Живучесть, надежность, безопасность

УДК 656.25-192

В. И. Шаманов, д-р техн. наук

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Московский государственный университет путей сообщения
Императора Николая II

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В статье приведены результаты разработки математических моделей надежности для систем железнодорожной автоматики и телемеханики на этапе использования их по назначению – с момента окончания периода приработки после пуска в эксплуатацию системы до списания. Созданные граф-модели учитывают защитные отказы и четыре состояния: новое, стареющее, предотказное, отказ. Они обеспечили возможность разработки системы дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова для общего случая технической эксплуатации системы и при функционировании ее в наиболее вероятном режиме работы. В первой модели все работы, направленные на восстановление ресурса системы (работы по модернизации, профилактические работы, капитальные ремонты и замены устройств) объединены в одно состояние – ремонты. При синтезировании второй модели дополнительно учтено, что переходы из стареющего состояния в новое и из состояния отказа в предотказное, а также появление отказов при выполнении работ по модернизациям систем, заменам устройств и ремонтам на месте эксплуатации маловероятны. При известных численных значениях интенсивностей переходов разработанные модели обеспечивают возможность вычислять вероятности нахождения системы в любом из рассматриваемых состояний непосредственной подстановкой этих значений в найденные системы дифференциальных уравнений.

Разработаны также модели на базе стохастических матриц, использующих вероятности переходов из одного состояния в другое. Последовательность изменения состояний во времени описывается марковской цепью со стационарными вероятностями переходов. Математическая модель процесса включает в себя вектор-столбец, задающий вероятностное распределение состояний в нулевой момент времени, и стохастическую матрицу вероятностей перехода из одного состояния в другое. Такие модели наглядны и являются наиболее полными, если учитываются переходы между всеми возможными или рассматриваемыми состояниями объекта. Приведен пример использования модели на базе стохастических матриц.

системы автоматики и телемеханики на железных дорогах; надежность; граф-модель; состояния системы; переходы между состояниями; дифференциальные уравнения Колмогорова; стохастическая матрица вероятностей переходов; вероятности пребывания системы в конкретных состояниях

Введение

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) относятся к сложным техническим системам, требующим относительно больших затрат на эксплуатацию, а их отказы вызывают потери в процессе движения поездов и могут привести к катастрофическим последствиям [1]. Для разработки моделей процесса эксплуатации таких систем используется общая теория управляемых случайных процессов, одним из прикладных направлений которой является теория эксплуатации сложных систем [2, 3]. Наиболее фундаментальными по проблеме надежности, технического обслуживания и технической эксплуатации систем ЖАТ являются работы [4, 5]. Вопросы надежности систем ЖАТ с точки зрения их технологической эффективности разрабатываются коллективом авторов [6].

Системы ЖАТ являются высоконадежными. Коэффициент готовности устройств релейной автоблокировки на двухпутном перегоне, например, может превышать величину 0,9997 [7]. В этой области различные законы рспределения вероятностей могут дать с достаточной для практики точностью одинаковый результат. Этим объясняется возможность использования простого однопараметрического экспоненциального закона при анализе и расчетах надежности данных систем. Однако при прогнозировании поведения таких систем при повышении их ресурса за счет каких-либо мер или при оценке мероприятий по повышению надежности в пределах, выходящих за значение принятого ресурса, необходимы другие законы распределения с учетом физики процессов старения, изнашивания и разрегулирования.

Поведение сложных технических систем удобно описывать с использованием математического аппарата процессов Маркова. Однако надежность систем при проявлении деградационных отказов лучше описывается так называемыми «стареющими законами» [8], учитывающими далекую предысторию. Марковскую аппроксимацию процессов можно обеспечить за счет нелинейного преобразования – квантования по уровню случайных функций, характеризующих изменение во времени обобщенного параметра устройства или системы [9, 10].

Применение процессов Маркова обусловлено относительной простотой и совершенством математического аппарата, а также достаточным соответствием эмпирических и теоретических результатов при описании поведения сложных систем со значительным количеством элементов, каждый из которых имеет приблизительно экспоненциальное распределение времени безотказной работы [11]. Этот вид аппроксимации в настоящее время используется не только для моделирования совместных независимых и взаимосвязанных внезапных и постепенных отказов [12], но и при моделировании различных видов технического обслуживания. Применение марковской аппроксимации позволяет не различать параметр потока отказов и интенсивность отказов при исследовании управления режимами эксплуатации сложных систем, что существенно упрощает решение оптимизационных задач.

