	4,76	2,56	3,58	3,75	0,00	7,61	6,49	6,49
Θ_7	6,57	1,67	3,63	4,76	5,36	4,75	0,00	4,76	4,76
Θ_8	2,32	6,08	5,85	2,20	1,75	3,96	4,58	0,00	7,37
Θ_9	2,89	4,10	4,54	1,50	2,50	1,37	3,98	3,01	0,00

Прогнозируемое увеличение затрат на восстановление двух инженерных систем представлено в табл. 3. Используется аналогичный

принцип, увеличение затрат на восстановление будет разным и зависеть с какой инженерной системы начинать восстановление.

Таблица 3

Увеличение затрат на восстановление двух инженерных систем, %

Прогнозируемое увеличение затрат на восстановление, %									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00	17,68	12,18	17,73	30,07	26,06	28,95	35,64	35,79
2	20,62	0,00	21,71	20,62	30,60	5,54	33,08	30,37	35,36
3	18,21	20,67	0,00	29,31	19,12	31,23	47,90	13,07	42,86
4	27,46	19,12	14,34	0,00	25,28	19,23	32,55	20,44	36,75
5	24,54	19,17	17,28	18,97	0,00	19,61	29,54	29,89	34,83
6	13,65	5,56	13,75	19,23	20,14	0,00	40,88	34,83	34,83
7	35,26	8,97	19,50	25,56	28,78	25,48	0,00	25,56	25,56
8	12,46	32,68	31,41	11,83	9,37	21,28	24,57	0,00	39,59
9	15,50	22,04	24,37	8,08	13,43	7,35	21,35	16,16	0,00

Выводы

1. По результатам исследования, можно заключить, что наиболее дорогостоящая авария возникает при выходе из строя систем теплоснабжения и водоснабжения. Особенно это чревато в зимний период. Затраты на восстановление увеличатся на 47,9 % в сравнении с обычным режимом работы.

2. Минимальное увеличение затрат наблюдается при выходе из строя системы вентиляции и водоотведения. Это объясняется тем, что эти инженерные системы не связаны между собой и функционирование одной не влияет на другую.

3. Определена вероятность отказа инженерных систем и затраты на восстановление с учетом проведения ремонта до 50 лет, т.е. на весь жизненный цикл строительного объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. González-Dueñas C., Padgett J.E. Performance-Based Coastal Engineering Framework // Front Built Environ. 2021. 7 p. doi.org/10.3389/fbuil.2021.690715

2. Galasso C., McCloskey J., Pelling M. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities // Int J Disaster Risk Red. 2021. №58. Pp. 102158. DOI:10.1016/j.ijdr.2021.102158

3. Саввин Н.Ю. Математическое моделирование жизненного цикла инженерных систем здания // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2024. № 4(58). С. 15–23.

4. Уварова Л.В. Нечеткое управление системой водоотведения с использованием динамической TSK-модели // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 20. С. 42–48.

5. Косяков С.В., Садыков А.М., Сенников В.В., Смирнов В.В. Повышение эффективности эксплуатации систем централизованного тепло-

снабжения на основе применения информационной системы мониторинга тепловых сетей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 2. С. 57–66.

6. Криницкий Е.В., Маскинская А.Ю. Информационное моделирование инженерных систем зданий с применением MagiCAD // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 2(218). С. 76–79.

7. Бутенко М.А., Бурнос Д.В., Хоперсков С.А. Информационная модель программного комплекса для оптимизации и управления системами вентиляции на основе прямого газодинамического моделирования // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2012. № 6. С. 31–37.

8. Червова Н.А., Лепешкина Д.О. Коллизии инженерных систем при проектировании в BIM платформах // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 3(66). С. 19–29. doi: 10.18720/CUBS.66.2

9. Баженов В.И. Анализ BIM-моделирования инженерных сетей водопроводно-канализационного хозяйства // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 2(140). С. 8–18.

10. Девятярова О.А. Жизненный цикл строительного объекта, цели и задачи, определяющие эффективность функционирования строительного объекта // Столица науки. 2019. № 12(17). С. 360–363.

