

Ивахненко Н.Н.

*ГО ВПО «Донецкий национальный университет
им. Михаила Туган-Барановского»*

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию особенностей применения марковских процессов для определения надежности технических систем. Рассмотрено Марковское моделирование для систем дискретного и непрерывного времени с дискретными состояниями. Применение данного подхода позволит оценить риски аварий на предприятиях, способствует повышению экономической эффективности технических систем.

Ключевые слова: надежность системы, риск-менеджмент, марковские процессы, экономическая эффективность, профессиональная безопасность.

Ivakhnenko N.N.

*Donetsk National University
them. Mikhail Tugan-Baranovsky*

FEATURES OF RELIABILITY ASSESSMENT OF TECHNICAL SYSTEMS

Abstract

The given work is devoted to research of features of Markov processes application for determination of the technical systems reliability. The markov modeling for the systems of discrete and continuous time with the discrete states is considered. The use of the given approach will allow to estimate the accident risks in industry, which result to the rise of economic efficiency of the technical systems.

Keywords: system reliability, risk-management, Markov process, economical efficiency, professional safety.

Обеспечение надежности технических систем, а значит безопасности работников и сокращения рисков, на любом предприятии должно преобладать над остальными видами деятельности компаний, эксплуатирующих производственные объекты, и поэтому имеет высокий социальный приоритет [1]. Безопасность - это состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества, государства от внутренних и внешних угроз. Исходя из понятия опасности, надежность и безопасность системы связывают не только с

состоянием технических, но и социально-экономических процессов, происходящих из условия их равновесия и способности к устойчивому производству основных системных элементов, обеспечивающих ее функционирование. То есть весь комплекс управления деятельностью технической системы должен быть направлен на сохранение целостности и устойчивости, а именно обеспечение определенной надежной работы системы [2]. Работа любой технической системы может характеризоваться ее эффективностью, под которой понимается совокупность свойств, определяющих способность системы выполнять определенные задачи. Отправной точкой анализа надежности и безопасности технических систем является понятие риска, связанного с данной технологией. Исторический опыт показывает, что, прежде всего риск начали изучать исходя из недополучения намеченных результатов, особенно проявлялось это при товарно-денежных отношениях, конкуренции участников хозяйственного оборота. Для снижения потерь от возможных аварийных ситуаций предусматриваются специальные процедуры, помогающие учесть неопределенности и риски на всех этапах эксплуатации технических систем. Однако, при этом обостряется проблема сохранения баланса экономической целесообразности и социальной приемлемости любых проектов и управленческих решений.

Таким образом, на современном этапе планирования и управления производством важнейшей составляющей обеспечения профессиональной безопасности является система управления рисками [3], то есть процесс принятия и выполнения управленческих решений, направленных на снижение вероятности возникновения неблагоприятного результата и минимизацию возможных потерь, вызванных его реализацией.

Анализ последних исследований и публикаций.

Ученые по-разному трактуют понятие риска. Например, В.М. Гранатуров в [4] определяет риск как деятельность, связанную с преодолением неопределенности в ситуации неизбежного выбора, в процессе которого является возможность количественно и качественно оценить вероятность достижения предусмотренного результата, неудачи и отклонения от цели. В работе [5] утверждают, что риск - вероятность события или группы родственных случайных событий, которые вызывают убытки объекта. Существует различные группы стратегий определения надежности технических систем [6, 7], то есть технического обслуживания и ремонта оборудования, акцентированные или на поддержке рабочего состояния конкретного оборудования, или на сохранении надежности системы с учетом возможных