1 Математическая модель функционирования системы

Системы ЖАТ долговечны. Интересен период их жизненного цикла от пуска в работу до списания. Обобщенная модель состояний эксплуатируемой технической системы ЖАТ с учетом опасных и защитных отказов на этом отрезке времени приведена в [13].

Уровень развития теории систем ЖАТ позволяет ставить оптимизационные задачи только по защитным отказам [14]. Граф-модель, учитывающая динамику появления защитных отказов и восстановлений после пуска ее в эксплуатацию до списания, полученная из обобщенной модели [13], показана на рис. 1.

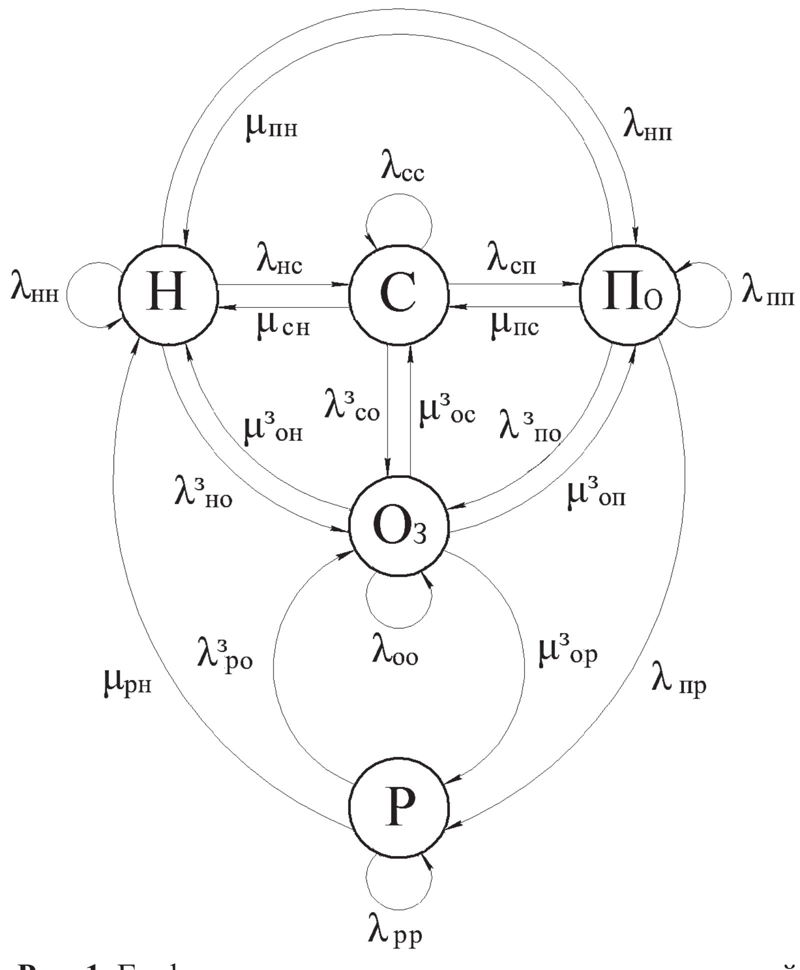

Рис. 1. Граф-модель защитных отказов и восстановлений

В этой модели Н – новое состояние системы после пуска в эксплуатацию, когда все ее параметры, определяющие надежность, находятся в пределах, предписанных на момент пуска системы для применения по назначению.

Сразу после пуска системы в эксплуатацию начинается расходование ее ресурса под действием деградационных процессов. Ухудшение состояния элементов системы в конечном итоге приводит к появлению постепенных отказов. Вероятность появления внезапных отказов также растет по мере старения элементов [5]. Поэтому в разработанной граф-модели выделено стареющее состояние С, когда действие деградационных процессов приводит к заметному ухудшению некоторых параметров, определяющих надежность системы.

Предотказное состояние $П_о$ системы наступает, когда предотказного состояния достигает хотя бы один ее элемент. В состояние защитного отказа $О_з$ система переходит, когда в ней отказывает хотя бы один элемент. Переход системы из состояния отказа $О_з$ в новое состояние Н или в стареющее состояние С зависит от доскональности и качества работ по восстановлению ее работоспособности.

Модернизация системы ЖАТ, замены устройств и капитальные ремонты на месте эксплуатации в ней относительно редки, отсюда невелика вероятность появления отказов, вызванных этими работами. Поэтому в граф-модели в одно состояние системы Р (ремонт) сведены все работы, направленные на восстановление ресурса системы.

