



20. Фэн, Н. Системный анализ организации и проведения ремонта трубопроводных систем в рамках цифровизации жилищно-коммунального хозяйства / Н. Фэн, З. А. Агаларов, О. М. Шиккульская // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 4(42). – С. 104-108. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-4-104-108.

© А. В. Стукалин, О. М. Шиккульская, А. Ф. Сокольский

Ссылка для цитирования:

Стукалин А. В., Шиккульская О. М., Сокольский А. Ф. Системный анализ двухступенчатой технологической схемы очистки воды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 3 (44). С. 109–114.

УДК 004.94

DOI 10.52684/2312-3702-2023-45-3-114-118

**ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИФфуЗИОННАЯ МОДЕЛЬ
ОТКАЗОВ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Р. З. Хайруллин

Хайруллин Рустам Зиннатуллович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Главного метрологического центра Минобороны России; профессор кафедры фундаментального образования, Московский государственный строительный университет, тел.: +7 (926) 405-22-17; e-mail: zrkzrk@list.ru

Проблема повышения надежности и безопасности эксплуатации строительного фонда промышленных и гражданских зданий приводит к необходимости разработки адекватных математических моделей, предназначенных для моделирования процесса эксплуатации контрольно – измерительных приборов, используемых при реализации концепции «Умный дом – умный город», построенной на базе высокотехнологичного оборудования. В статье разработана теоретическая трехпараметрическая диффузионная модель отказов контрольно – измерительной техники, позволяющая адекватно моделировать функцию интенсивности отказов. Параметры модели достаточно просто определяются при наличии статистической информации. Разработанная модель может быть использована для эффективного управления продолжительностями этапов жизненного цикла парка контрольно - измерительных приборов. Модель может быть использована для прогнозирования надежности и безопасности эксплуатации строительного фонда промышленных и гражданских зданий.

Ключевые слова: интенсивность отказов, диффузионная модель, контрольно-измерительные приборы.

**THREE-PARAMETER DIFFUSION MODEL
OF FAILURES OF CONTROL-MEASURING INSTRUMENT FAILURES**

R. Z. Khayrullin

Khayrullin Rustam Zinnatulloevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leader Scientific Worker of the Head Scientific Metrological Centre; Professor of the Department of Fundamental Education, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (926) 405-22-17; e-mail: zrkzrk@list.ru

The problem of increasing the reliability and safety of operation of the building stock of industrial and civil buildings leads to the need to develop adequate mathematical models designed to simulate the operation of control and measuring equipment used in the implementation of the concept of "Smart House - Smart City", built on the basis of high-tech equipment. The theoretical three – parametric diffusion model of failures of control and measuring equipment, which allows to adequately simulate the function of intensity of failures, is developed in the article. Parameters of the model are simply enough calculated in the presence of statistical data. The developed model can be used for effective management of life cycle durations of control and measuring equipment fleet. The model can be used for forecasting reliability and operational safety of the building stock of industrial and civil buildings.

Keywords: control and measuring equipment, failure rate, diffusion model.

Промышленное и гражданское строительство входят в группу ключевых направлений экономического развития государства. На современном этапе реализации Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года возникает необходимость управления уникальными инновационными проектами и системами на базе высокотехнологичного оборудо-

вания, используемого при создании и реализации концепции «Умный дом» [1-8], в том числе по созданию высокотехнологичного строительного оборудования [7–16], в частности по проектированию и эксплуатации современных средств измерений и контрольно – измерительных приборов (далее – КИП) [17]. Эксплуатация современных зданий и сооружений, управление промышленным и гражданским строительным фондом

немыслимы без применения измерительных комплексов, датчиков и КИП.

В настоящее время в сфере строительства и жилищно – коммунального хозяйства применяется большое количество средств измерений, датчиков и КИП. Парк КИП непрерывно обновляется за счет списания устаревших образцов КИП и внедрения современных образцов. Поэтому задача оценки показателей надежности и прогнозирования срока службы КИП является актуальной.

Объектом исследования является парк КИП, используемый при эксплуатации промышленного и гражданского строительного фонда. Предметом исследования являются методы оценки надежности парка КИП. Целью исследования является разработка теоретической модели отказов КИП, являющейся достаточно адекватной для решения практических задач, и, в то же время – легко настраиваемой для конкретных видов и типов КИП на основе имеющейся статистической информации об отказах.

Одним из основных показателей надежности является интенсивность отказов. В настоящей работе показатель интенсивности отказов предлагается оценивать на основе применения разработанной автором теоретической модели отказов.