отказов оборудования, что вызывает потерю или резкое снижение этой надежности. Конечно, во-первых, на основе технической информации (срок службы оборудования, режимы нагрузок, нештатные действия, результаты предварительных испытаний и диагностика) разрабатываются несколько сценариев технического обслуживания и ремонта оборудования, оценивается техническая эффективность и реализуемость каждого из них. На втором этапе технические специалисты прогнозируют остаточный ресурс, а экономисты рассчитывают затраты, которые необходимы для технического обслуживания и ремонта в течение расчетного срока службы. В результате второго этапа прогнозирования надежности избираются возможные варианты решений. На третьем этапе менеджеры на основе механизма управления рисками и с учетом социальной обстановки выбирают оптимальную стратегию и принимают решение: продолжать эксплуатацию или менять оборудование на новое, проводить диагностику или ставить систему мониторинга, делать ремонт и в каком объеме. Однако, несмотря на выбранную стратегию при анализе надежности любой технической системы, в основе принятия управленческих решений лежит оценка риска данного оборудования. Оценка риска является частью процесса менеджмента риска в соответствии с ISO 31 000: 2009 "Risk management - Principles and guidelines" и является структурированным процессом, в рамках которого идентифицируют способы достижения поставленной цели, проводят анализ последствий и вероятности возникновения опасных событий для принятия решения о необходимости обработки риска.

Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы.

Методы исследования рисков не являются универсальным аппаратом, который пригоден для принятия управленческих решений на все случаи жизни. Оценка рисков - это набор математических методов, объединенных общей задачей обоснования наилучших решений. Принципиальными особенностями исследования рисков являются: многогранность задачи выбора; не только количественный, но и качественный (нечеткий) показатель риска, задаваемый в виде требований; при нечеткой постановке задачи на определение стратегии управления рисками большое влияние на выбор метода ее решения влияет предпочтение того или иного показателя. Сложности управления рисками в технических системах обусловлены наличием множества факторов и их взаимной зависимостью. Для таких систем отсутствуют модели и методы для отображения информации о динамике процессов. Турбулентность окружения и изменчивость характера процессов во времени мешают выделению и детальному анализу отдельных элементов системы.

Указанные особенности определяют необходимость оценки надежности технических системах не по отдельным элементам, а для всей системы в целом [8]. Множество факторов системы образует сложную «паутину» связей и состояний, причин и следствий, изменяющихся во времени. Развитие и ход событий в такой многофакторной слабо структурированной системе не является детерминированным. Поэтому для описания и моделирования надежности технических систем в фазовом пространстве вероятностей состояний предлагается применять феноменологические модели. К классу феноменологических моделей можно отнести марковские процессы, которые позволяют отразить связь между выходными и входными параметрами без учета физической сущности процессов в системе. Марковские процессы отражают структуру путем определения переходных вероятностей между состояниями на основе практических данных.

Несмотря на созданный фундамент исследований в этой сфере, отдельные вопросы использования математического аппарата исследования рисков остаются недостаточно изученными. В частности, это касается ряда теоретических вопросов использования математических методов контроля надежности технических систем, методики математического анализа при применении долгосрочного риск-менеджмента субъектов предпринимательства.

Формулирование целей статьи (постановка задачи).

Целью работы является исследование особенностей применения марковских процессов для оценки надежности технических систем, составление алгоритма применения марковского анализа для систем дискретного и непрерывного времени с дискретными состояниями.

Изложение основного материала исследования.

Контроль и диагностика технического состояния оборудования в процессе эксплуатации является одним из элементов оценки технических рисков. При этом контроль материала деталей и узлов выполняется на собранных конструкциях, как правило, без каких-либо демонтажных работ. Он проводится в процессе использования оборудования. Существует много методов оценки рисков, они могут быть количественными и качественными, базироваться на математических, статистических или графических моделях. К сожалению, не существует универсального метода оценки рисков, который бы подходил для оценки безопасности любой технической системы.

Одним из методов количественной оценки рисков, согласно ДСТУ ІЕС / ISO 31010: 2013 «Управление риском. Методы общей оценки риска », является математический аппарат марковских процессов. Известно, что случайный процесс называется марковским, если вероятность перехода системы в новое состояние зависит только от текущего состояния системы и не зависит от того, когда и каким образом система перешла к этому состоянию. Таким образом, данный метод можно использовать для оценки риска (или надежности) технических систем с различной структурой [9], имеющих только два состояния - отказ и восстановление, включая:

- системы с параллельными независимыми компонентами;
- системы с последовательными независимыми компонентами;
- системы с распределенной нагрузкой;
- резервированные системы, включая случай, когда может произойти отказ функций переключения;
- деградирующие системы.

Марковский анализ также может быть использован для расчета эксплуатационной готовности, включая расчет необходимых компонентов запчастей для ремонта, необходимой работоспособности технической системы.