Величины интенсивностей переходов $\lambda_{нс}$, $\lambda_{нп}$, $\lambda_{сп}$, $\lambda_{со}^{з}$, $\lambda_{по}^{з}$, $\lambda_{но}^{з}$, $\lambda_{пр}$ зависят от скорости протекания деградационных процессов в элементах системы. Интенсивности переходов $\lambda_{но}^{з}$ и $\lambda_{со}^{з}$ включают в себя в основном интенсивности внезапных отказов. Однако интенсивность переходов $\lambda_{со}^{з}$ может включать в себя и интенсивности постепенных отказов, когда предотказное состояние стареющего объекта по каким-то причинам не было обнаружено вовремя.

Ошибки при выполнении работ по модернизации и ремонту могут вызывать и опасные, и защитные отказы системы. Появление защитных отказов при таких работах учтено в граф-модели интенсивностью переходов $\lambda_{ро}^{з}$.

Интенсивностями $\lambda_{нн}$, $\lambda_{сс}$, $\lambda_{пп}$, $\lambda_{оо}$, $\lambda_{рр}$ учитывается то, что за рассматриваемый промежуток времени состояние системы может не измениться и она останется в прежнем состоянии.

Величины интенсивностей восстановления $\mu_{пс}$, $\mu_{пн}$, $\mu_{ос}^{з}$, $\mu_{он}^{з}$, $\mu_{оп}^{з}$, $\mu_{ор}^{з}$, $\mu_{рн}$, $\mu_{сн}$ зависят от ремонтопригодности системы, квалификации обслуживающего персонала, расстояния между местом дислокации системы и работником, доступности персонала во времени и пространстве к месту отказа.

Процесс функционирования рассматриваемой технической системы можно описать системой дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова:

$$
\left.
\begin{aligned}
& dP_{\text{н}}(t)/dt = -(\lambda_{\text{нс}} + \lambda_{\text{нп}} + \lambda^{\text{з}}_{\text{но}})P_{\text{н}}(t) + \mu_{\text{сн}}P_{\text{с}}(t) + \\
& + \mu_{\text{пн}}P_{\text{п}}(t) + \mu^{\text{з}}_{\text{он}}P^{\text{з}}_{\text{о}}(t) + \mu_{\text{рн}}P_{\text{р}}(t); \\
& dP_{\text{с}}(t)/dt = \lambda_{\text{нс}}P_{\text{н}}(t) - (\lambda_{\text{сп}} + \lambda^{\text{з}}_{\text{со}} + \mu_{\text{сн}})P_{\text{с}}(t) + \mu_{\text{пс}}P_{\text{п}}(t) + \mu^{\text{з}}_{\text{ос}}P^{\text{з}}_{\text{о}}(t); \\
& dP_{\text{п}}(t)/dt = \lambda_{\text{нп}}P_{\text{н}}(t) + \lambda_{\text{сп}}P_{\text{с}}(t) - (\lambda^{\text{з}}_{\text{по}} + \mu_{\text{пн}} + \mu_{\text{пс}} + \lambda_{\text{пр}})P_{\text{п}}(t) + \mu^{\text{з}}_{\text{оп}}P^{\text{з}}_{\text{о}}(t); \\
& dP^{\text{з}}_{\text{о}}(t)/dt = \lambda^{\text{з}}_{\text{но}}P_{\text{н}}(t) + \lambda^{\text{з}}_{\text{со}}P_{\text{с}}(t) + \lambda^{\text{з}}_{\text{по}}P_{\text{п}}(t) + \lambda^{\text{з}}_{\text{ро}}P_{\text{р}}(t) - \\
& - (\mu^{\text{з}}_{\text{он}} + \mu^{\text{з}}_{\text{ос}} + \mu^{\text{з}}_{\text{оп}} + \mu^{\text{з}}_{\text{ор}})P^{\text{з}}_{\text{о}}(t); \\
& dP_{\text{р}}(t)/dt = \lambda_{\text{пр}}P_{\text{п}}(t) - (\lambda^{\text{з}}_{\text{ро}} + \mu_{\text{рн}})P_{\text{Р}}(t) + \mu^{\text{з}}_{\text{ор}}P^{\text{з}}_{\text{о}}(t); \\
& P_{\text{н}}(t) + P_{\text{с}}(t) + P_{\text{п}}(t) + P^{\text{з}}_{\text{о}}(t) + P_{\text{р}}(t) = 1.
\end{aligned}
\right\} \quad (1)
$$

В этих уравнениях вероятности $P_{\text{н}}$, $P_{\text{с}}$, $P_{\text{п}}$, $P_{\text{р}}$, $P^{\text{з}}_{\text{о}}$ – это вероятности пребывания системы в соответствующих состояниях.