11. Hu S., Zhang Y., Yang Z., Yan D., Jiang Y. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China's building sector // Modelling and data Build Simulat. 2022. № 15. Pp. 1899–1921. doi.org/10.1007/s12273-022-0912-1

12. Zhao H., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption // Renew Sustain Energy Rev. 2022. № 16. Pp. 3586–3592. doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049

13. Ahn K., Kim Y., Park C., Kim I., Lee K. BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation // *Energy Build.* 2024. № 68. Pp. 671–678. doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.063

14. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art // *Energy Build.* 2022. № 55. Pp. 889–902. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.08.018

15. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems Transdisciplinary perspectives on complex systems // Springer International Publishing. 2017. № 11. Pp. 85–113. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4

16. Цимбал В.А., Потапов С.Е., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Приложение теории конечных марковских цепей к анализу протоколов инфор-

мационного обмена и оптимизации их параметров // *REDS: Телекоммуникационные устройства и системы.* 2018. Т. 8. № 1. С. 5–18.

17. Сухорукова И. В., Чистякова Н.А. Содержательно-методическая концепция формирования спецкурса по приложениям марковских процессов // *Прикладная психология и педагогика.* 2021. Т. 6. № 1. С. 31–41.

18. Свешников А.А. Прикладные методы теории марковских процессов : учебное пособие. Санкт-Петербург : Лань, 2007. 174 с.

19. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Цифровой двойник инженерных систем общественного здания // *Вестник Евразийской науки.* 2024. Т 16. № 6.

20. Горбачев Д.В. Избранные задачи теории функций и теории приближений и их приложения : учебное пособие. Тула : изд-во ТулГУ, 2004. 152 с.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: n-savvin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Аверкова Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: olga_19572004@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Логачев Константин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: kilogachev@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 08.07.2025 г.

© Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И., 2025

***Savvin N.Yu., Strokov V.V., Averkova O.A., Logachev K.I.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: n-savvin@mail.ru*

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF ENGINEERING SYSTEMS WITH ACCOUNT FORECASTING

Abstract. The article considers the problem of assessing the reliability of building engineering systems using methods of queuing theory and Markov process theory. A mathematical model is proposed that allows analyzing the performance indicators of various engineering systems, including water, heat and electricity supply systems, as well as ventilation and air conditioning systems. The model is based on determining the probabilistic characteristics of failures and restorations of system components, as well as on calculating the cost standards associated with ensuring normal functioning. Particular attention is paid to improving energy efficiency and reducing economic losses in the event of accidents and breakdowns of engineering systems. Practical recommendations are provided to reduce risks and improve the sustainability of the functioning of building infrastructure systems. A comparative analysis of domestic analogues of software for building information management (BIM technologies) is carried out, promising areas for the development of information

models of engineering systems are identified. The research results allow us to optimize the processes of planning, design and operation of modern buildings and structures. Approaches to choosing the optimal strategy for maintenance and modernization of engineering systems throughout the life cycle of a building are substantiated. The study is aimed at design engineers, builders and specialists involved in real estate management.

Keywords: reliability, engineering systems, probability of failure, modeling, economic costs, life cycle, information models