Принятие и использование той или иной теоретической модели распределения времени наработки до отказа КИП оказывается чрезвычайно важным. Экспериментально доказано, что в зависимости от принятой теоретической модели оценки показателей надёжности КИП могут отличаться в 10–20 раз [18]. Так что выбор той или иной теоретической модели распределения отказов в конечном итоге определяет точность расчётных значений показателей надёжности КИП.

Одним из перспективных направлений разработки теоретических моделей распределения отказов КИП является разработка на основе учета физико – химических процессов, протекающих в узлах и элементах КИП, и достоверной статистической информации. То есть на основе учета статистики и деградационных процессов, протекающими в узлах и элементах КИП, которые зачастую носят случайный характер.

Опыт эксплуатации сложных технических систем, в том числе КИП, показывает, что изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ описывается U – образной кривой. Типичное изменение интенсивности отказов во времени показано на рисунке 1.



Рис. 1. Типичное изменение интенсивности отказов

Время можно условно разделить на три характерных участка: период приработки, период нормальной эксплуатации и период старения КИП.

Отметим, что возрастание интенсивности отказов, относящееся к периоду старения, вызвано увеличением числа отказов из-за физико – химических процессов (износа, коррозии, окисления контактов и т. д.).

В настоящей работе используется формализация моделей отказов, основанная на отслеживании динамики определяющего параметров (далее – ОП), приводящих к отказовому состоянию [19]. Случайный характер поведения ОП, обусловленный флуктуациями внешних факторов, ставит определённые трудности на пути построения простых и одновременно эффективных теоретических моделей отказов КИП.

Описание процесса накопления повреждений случайными функциями общего вида приводит к громоздким аналитическим выражениям для количественных характеристик надёжности или к приближённым решениям.

Проведем сначала анализ сравнительно простых теоретических моделей, а затем опишем построение трехпараметрической диффузионной модели (TDM), позволяющей моделировать U – образную функцию интенсивности отказов.

1. Распределение Вейбулла

$F(t, k, \lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)^k$, где $k > 0$ – коэффициент формы, $\lambda > 0$ – коэффициент масштаба. С увеличением времени t в зависимости от значений параметров k и λ соответствующая интенсивность отказов будет стремиться к нулю или монотонно возрастать до бесконечности, или будет принимать постоянное значение, что не соответствует U –образной функции, изображенной на рисунке 1.

2а. Альфа-распределение $F_\alpha(t, a, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu a t}\right)$,

где a – математическое ожидание скорости изменения ОП, нормированного на 1, ν – коэффициент вариации скорости изменения ОП.

2б. Двухпараметрические нормальные распределения: $F_{N1}(t, a, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu\sqrt{a}}\right)$ или

$F_{N2}(t, a, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu}\right)$. Для распределений 2а и

2б с увеличением времени t соответствующая интенсивность отказов будет стремиться к 0, что также не соответствует функции, изображенной на рисунке 1.

3. Диффузионное монотонное распределение. $F_{DM}(t, a, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu\sqrt{at}}\right)$.

4. Диффузионное немонотонное распределение

$$F_{DN}(t, a, \nu) = \Phi\left(\frac{at-1}{\nu\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{at+1}{\nu\sqrt{at}}\right).$$

Интенсивности отказов диффузионных монотонных и немонотонных распределений имеют конечный ненулевой предел $\lambda_\infty = a/(2v^2)$ (рис. 2).

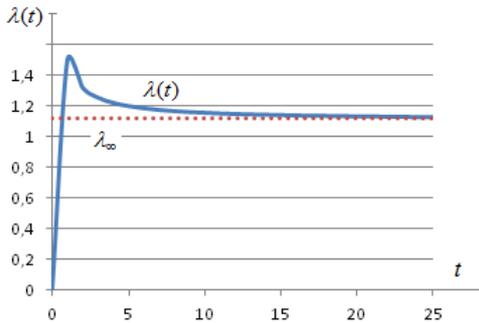


Рис. 2. Общий вид зависимости интенсивности отказов от времени для диффузионного монотонного и немонотонного распределения

Таким образом, диффузионные монотонные и немонотонные распределения адекватно моделируют только первый и второй характерные участки, изображенные на рисунке 1.