Получающиеся в общем виде в результате решения этой системы уравнений формулы для вычисления вероятностей $P_{\text{н}}(t), P_{\text{с}}(t), P_{\text{п}}(t), P^{\text{з}}_{\text{о}}(t)$ и $P_{\text{р}}(t)$ по значениям интенсивностей переходов из состояния в состояние громоздки и потому неудобны для практического применения. Находить рассматриваемые вероятности при известных численных значениях интенсивностей переходов удобнее непосредственной подстановкой этих значений в систему уравнений (1) с последующим решением на ЭЦВМ.

2 Модель функционирования системы после приработки

Период приработки после пуска системы в эксплуатацию, при котором проявляются скрытые дефекты изготовления, строительства и монтажа, для систем ЖАТ составляет 3–4 месяца. Наиболее показательное для проверки надежности время эксплуатации этих систем до списания – 20–30 и более лет. Следовательно, первоначальным периодом приработки системы можно пренебречь. Можно пренебречь также и относительно редкими отказами, вызываемыми работами по ремонту системы, и периодами приработки в устройствах после проведения этих работ.

Можно не учитывать переходы из состояния С в состояние Н, так как работы по техническому обслуживанию очень редко способствуют восстановлению ресурса полностью. Недоброкачественное выполнение работ по устранению отказов в состоянии $\text{О}_{\text{з}}$, в результате чего система переходит в предотказное состояние $\text{П}_{\text{о}}$, также относительно редко.

Граф-модель функционирования системы после периода приработки, полученная с учетом этих условий, показана на рис. 2.

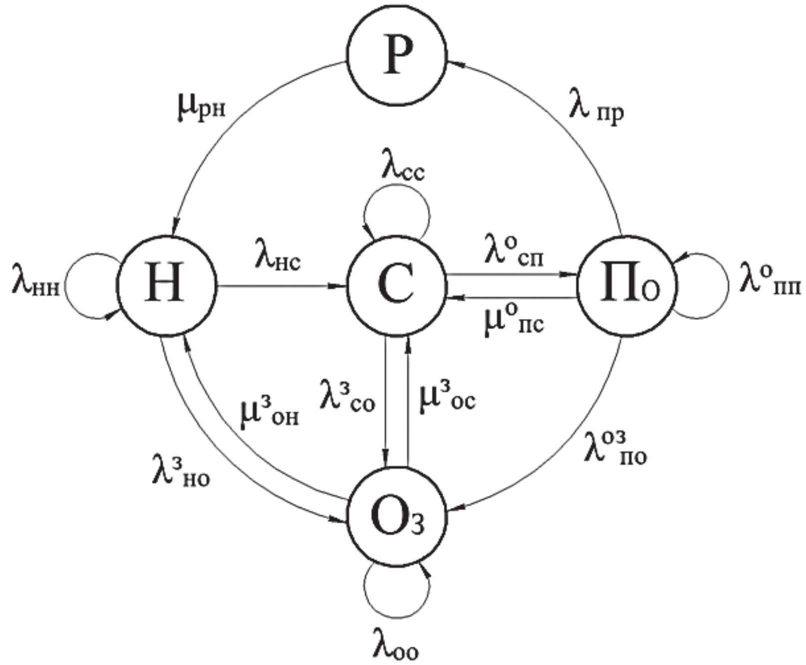

Рис. 2. Граф-модель функционирования системы после периода приработки

Для такой модели система дифференциальных уравнений заметно упрощается. В этой модели наибольший интерес представляют наиболее вероятные процессы изменения состояний системы по схеме С – $\text{П}_\text{о}$ – $\text{О}_\text{з}$. Система дифференциальных уравнений при этом:

$$\left.\begin{aligned}
&dP_\text{с}(t)/dt = -(\lambda_\text{сп}(t) + \lambda^\text{з}_\text{со}(t))\; P_\text{с}(t) + \mu_\text{пс}(t) P_\text{п}(t) + \mu^\text{з}_\text{ос}(t) P^\text{з}_\text{о}(t);\\
&dP_\text{п}(t)/dt = \lambda_\text{сп}(t) P_\text{с}(t) - (\lambda^\text{з}_\text{по}(t) + \mu_\text{пс}(t))\; P_\text{п}(t);\\
&dP^\text{з}_\text{о}(t)/dt = \lambda^\text{з}_\text{со}(t) P_\text{с}(t) + \lambda^\text{з}_\text{по}(t) P_\text{п}(t) - \mu^\text{з}_\text{ос}(t) P^\text{з}_\text{о}(t).
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Вероятность пребывания системы в любом из трех состояний при начальных условиях $P_\text{с}(0) = 1,\;\; P_\text{п}(0) = 0,\;\; P^\text{з}_\text{о}(0) = 0$ находится решением системы уравнений (2):

$$P_c(t) = a_1 + b_1 e^{-x_1 t} + c_1 e^{-x_2 t}; \qquad (3)$$

$$P_\text{п}(t) = a_2 + b_2 e^{-x_1 t} + c_2 e^{-x_2 t}; \qquad (4)$$

$$P^\text{з}_\text{о}(t) = 1 - P_\text{с}(t) - P_\text{п}(t), \qquad (5)$$

где x_1, x_2 – корни характеристического уравнения

$$\begin{aligned}
&x^2 + \left[(\lambda_\text{сп} + \lambda^\text{з}_\text{со} + \lambda^\text{з}_\text{по} + \mu^\text{з}_\text{ос} + \mu_\text{пс})\; (1 + \mu_\text{пс}) + \lambda_\text{сп}\mu^\text{з}_\text{ос}\right] x -\\
&- \mu_\text{пс}\left[(\lambda^\text{з}_\text{со} + \mu^\text{з}_\text{ос})\; (\lambda^\text{з}_\text{по} + \mu_\text{пс}) + \lambda_\text{сп}(\lambda^\text{з}_\text{по} + 2\mu^\text{з}_\text{ос})\right] = 0.
\end{aligned} \qquad (6)$$

Промежуточные переменные, принятые для упрощения записи формул (3) – (5):

$$a_1 = \left[(l_1 d_2 / x_1 - l_2 d_1 / x_2)\mu^{з}_{\text{ос}}\right] / (l_1 d_2 - l_2 d_1); \quad (7)$$

$$a_2 = \left[\mu^{з}_{\text{ос}} d_1 d_2 (1/x_1 - 1/x_2)\right] / (l_1 d_2 - l_2 d_1); \quad (8)$$

$$b_1 = \{[(1 - a_1)\, d_2 + a_2 l_2]\; l_1\} / (l_1 d_2 - l_2 d_1); \quad (9)$$

$$b_2 = \{[(1 - a_1)\, d_2 + a_2 l_2]\; d_1\} / (l_1 d_2 - 1_2 d_1); \quad (10)$$

$$c_1 = \{[(a_1 - 1)\, d_1 - a_2 l_1]\; l_2\} / (l_1 d_2 - l_2 d_1); \quad (11)$$

$$c_2 = \{[(a_1 - 1)\, d_1 - a_2 l_1] d_2\} / (l_1 d_2 - l_2 d_1); \quad (12)$$

$$d_1 = \lambda_{\text{сп}}(\mu_{\text{пс}} - x_1); \quad (13)$$

$$d_2 = \lambda_{\text{сп}}(\mu_{\text{пс}} - x_2); \quad (14)$$

$$l_1 = (x_1 - \lambda^{з}_{\text{по}} - \mu_{\text{пс}})\,(x_1 - \mu_{\text{пс}}); \quad (15)$$

$$l_2 = (x_2 - \lambda^{з}_{\text{по}} - \mu_{\text{пс}})\,(x_2 - \mu_{\text{пс}}). \quad (16)$$

Экспоненциальные функции (3) – (5) асимптотически приближаются к предельным вероятностям состояний:

$$P_{\text{с}} = \lim_{t\to\infty} P_{\text{с}}(t) = 1 / \Big[1 + (\lambda_{\text{сп}} + \lambda^{з}_{\text{со}}) / \mu^{з}_{\text{ос}} + \lambda_{\text{сп}} / (\lambda^{з}_{\text{по}} + \mu_{\text{пс}}) - - \lambda_{\text{сп}}\mu_{\text{пс}} / (\lambda^{з}_{\text{по}}\mu^{з}_{\text{ос}} + \mu_{\text{пс}}\mu^{з}_{\text{ос}})\Big]; \quad (17)$$