REFERENCES

1. González-Dueñas C., Padgett J.E. Performance-Based Coastal Engineering Framework. *Front Built Environ.* 2021. 7 p. doi.org/10.3389/fbuil.2021.690715
2. Galasso C., McCloskey J., Pelling M. Editorial. Risk-based, Pro-poor Urban Design and Planning for Tomorrow's Cities. *Int J Disaster Risk Red.* 2021. No. 58. 102158. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102158
3. Savvin N.Yu. Mathematical modeling of the life cycle of building engineering systems [Matematicheskoye modelirovaniye zhiznennogo tsikla inzhenernykh sistem zdaniya]. *Scientific journal. Engineering systems and structures.* 2024. No. 4(58). Pp. 15–23. (rus)
4. Uvarova L.V. Fuzzy control of the drainage system using a dynamic TSK model [Nechetkoye upravleniye sistemoy vodootvedeniya s ispol'zovaniyem dinamicheskoy TSK-modeli]. *Prospects for the development of information technologies.* 2014. No. 20. Pp. 42–48. (rus)
5. Kosyakov S.V., Sadykov A.M., Sennikov V.V., Smirnov V.V. Improving the efficiency of centralized heat supply systems operation based on the use of an information system for monitoring heating networks [Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnove primeneniya informatsionnoy sistemy monitoringa teplovykh setey]. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University.* 2018. No. 2. Pp. 57–66. (rus)
6. Krinitsky E.V., Maskinskaya A.Yu. Information modeling of building engineering systems using MagiCAD [Informatsionnoye modelirovaniye inzhenernykh sistem zdaniy s primeneniym MagiCAD]. *Plumbing, Heating, Air Conditioning.* 2020. No. 2 (218). Pp. 76–79. (rus)
7. Butenko M.A., Burnos D.V., Khoperskov S.A. Information model of a software package for optimization and control of ventilation systems based on direct gas-dynamic modeling [Informatsionnaya model' programmnoy kompleksa dlya optimizatsii i upravleniya sistemami ventilyatsii na osnove pryamogo gazodinamicheskogo modelirovaniya]. *Bulletin of the Volgograd State University. Series 10: Innovative activity.* 2012. No. 6. Pp. 31–37. (rus)
8. Chervova N.A., Lepeshkina D.O. Collisions of engineering systems in design in BIM platforms [Kollizii inzhenernykh sistem pri proyektirovaniy v BIM platformakh]. *Construction of unique buildings and structures.* 2018. No. 3 (66). Pp. 19–29. DOI: 10.18720/CUBS.66.2 (rus)
9. Bazhenov V.I. Analysis of BIM modeling of engineering networks of water supply and sanitation facilities [Analiz BIM-modelirovaniya inzhenernykh setey vodoprovodno-kanalizatsionnogo khozyaystva]. *Science and business: development paths.* 2023. No. 2 (140). Pp. 8–18. (rus)
10. Devyatiyarova O.A. Life cycle of a construction project, goals and objectives that determine the efficiency of a construction project [Zhiznennyy tsikl stroitel'nogo ob'yekta, tseli i zadachi, opredelyayushchiye effektivnost' funktsionirovaniya stroitel'nogo ob'yekta]. *The capital of science.* 2019. No. 12 (17). Pp. 360–363. (rus)
11. Hu S., Zhang Y., Yang Z., Yan D., Jiang Y. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China's building sector. *Modeling and data Build Simulat.* 2022. No. 15. Pp. 1899–1921. DOI: 10.1007/s12273-022-0912-1
12. Zhao H., Magoulès F. A review on the prediction of building energy consumption. *Renew Sustain Energy Rev.* 2022. No. 16. Pp. 3586–3592. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.049
13. Ahn K., Kim Y., Park C., Kim I., Lee K. BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation. *Energy Build.* 2024. No. 68. Pp. 671–678. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.063
14. Ma Z., Cooper P., Daly D., Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy Build.* 2022. No. 55. Pp. 889–902. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018
15. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems *Transdisciplinary perspectives on complex systems.* Springer International Publishing. 2017. No. 11. Pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
16. Tsymbal V.A., Potapov S.E., Toiskin V.E., Lyagin M.A. Application of the theory of finite Markov chains to the analysis of information exchange protocols and optimization of their parameters [Prilozheniye teorii konechnykh markovskikh tsepey k analizu protokolov informatsionnogo obmena i optimizatsii ikh parametrov]. *REDS: Telecommunication devices and systems.* 2018. Vol. 8. No. 1. Pp. 5–18. (rus)

17. Sukhorukova I.V., Chistyakova N. A. Content-methodical concept of forming a special course on applications of Markov processes [Soderzhatel'no-metodicheskaya kontseptsiya formirovaniya spetskursa po prilozheniyam markovskikh protsessov]. Applied Psychology and Pedagogy. 2021. Vol. 6. No. 1. Pp. 31–41. (rus)

18. Sveshnikov A.A. Applied methods of the theory of Markov processes: a tutorial [Prikladnyye metody teorii markovskikh protsessov : uchebnoye posobiye]. St. Petersburg: Lan, 2007. 174 p. (rus)

19. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Digital twin of engineering systems of a public building [Digital twin of engineering systems of a public building]. Bulletin of Eurasian Science. 2024. Vol. 16. No. 6. (rus)

20. Gorbachev D. V. Selected problems of the theory of functions and the theory of approximations and their applications: a tutorial [Izbrannyye zadachi teorii funktsiy i teorii priblizheniy i ikh prilozheniya : uchebnoye posobiye]. Tula: Tula State University Publishing House, 2004. 152 p. (rus)

Information about the authors

Savvin, Nikita Yu. PhD. E-mail: n-savvin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Strokova, Valeria V. DSc, Professor E-mail: vvstrokova@gmail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Averkova, Olga A. DSc, Professor E-mail: olga_19572004@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Logachev, Konstantin I. DSc, Professor E-mail: kilogachev@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 08.07.2025

Для цитирования:

Саввин Н.Ю., Строкова В.В., Аверкова О.А., Логачев К.И. Оценка надежности работы инженерных систем с учетом прогнозирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 11. С. 78–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87

For citation:

Savvin N.Yu., Strokova V.V., Averkova O.A., Logachev K.I. Assessment of the reliability of engineering systems with account forecasting. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 11. Pp. 78–87. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-11-78-87