Трехпараметрическое диффузионное распределение

Примем, что процесс деградации можно аппроксимировать непрерывным марковским процессом диффузионного типа, то есть изучаемый процесс управляется стохастическим дифференциальным уравнением первого порядка следующего вида (уравнение типа Ито) [20]:

$$dx(t) = A(x, t)dt + B(t)d\eta(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – ОП; $A(x, t)$, $B(t)$ – детерминированные функции, характеризующие изменение среднего значения и среднего квадратического отклонения ОП (коэффициенты сноса и диффузии); $\eta(t)$ – случайная составляющая гауссовского типа.

Задача нахождения функции распределения времени до первого отказа КИП в данном случае сводится к решению задачи первого достижения процессом (4) верхней границы области (при нормированном процессе верхняя граница равна единице).

Данная задача решается полностью, если известна условная плотность вероятности перехода процесса из одного состояния в другое. Для марковского процесса диффузионного типа условная переходная плотность $\omega(x, t)$, соответствующая процессу (1), описывается уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова, представляющим собой дифференциальное уравнение в частных производных [20]:

$$\frac{\partial \omega(x, t)}{\partial t} + A(x, t) \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x} - \frac{(B(t))^2}{2} \frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

При решении этого уравнения необходимо задавать граничные условия, которые зависят от вида реализаций процесса, в частности от их монотонного или немонотонного характера [18].

Примем, что коэффициент $A(x, t)$ зависит от ОП линейно: $A(x, t) = ax + c$, а $B(t) = b$, где a , b , c – постоянные. Такое задание коэффициентов описывает деградационные процессы, вызванные химическими реакциями окисления паяных соединений КИП.

Для получения аналитического решения уравнения (2), введем новые переменные [20]: $\tau = \varphi(t)$, $y = \psi(x, t)$.

Тогда плотность вероятности принимает вид:

$$\omega(x, t) = \omega_1(\psi(x, t), \varphi(t)) \cdot |\psi'_x| = \omega_1(y, \tau) \cdot |\psi'_x|, \quad (3)$$

где $\omega_1(y, \tau)$ – новая функция плотности распределения ОП. Подбирая функции $\varphi(t)$ и $\psi(x, t)$, можно определить коэффициенты $A_1(y, \tau)$ и $B_1(y, \tau)$ так, чтобы из уравнения (2) после перехода к новым переменным можно было найти функцию $\omega_1(y, \tau)$.

Выберем

$$\varphi(t) = c(1 - e^{-2a(t-t_0)})/(2a),$$

$$\psi(x, t) = xe^{-a(t-t_0)} - b(1 - e^{-a(t-t_0)})/a. \quad (4)$$

Тогда уравнение (2) принимает вид простейшего параболического уравнения [21]:

$$\frac{\partial \omega_1(y, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \omega_1(y, \tau)}{\partial y^2},$$

решение которого имеет вид [18, 19]:

$$\omega_1(y, \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\tau - \tau_0)}} e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2(\tau - \tau_0)}}. \quad (5)$$

Используя формулы (3)-(5), получаем искомую функцию плотности распределения вероятности:

$$\omega(x, t) = \left[\exp \left(-\alpha(t - t_0) - \frac{-(b/a)(1 - e^{-a(t-t_0)}) + xe^{-a(t-t_0)} - x_0}{(c/a)(1 - e^{-a(t-t_0)})} \right)^2 \right] / \sqrt{(\pi/a)(1 - e^{-2a(t-t_0)})}. \quad (6)$$

Для расчета плотности распределения вероятностей необходимо сначала продифференцировать (6) по переменной t , и полученное выражение проинтегрировать по x в указанных ниже пределах:

$$f_{TDM}(t) = - \int_{-\infty}^1 \frac{\partial \omega(x_0, t_0, x, t)}{\partial t} dx.$$

Функция распределения вычисляется по формуле:

$$F_{TDM}(t) = \int_{-\infty}^t f_{TDM}(t) dt.$$

Интенсивность отказов находится по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{f_{TDM}(t)}{1 - F_{TDM}(t)}. \quad (7)$$

Производная от функции $\omega(x, t)$ была найдена как аналитически, так и с использованием программы MathCad (в настоящей работе не приводится из-за громоздкости). А интегрирование полученного после дифференцирования выражения может быть выполнено только численно (в настоящей работе выполнялось в программе MathCad).

На рисунке 3 представлен типичный вид функции $\lambda(t)$ (8) для TDM при разных значениях параметра a .

Таким образом, представленная в статье TDM позволяет на качественном уровне адекватно моделировать все три характерных участка изменения интенсивности отказов, изображенных на рисунке 1.