$$P_{\text{п}} = \lim_{t\to\infty} P_{\text{п}}(t) = 1 / \Big[1 + \lambda^{з}_{\text{по}} / \mu^{з}_{\text{ос}} + (\lambda^{з}_{\text{по}} + \mu_{\text{пс}}) / \lambda_{\text{сп}} + + \lambda_{\text{сп}}(\lambda^{з}_{\text{по}} + \mu_{\text{пс}}) / (\lambda_{\text{сп}}\mu^{з}_{\text{ос}})\Big]; \quad (18)$$

$$P^{з}_{\text{о}} = \lim_{t\to\infty} P^{з}_{\text{о}}(t) = 1 - 1 / \{1 + \lambda_{\text{сп}}(\lambda^{з}_{\text{по}} - \lambda^{з}_{\text{со}}) / [\mu^{з}_{\text{ос}}(\lambda_{\text{сп}} + \lambda^{з}_{\text{по}} + \mu_{\text{пс}})] + \lambda^{з}_{\text{со}} / \mu^{з}_{\text{ос}}\}, \quad (19)$$

отсюда вероятность безотказной работы устройств по защитным отказам с учетом того, что для реальных устройств ЖАТ $\lambda_{\text{сп}} << \mu_{\text{пс}}$ и $\lambda^{з}_{\text{со}} << \mu^{з}_{\text{ос}}$:

$$P = P_{\text{с}} + P_{\text{п}} = 1 / \left[1 + \lambda^{з}_{\text{со}} / \mu^{з}_{\text{ос}} + \lambda^{з}_{\text{по}}\lambda_{\text{сп}} / \mu^{з}_{\text{ос}}\mu_{\text{пс}} - \lambda^{з}_{\text{со}}\lambda_{\text{сп}} / \mu^{з}_{\text{ос}}\mu_{\text{пс}}\right]. \quad (20)$$

Полученные формулы позволяют определять численные значения наиболее вероятных состояний системы с точки зрения оценки качества ее функционирования без использования ЭЦВМ.

3 Матричные модели надежности

Матричные модели переходов между состояниями наглядны и наиболее полны, когда учитываются переходы между всеми возможными или рассматриваемыми состояниями объекта. Такой моделью можно описать, например, процесс эксплуатации рельсовых линий как каналов передачи информации в системах ЖАТ. Модель удобна для анализа влияния состояния рельсовой линии на показатели безотказности ее токопроводящих изолирующих элементов, которые являются деталями верхнего строения пути и в значительной степени определяют надежность рельсовых цепей [5].

Процесс изменения состояния верхнего строения пути в результате действия деградационных процессов и выполнения ремонтных работ можно представить как процесс изменения во времени состояний стареющей системы. Состояние путей определяется оценками «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо» и «отлично», которые устанавливаются ежемесячно для каждого километра железнодорожного пути по результатам автоматизированного контроля. Пронумеруем указанные оценки цифрами соответственно 2, 3, 4, 5.

Система, имеющая S состояний $\{S_i: \;\; i=\overline{2,\;5}\}$, проверяется в дискретные равноотстоящие моменты времени $t = 0, 1, \ldots$, в результате чего становится известным одно из ее состояний $i \in S$. Последовательность состояний $\{S_t: \;\; t=0,\;\; 1,\ldots\}$ описывается марковской цепью со стационарными вероятностями переходов

$$p_{ij} = P\{S_{t+1} = j \,/\, S_t = i\}, \tag{21}$$

удовлетворяющими условиям

$$p_{ij} \geq 0\,,\;\; \sum_{j=2}^{5} p_{ij} = 1\,,\;\; p_{52} > 0\,,\;\; p_{25} > 0\,. \tag{22}$$

Математическая модель процесса включает в себя вектор-столбец, задающий вероятностное распределение состояний в нулевой момент времени

$$\boldsymbol{P}_i(0) = \left\| p_5(0),\;\; p_4(0),\;\; p_3(0),\;\; p_2(0)\;\right\|^{\mathrm{T}} \tag{23}$$

и стохастическую матрицу вероятностей перехода из одного состояния в другое:

$$\boldsymbol{P}_{ij} = \left\| p_{ij} \right\| = \begin{Vmatrix} p_{55} & p_{54} & p_{53} & p_{52} \\ p_{45} & p_{44} & p_{43} & p_{42} \\ p_{35} & p_{34} & p_{33} & p_{32} \\ p_{25} & p_{24} & p_{23} & p_{22} \end{Vmatrix}. \quad (24)$$

Анализ процесса и планирование работ осуществляются обычно на ограниченном отрезке времени, когда матрицу $\left\| p_{ij} \right\|$ можно считать однородной, а систему – статистически устойчивой.