Анализ с помощью марковских процессов основан на понятии «состояния» (например, трудоспособного и нетрудоспособного состояния) и перехода между этими состояниями во времени, предполагая вероятность перехода не только постоянной. Система в целом может существовать в разных состояниях, каждый из которых определяется специфической комбинацией трудоспособного и нетрудоспособного состояний ее элементов. Таким образом, в момент отказа или восстановления элемента система переходит из одного состояния к следующему. Обычно такую модель называют Марковский процесс с дискретными состояниями и непрерывным или дискретным временем.

Случай Марковского анализа для систем дискретного времени с дискретными состояниями. Рассмотрим ситуацию, когда моделируемый процесс характеризуется дискретным временем. Система S имеет n возможных дискретных состояний: S_1, S_2, \dots, S_n . Изменение состояний происходит мгновенно и в строго определенные моменты времени $t_i, i = 1, 2, \dots$. Анализ марковских процессов обычно производится с помощью графа состояний и переходов (рис. 1), который графически изображает не только возможные состояния системы и возможные переходы из состояния в состояние, но также и значение вероятности такого перехода.

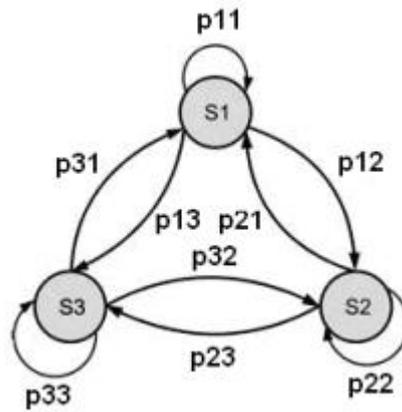


Рис. 1. Граф состояний и переходов

Графу системы, содержащему n вершин, можно поставить в соответствие матрицу размером $n \times n$, элементами которой являются вероятности переходов p_{ij} между вершинами графа, так называемую матрицу вероятностей переходов:

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} p_{11} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \dots & p_{mn} \end{vmatrix}, 0 \leq p_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$$

При этом под переходом понимают изменение одного состояния системы на другое, которое происходит в результате отказа или восстановления элемента системы. Переход может быть также вызван другими событиями, такими как человеческие ошибки, внешние события, реконфигурации программного обеспечения и т.д. Вероятность задержки (то есть элементы главной диагонали) для каждого из состояний, как правило, неизвестна. Ее определяют из условия равенства единицы всех элементов в строке $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$

Пусть в любой момент времени (после любого шага) исследуемая система может находиться в одном из состояний S_1, S_2, \dots, S_n , то есть в результате шага k осуществится одна из полной группы несовместимых событий $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, \dots, S_n^{(k)}$. Обозначив вероятность этих событий для k -го шага через

$$p_1(k) = p(S_1^{(k)}), p_2(k) = p(S_2^{(k)}), \dots, p_j(k) = p(S_j^{(k)}), \dots, p_n(k) = p(S_n^{(k)})$$

Легко видеть, что для каждого шага k

$$p_1(k) + p_2(k) + \dots + p_j(k) + \dots + p_n(k) = 1$$

Вероятности $p_j(k)$, $j = \overline{1, n}$ называют вероятностями состояний.

При оценке риска поломки (аварии) некоторой технической системы под состояниями S_1, S_2, \dots, S_n будем понимать работоспособность системы. Обычно при этом известны вероятности перехода p_{ij} системы за один шаг из состояния S_i к состоянию S_j .

Необходимо определить вероятности состояний системы после k -го шага, то есть $p_j(k)$, $j = \overline{1, n}$.

Математической моделью нахождения вероятностей состояний однородной марковской цепи является рекуррентная зависимость:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1) p_{ij}$$

где $p_j(k)$ - вероятность j -го состояния системы после k -го шага, $j = \overline{1, n}$;

$p_i(k-1)$ - вероятность i -го состояния системы после $(k-1)$ -го шага, $i = \overline{1, n}$;

p_{ij} - вероятности переходов системы из состояния S_i к состоянию S_j ;

n - количество состояний системы.