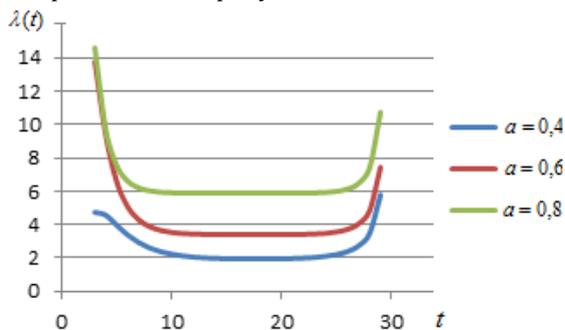


Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов от времени

Отметим, что вариация каждого из параметров a , b , c примерно в равной степени влияет на изменение вида функции $\lambda(t)$. Достаточно высокая чувствительность $\lambda(t)$ к параметрам позволяет подобрать эти параметры так, чтобы обеспечить одновременное выполнение условий по математическому ожиданию, среднему

квадратическому отклонению и γ – процентной наработке на отказ.

Заключение

Дано построение трехпараметрической диффузионной модели отказов КИП, которая, в некотором смысле, является более адекватной, чем экспоненциальная модель, α – распределение, два вида нормальных параметрических распределений, модель Вейбулла, а также диффузионное монотонное и диффузионное немонотонное распределения.

Построенная TDM позволяет получить U – образный вид функции интенсивности отказов $\lambda(t)$, что хорошо согласуется с общепринятым при решении практических задач законом изменения интенсивности отказов во времени.

Достаточно высокая чувствительность функции $\lambda(t)$ к параметрам a , b , c позволяет для парка однотипных КИП подобрать такие значения параметров, чтобы статистические характеристики, вычисленные методом моментов, совпадали с теоретическими. TDM позволяет обеспечить одновременное выполнение трех условий: по математическому ожиданию, среднему квадратическому отклонению и γ – процентной наработке на отказ.

Следует отметить, что представленная в статье TDM является более трудоемкой по сравнению с другими моделями, поскольку для расчета функции интенсивности отказов приходится проводить сначала дифференцирование функции $\omega(x, t)$ (аналитически или численно), а затем численное интегрирование полученного выражения для построения функции интенсивности отказов.

Список литературы

1. Глазкова В.В. Теоретические аспекты инновационного развития единых теплоснабжающих организаций в условиях перехода на новый энергетический уклад / Глазкова В.В. // Вестник МГСУ.–2022.–Т. 17.– Вып. 8.– С.1073-1084.
2. Савоскина Е.В. Анализ инновационных механизмов решения жилищных проблем в Российской Федерации / Савоскина Е.В., Солопова Н.А., Акри Е.П., Домнина С.В. // Вестник МГСУ.–2022.–Т. 17.– Вып. 8. – С.1096-1112.
3. Бакрунов Ю.О. Внедрение инновационных технологий в управление строительной и специальной техникой / Бакрунов Ю.О., Васильева Е.Ю. // Вестник МГСУ. –2022. –Т. 17. –Вып. 6. –С.813-822.
4. Король Е.А. Использование инновационных технологий устройства стеновых покрытий с модульными системами озеленения / Король Е.А., Шушунова Н.С. // Вестник МГСУ. 2021.–Т. 16.– Вып. 7. – С.912-925.
5. Rishi Kumara. Live Life Cycle Assessment Implementation using Cyber Physical Production System Framework for 3D Printed Products / Rishi Kumara, P. G. Padma Vilochania, S. Kahnthinishaa, Omkar Patila, Felipe Cerdas, Kuldip Singh Sangwana, Christoph Herrmannb // Procedia CIRP.–Life Cycle Engineering Conference. –105 (2022)–P.284-289.
6. Vallero D.A. Sustainable Design: The Science of Sustainability and Green Engineering / Vallero D.A., Brasier C. // John Wiley&Sons Inc. – 2008. –333 p.
7. Исанова А. В. Анализ использования современной теплоизоляции на основе аэрогеля при проектировании энергоэффективных зданий / Исанова А. В., Кретова Е. Д., Драпалюк Д. А., Драпалюк Н. А. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия.–2022.–№4 (42) –С.15-22.
8. Коровкин М. О. Влияние минеральных добавок на эффективность суперпластификаторов в самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесях / Коровкин М. О., Ерошкина Н. А., Короткова А. А. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия.–2022.–№3 (41) –С.56-61.