Численные значения членов матрицы переходных вероятностей (24) зависят от стратегии поведения обслуживающего персонала. Стратегии различаются объемом и местом проведения профилактических и ремонтных работ, обеспечивающих повышение балльной оценки состояния пути и зависящей от этого состояния надежности элементов рельсовой цепи.

В качестве примера численных оценок вероятностей p_{ij} и $p_i(0)$ можно привести данные для одного из участков железных дорог Казахстана [5]:

$$\left\| p_{ij} \right\| = \begin{Vmatrix} 0,60 & 0,22 & 0,17 & 0,01 \\ 0,31 & 0,33 & 0,33 & 0,03 \\ 0,12 & 0,17 & 0,60 & 0,03 \\ 0,02 & 0,26 & 0,44 & 0,28 \end{Vmatrix}; \left\| p_i(0) \right\| = \begin{Vmatrix} 0,26 \\ 0,19 \\ 0,43 \\ 0,12 \end{Vmatrix}.$$

На разных участках численные значения p_{ij} могут различаться в несколько раз. Мало меняются только вероятности p_{52} и p_{25}.

Описываемый процесс является эргодическим, поскольку из каждого состояния можно попасть в любое другое состояние и предельные значения вероятностей состояний не зависят от начальных условий. Для эргодических цепей предельные вероятности могут быть найдены согласно теореме Маркова [8], когда матрица-строка искомых вероятностей получается путем возведения матрицы переходов в достаточно большую степень. Это относительно непростой путь, но использование ЭЦВМ помогает преодолеть данную трудность.

Заключение

Системы автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте во время использования их по назначению меняют свое состояние от нового до состояния отказа, проходя через стареющие и предотказные состояния. Интенсивности отказов и восстановлений зависят от качества разработки и изготовления системы, строительных работ, а также от условий эксплуатации и качества технической эксплуатации.

Автором статьи разработаны математические модели надежности системы ЖАТ на этапе ее эксплуатации с использованием графа-модели защитных отказов и восстановлений, дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова и стохастических матриц вероятностей переходов. Они позволяют определять вероятности пребывания системы в каждом из ее состояний при известных численных значениях интенсивностей отказов и восстановлений.

Данные математические модели надежности могут быть использованы для анализа уровня безотказности и ремонтопригодности системы при ее разработке, а также при анализе качества и корректировке способов ее технической эксплуатации.

Библиографический список

1. Сапожников Вал. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 240 с.
2. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М. : Иностранная литература, 1960. – 412 с.
3. Майн Х. Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С. Осаки. – М. : Наука, 1977. – 176 с.
4. Брейдо А. И. Организация обслуживания устройств железнодорожной автоматики и связи / А. И. Брейдо, В. А. Овсянников. – М. : Транспорт, 1983. – 208 с.
5. Шаманов В. И. Теория и методы управления технической эксплуатацией систем интервального регулирования движения поездов : дис. … д-ра техн. наук / В. И. Шаманов. – Иркутск : ИрИИТ, 1997. – 423 с.
6. Горелик А. В. Модели надежности технологической эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики /А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 143–155.
7. Шаманов В. И. Вероятностные модели надежности систем интервального регулирования движения поездов / В. И. Шаманов, В. П. Суров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2004. – № 3. – С. 63–70.
8. Баруча-Рид А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения / А. Т. Баруча-Рид. – М. : Наука, 1969. – 511 с.
9. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М. : Наука, 1985. – 328 с.
10. Богданофф Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф. Козин. – М. : Мир, 1989. – 344 с.
11. Маньшин Г. Г. Управление режимами профилактик сложных систем / Г. Г. Маньшин. – Минск : Наука и техника, 1986. – 222 с.
12. Коваленко И. Н. Методы расчета высоконадежных систем / И. Н. Коваленко, Н. Ю. Кузнецов. – М. : Радио и связь, 1988. – 176 с.

13. Шаманов В. И. Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 163–179.
14. Сапожников Вал. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.