Продемонстрируем применение Марковского анализа для оценки рисков некоторой системы, которая может находиться в работоспособном и неработоспособном состоянии, причем в случае нетрудоспособности одного из элементов происходит отказ системы в обслуживании, но данный элемент может восстанавливаться. Состояние системы в начальный момент времени $t=0$ называть начальным состоянием. После отказа система может быть восстановлена до первоначального состояния.

Конечно, система начинает функционировать в момент времени $t=0$ в работоспособном состоянии, в котором все элементы системы функционируют, и переходит к неработоспособному состоянию через другие функциональные состояния, имеющие меньшее количество функционирующих элементов. Подводя итог вышесказанному, сформулируем **методику оценки рисков по схеме дискретных марковских процессов**.

1. Зафиксировать свойство системы (определить состояния системы S_1, S_2, \dots, S_n). Это зависит от целей исследования. Например, если исследуются загрузки системы, то как свойство избирается степень загрузки.

2. Определить конечное число возможных состояний системы.

3. Составить и разметить граф состояний.

4. Определить исходное состояние.
5. По рекуррентной зависимости определить вероятности $p_j(k)$, $j = \overline{1, n}$.

Случай Марковского анализа для систем непрерывного времени с дискретными состояниями.

Непрерывным марковским процессом является случайный процесс, для которого при $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{n+1}$ выполняется условие:

$$P(S(t_{n+1}) = S_{n+1} | S(t_1) = S_1, \dots, S(t_n) = S_n) = P(S(t_{n+1}) = S_{n+1} | S(t_n) = S_n)$$

В этом случае, как и в случае процесса с дискретным временем, рассматривается ряд дискретных состояний S_1, S_2, \dots, S_n , однако переход системы из состояния в состояние может происходить в любой момент времени. Обозначим $p_i(k)$ - вероятность того, что в момент времени t система будет находиться в состоянии S_i ($i = 1, \dots, n$). Очевидно, для любого момента t сумма вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1$$

В этом случае задаются не вероятности переходов, а интенсивности переходов:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}$$

где $p_{ij}(\Delta t)$ - вероятность того, что система, которая находилась в момент времени t в состоянии S_i , за время Δt перейдет в состояние S_j

Рассмотрим ситуацию, когда некоторая техническая система состоит из двух последовательных элементов, то есть для надежной работоспособности системы оба элемента должны работать. Элементы могут быть в работоспособном состоянии или в состоянии отказа. Работоспособность всей системы зависит от состояния составляющих элементов. В данном случае возможны следующие состояния элементов:

- состояние 0. Оба элемента находятся в работоспособном состоянии;
- состояние 1. Один элемент отказал и находится на восстановлении, а другой находится в работоспособном состоянии;
- состояние 2. Оба элемента отказали и находятся на восстановлении.

Если интенсивность отказа каждого элемента принять равной λ , а интенсивность обновлений равной μ , и они являются постоянными, то диаграмму состояния переходов можно представить в следующем виде (рис. 2). При этом интенсивность перехода из состояния 0 в состояние 1 равна 2λ , поскольку отказ любого из двух элементов приводит систему в состояние 1. Предположения, связанные с вероятностью перехода, можно сформулировать следующим образом: переходы состояний являются статистически независимыми событиями и интенсивность отказов λ и интенсивность обновлений μ постоянны.

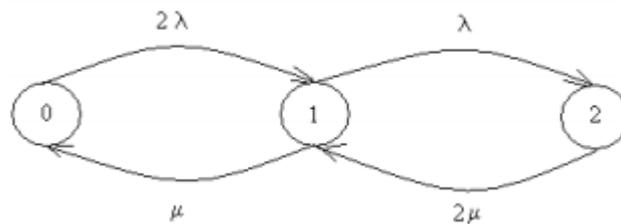


Рис. 2. Граф состояний и переходов

Матрица переходов для данной системы принимает следующий вид:

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} -2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & -(\lambda + \mu) & \lambda \\ 0 & 2\mu & -2\mu \end{vmatrix}$$

В этом случае система уравнений для устойчивого состояния имеет вид:

$$\begin{cases} -2\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \\ 2\lambda p_0 - (\lambda + \mu) p_1 + 2\mu p_2 = 0 \\ \lambda p_1 - 2\mu p_2 = 0 \\ p_0 + p_1 + p_2 = 1 \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений будут следующее:

$$p_0 = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}, \quad p_1 = \frac{2\lambda\mu}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}, \quad p_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$$