9. Гладких В.А. Стойкость сероасфальтобетонов к образованию колеи / Гладких В.А., Королев Е.В., Хусид Д.Л. // Вестник МГСУ.–2016. –Вып. 12. –С.70-78.
10. Andrea Mio. Multiscale modelling techniques in Life Cycle Assessment: application to product design / Andrea Mio, Maurizio Fermiglia // Procedia CIRP–Life Cycle Engineering Conference (105)– 2022. –P.688-693.
11. Ruan S. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete / Ruan S., Unluer C. // Cement and Concrete Composites.–2017. –Vol. 80.–P.104-114.
12. Scrivener K.L. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry / Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. // Cement and Concrete Research.–2018. –Vol. 114. –P.2-26.
13. Luo X. J. Retrofitting existing office buildings towards life-cycle net-zero energy and carbon / Luo X. J. // Sustainable Cities and Society Journal– 2022–Vol. 83. –03956.
14. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO2 concentration upon natural carbonation of concrete / Ekolu S.O. // Construction and Building Materials.–2016.–Vol. 127.–P.306-320.
15. Possan E. CO2 uptake potential due concrete carbonation: A case study / Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A // Case Studies in Construction Materials.–2017.–Vol. 6.–P.147-161.
16. Семенова Э. Е. Использование тепловых насосов для повышения энергоэффективности гражданских зданий / Семенова Э. Е., Богатова Т. В., Исанова А. В., Рубцова М. В. // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. –2022.–№1 (39)–С.29-32.
17. Маричев П.А. К оптимальному управлению показателями эффективности парка контрольно-измерительной техники / Маричев П.А., Корнев А.С., Хайруллин Р.З. // Вестник МГСУ.–№5. –2017. –С.564-571.
18. Азарсков В.Н. Надежность систем управления и автоматики / Азарсков В.Н., Стрельников В.П. – Киев. – НАУ. –2004.– 64 с.
19. Хайруллин Р.З. Диффузионная модель дрейфа метрологических характеристик измерительной техники / Хайруллин Р.З.// Научно-технический вестник Поволжья. –2022.–№12. –С.79-82.
20. Колмогоров А.Н. Аналитические методы теории вероятностей / Колмогоров А.Н. // Успехи математических наук. – 1938.–Вып. V. –С.5-41.
21. Араманович И.Г. Уравнения математической физики / Араманович И.Г., Левин В.И.–Москва.–Наука.–1969.–288 с.

© Р. З. Хайруллин

Ссылка для цитирования:

Хайруллин Р. З. Трехпараметрическая диффузионная модель отказов контрольно-измерительных приборов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2023. № 3 (45). С. 114–118.

УДК 69.05

DOI 10.52684/2312-3702-2023-45-3-118-124

АППРОКСИМАЦИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СРЕДСТВАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

К. Л. Уткин, О. Н. Уткина

Уткин Кирилл Львович, студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: +7 (963) 544-07-97; e-mail: utkin.kl@edu.spbstu.ru;

Уткина Оксана Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий и математики, Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики; г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел. +7 (921) 557-01-00; e-mail: o.utkina@spbacu.ru

Рассмотрена одна из ключевых проблем цифровизации строительной отрасли, связанная с формированием унифицированных подходов к вычислению расчетных показателей. Целью исследования является определение технологии аппроксимации графических зависимостей, указанных в нормативных документах, средствами алгоритмов машинного обучения. Основные результаты исследования получены с привлечением современных мессенджеров, которые также позволяют обеспечить сокращение времени на обучение специалистов строительной отрасли применению цифровых технологий. Значимость полученных результатов для строительной области состоит в фиксации отсутствия унифицированного подхода к вычислению расчетных показателей в нормативных документах, и предлагаемой технологии использования алгоритмов машинного обучения для аппроксимации графических зависимостей расчетных показателей. Как показало исследование реализация технологии возможна при взаимодействии студентов-бакалавров строительного и ИТ направлений подготовки.

Ключевые слова: цифровизация строительной отрасли, информатизация нормативных документов, моделирование профессиональных ситуаций, образовательный процесс, вычисления в строительстве, унификация вычислений, машинное обучение.

APPROXIMATION OF GRAPHICAL DEPENDENCIES BY MACHINE LEARNING TOOLS

K. L. Utkin, O. N. Utkina

Utkin Kirill Lvovich, Student Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, phone: + 7 (963) 544-07-97; e-mail: utkin.kl@edu.spbstu.ru;