Victor I. Shamanov
«Automatics, telemechanics and communication on railway transport» department,
Moscow state university of railway engineering

Mathematical models of reliability of railway automation and telemechanics systems

The article presents the results of developing of mathematical models of reliability for systems of railway automatics and telemechanics, at the stage of use by the end of the period after commissioning of the system to the cancellation, taking into account the protection failures and four system states: the new, aging, pre-failure state, failure. Created graph models of protection failures and recoveries had supplied an opportunity to develop a system of differential equations of A. N. Kolmogorov for the general case of technical operation of the system and the functioning of the system in the most likely mode of its operation. When synthesizing the second model author takes into account that the state transitions of aging to new and state of failure to pre-failure state, and the emergence of failures during the performance of modernization of the systems, equipment replacements and on-site repair are unlikely. Under certain numerical values of transitions intensity developed models allow to calculate the probability of finding the system in any of the states by substituting these values in the points of a system of differential equations.

Also author has developed a model based on stochastic matrices, using the probabilities of transitions from one state to another. The sequence of changes of the state in time is described by a Markov chain with stationary transition probabilities. The mathematical model of the process includes a column vector that specifies the probabilistic distribution of the states at time zero, and the stochastic matrix of transition probability from one state to another. Such models are evident and are the most complete, when the transition between all possible states of an object or pending is taken into account. There is an example of the use of models based on stochastic matrices.

systems of automation and telemechanics on railways, reliability; graph model; system state; state transitions; Kolmogorovs differential equations; stochastic matrix of transition probabilities; the probability of stay of system in a certain state

References

1. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Shamanov V. I. (2003). Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems [Nadezhnost' sistem zheleznodo-rozhnoj avtomatiki, telemekhaniki i svyazi]. Moscow, Marshrut Publ., 240 p.
2. Bellman R. (1960). Dynamic programming [Dinamicheskoe programmirovanie]. Moscow, Inostrannaya literutura Publ., 412 p.
3. Main X., Osaki S. (1977). Markov decicion making processes [Markovskie processy prinyatiya reshenij]. Moscow, Nauka Publ., 176 p.
4. Brei'do A. I., Ovsiannikov V. A. (1983). Organization of railway automation and communication maintenance [Organizaciya obsluzhivaniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i svyazi]. Moscow, Transport Publ., 208 p.
5. Shamanov V. I. (1997). Theory and methods of interval train traffic regulation operation control, thesis [Teoriya i metody upravleniya tekhnicheskoj ehkspluataciej sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. Irkutsk, IRGUPS, 423 p.
6. Gorelik A. V., Nevarov P. A., Zhuravlev I. A., Veselova A. S. (2015). Reliability models of technical efficiency of railway automation and remote control systems [Modeli nadezhnosti tekhnologicheskoj ehffektivnosti sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on transport, vol. 2, issue 2, pp. 143–155.
7. Shamanov V. I., Surov V. P. (2004). Probability models of interval train traffic regulation systems reliability [Veroyatnostnye modeli nadyozhnosti sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov]. Modern technologies. Systematic analysis. Simulation, issue 3, pp. 63–70.
8. Barucha-Rid A. T. (1969). Elements of Markov process theory and their implementations [Elementy teorii markovskih processov i ih prilozheniya]. Moscow, Nauka Publ., 511 p.
9. Barlou R., Proshan F. (1985). Statistic theory of reliability and trouble-free operation tests [Statisticheskaya teoriya nadezhnosti i ispytaniya na bezotkaznost']. Moscow, Nauka Publ., 328 p.
10. Bogdanoff Dzh., Kozin F. (1989). Probabilitic models of fault accumulation [Veroyatnostnye modeli nakopleniya povrezhdenij]. Moscow, Mir Publ., 344 p.
11. Man'shin G. G. (1986). Control of complex system's prophilaxy modes [Upravlenie rezhimami profilaktik slozhnyh sistem]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 222 p.
12. Kovalenko I. N., Kuznetcov N. Iu. (1988). Highly reliable systems calculation methods [Metody rascheta vysokonadezhnyh sistem]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 176 p.
13. Shamanov V. I. (2016). Generalized methematical model of automation and telemechanics systems operation process [Obobshchennaya matematicheskaya model' processa ehkspluatacii sistem avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on transport, vol. 2, issue 2, pp. 163–179.

14. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995). Methods of formation of safe microelectronic railway automation systems [Metody postroeniya bezopasnyh mikroehlektronnyh sistem zhelez-nodorozhnoj avtomatiki]. Ed. by Vl. V. Sapozhnikov, Moscow, Transport Publ., 1995, 272 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 07.06.2016, принята к публикации 01.09.2016

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II.
e-mail: shamanov_vi@mail.ru