Очевидно, что необходимую работоспособность системы можно выразить как

$$A(t) = p_0 + p_1 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{(\mu + \lambda)^2}$$

Аналогичный подход можно применять для оценки рисков технических систем, состоящих из несколько элементов, включенных параллельно или последовательно, которые имеют определенные причины для отказов и восстановлений. Сформулируем методику оценки рисков технических систем по схеме непрерывных марковских процессов:

1. Определить состояния системы и интенсивности переходов (отказа и восстановления).

2. Составить и разметить граф состояний.

3. Составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова. Число уравнений в системе равно числу состояний. В левой части уравнения стоит сумма произведений вероятностей всех состояний, из которых идут стрелки к i -му состоянию, на интенсивности соответствующих потоков минус сумма интенсивностей всех потоков, выводящих систему из данного (j -го) состояния, добавленную на вероятность данного (j -го) состояния. В правой части уравнения стоит 0

4. Определить начальные условия и решить систему дифференциальных уравнений.

Выводы.

Для успешного применения математического аппарата марковских процессов с дискретными состояниями для оценки надежности любой технической системы необходимо проработать полный список всех состояний системы (например, полное функционирование, частичное функционирование (ухудшение состояния), отказ, восстановление. Также необходимо понимать возможные переходы из состояния в состояние системы (например, при отказе шины автомобиля необходимо исследовать состояние запасного колеса и, следовательно, частоты его проверок) и знать вероятность переходов (p_{ij}) для систем с дискретным временем или интенсивность отказа (λ) и интенсивность восстановления (μ) для систем с непрерывным временем.

Главным преимуществом применения методов марковского анализа с учетом всех ограничений является то, что стратегии технического обслуживания, например, приоритеты восстановления, можно легко смоделировать. Кроме того, в модели можно отразить порядок, в котором происходят многократные отказы. Однако, данный подход к оценке рисков технических систем имеет ряд недостатков. Сначала нами предполагалось, что

существует только два возможных состояния элементов системы - отказ и восстановление, что существенно уменьшает область применения данного метода, и вероятности интенсивности переходов постоянны. Также применение данного метода и интерпретация результатов требует определенной специальной подготовки и квалификационного уровня персонала.

Другой проблемой является то, что количество состояний системы и возможных переходов возрастает с увеличением количества элементов системы.

В случае большого количества состояний технической системы, существует большая вероятность ошибок и неточностей при применении данного метода оценки безопасности системы.

Таким образом, прогнозирование надежности технических систем с помощью математического аппарата марковских процессов повысит эффективность их работы, обеспечит профессиональную безопасность работников, а следовательно, сократит экономические риски предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Микрюков В.Ю. Безопасность жизнедеятельности: учебник. Ростов н/Д : Феникс, 2007. 557 с.
2. Боронина Л.Н. Основы управления проектами: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2015. 112 с.
3. Лапуста М.Г., Шаршукова Л.Г. Риски в предпринимательской деятельности. М.: ИНФРА-М, 1998. 225 с.
4. Гранатуров В.М. Экономический риск: сущность, методы измерения, пути снижения: учебное пособие. М.: «Дело и Сервис», 2002. 154 с.
5. Тепман Л.Н. Управление рисками в условиях финансового кризиса/ Л.Н. Тепман. М. : ЮНИТИ, 2011. 295 с
6. Тимошенко С., Симонов Б., Горошко В. Основы теории надежности: учебник и практикум. М. : Юрайт, 2017. 446 с.
7. Каштанов В.А. Теория надежности сложных систем /В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – 2-е изд, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 608 с.
8. Bushuyev S., Jaroshenko R. Proactive Program Management for Development National Finance System in Turbulence Environment // Procedia - Social and Behavioral Sciences, Published by Elsevier Ltd 2013. № 74. P. 61-70.
9. Application of Markov techniques. - The International Standard IEC 61165 (1995-01). 45 p.

10. Вечканов Г.С. Экономическая безопасность: учебное пособие / Г. С. Вечканов. - СПб.: Вектор, 2005. - 251 с.