

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В статье рассмотрены базовые принципы организации эксплуатации искусственных сооружений на основе прогнозирования изменения их технического состояния и обозначены проблемы, которые необходимо решить для этого в рамках АСУ ИССО. Сделаны предложения по изменению методики оценки технического состояния искусственных сооружений.

Подход к организации эксплуатации искусственных сооружений (ИССО) — планированию их текущего содержания, ремонта и реконструкции — на основе прогнозирования изменения их технического состояния дает очевидные преимущества: средства, выделяемые на содержание инфраструктуры мостового хозяйства, расходуются своевременно и адресно. Это, в свою очередь, ведет к снижению общих расходов на эксплуатацию ИССО, к их оптимизации [1]. Каким же образом можно осуществлять это прогнозирование?

Поскольку требуется прогнозировать изменение технического состояния сооружений, то первой возникает проблема оценки. Большинство исследователей [1, 2, 3] считают, что оценку необходимо выполнять по показателям, характеризующим надежность сооружения как технической системы: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Однако действующая методика оценки состояния искусственных сооружений на железных дорогах [4] не вполне отвечает этому требованию. Показатели надежности по своему определению [5] связаны со временем — и отсюда возникает вторая проблема: требуется знать, как будет изменяться соответствующая характеристика (например, вероятность безотказной работы) сооружения во времени. И третья проблема связана с тем, что при назначении допускаемых величин показателей надежности (а это необходимо для выполнения оценки состояния) нужно учитывать характер эксплуатации сооружения. В этой статье сделана попытка наметить пути решения указанных проблем с помощью автоматизированной системы управления техническим состоянием искусственных сооружений (АСУ ИССО).

На железных дорогах России действует Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений, разработанная в 2005 г. [4]. Согласно этому документу для каждого сооружения в зависимости от наличия тех или иных дефектов определяются две оценки — по состоянию и по содержанию. Оценка по состоянию должна характеризовать уровень эксплуатационной надежности сооружений, а оценка по содержанию — уровень их текущего содержания и ремонта. Кроме этих обобщенных оценок определяются баллы по показателям надежности — безопасности, грузоподъемности, долговечности и ремонтпригодности (здесь «классический» показатель безотказности представлен двумя характеристиками — безопасностью и грузоподъемностью, а сохраняемость не оценивается вовсе, поскольку для стадии эксплуатации сооружения этот показатель не имеет значения). Действующая методика должна была обладать универсальностью и преемственностью по отношению к методике,

действовавшей с 1991 г. Поэтому ее создателям пришлось идти на определенные допущения, следствием которых стала ее ограниченная применимость для сооружений некоторых типов. Наиболее точно действующая система оценки технического состояния позволяет отразить состояние однопролетного однопутного моста. И чем сильнее конструкция отличается от этого стандарта (многопролетный, многопутный мост и т.п.), тем более искаженной выходит оценка. Например, однопролетный мост, имеющий одну неисправность третьей категории на пролетном строении, по действующей методике будет иметь обобщенную оценку 2,5 балла. Пятипролетный средний мост с такой же неисправностью на каждом пролетном строении будет иметь оценку 0,9.

Влияние действующей методики на организацию планирования работ текущего содержания и ремонта заключается в стимулировании устранения наиболее опасных дефектов — результаты оценки указывают на сооружения, требующие первоочередного внимания. Планирование работ осуществляется следующим образом:

1. Сначала устраняются неисправности третьей категории, которые снижают безопасность движения поездов (даже одна такая неисправность делает оценку сооружения неудовлетворительной).

2. Затем планируется устранение потенциально опасных неисправностей второй категории.

3. В последнюю очередь занимаются устранением мелких нарушений, требований норм — неисправностей первой категории.

Категория установлена для большинства неисправностей экспертным путем (пока исключение составляют некоторые неисправности мостового полотна, для ранжирования которых по категориям были проведены расчеты надежности [6]) и закреплена в действующем нормативном документе. Таким образом, состояние сооружений сравнивается с неким усредненным для всех условий эксплуатации уровнем — и это излишнее упрощение.

Поэтому действующая методика оценки технического состояния ИССО и прогнозирования его изменения должна быть доработана на основе следующих предложений:

- необходимо отойти от единой для всех типов сооружений формулы определения оценки технического состояния;

- при оценке состояния сооружения и прогнозе его изменения необходимо учитывать характер его эксплуатации в настоящее время и в будущем (транспортная стратегия);

- оценка сооружения должна выполняться на основе показателей надежности сооружений — для этого следует каждое сооружение рассматривать как техническую систему, состоящую из элементов, связанных между собой определенным образом. Модель сооружения можно описать и хранить в базе данных автоматизированной системы;

- балл сооружения должен определяться как функция от показателя надежности и служить для более наглядного представления результатов оценки;

- при оценке состояния и прогнозе изменения показатели надежности сооружения должны соотноситься с уровнем, определенным заданной транспортной стратегией. Показатели транспортной стратегии могут быть формализованы в виде совокупности требований для конкретных участков железнодорожного

пути (заданная вероятность безотказной работы, уровень необходимой грузоподъемности ИССО, требуемая скорость движения и т.п.);

— состояние сооружения (как и транспортная стратегия) должно рассматриваться в качестве процессов, развертывающихся во времени.

Какая замена предлагается единой формуле вычисления оценок? Для оценки ИССО необходимо в полной мере воспользоваться аппаратом теории надежности. Как и для любых других объектов — технических систем, следует различать пять видов технического состояния:

1. *Исправное состояние* — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и проектной документации.

2. *Неисправное состояние* — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и проектной документации.

3. *Работоспособное состояние* — состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации.

4. *Неработоспособное состояние* — состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации.

5. *Предельное состояние* — состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие таких событий, как повреждения или отказы. Совокупность фактических состояний объекта и возникающих событий, способствующих переходу в новое состояние, охватывает так называемый жизненный цикл объекта, который протекает во времени и имеет определенные закономерности.

В соответствии с ГОСТ [5] *отказ* — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. *Повреждение* — событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния. Существует еще одно понятие, характеризующее состояние объекта — дефект. Дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. Дефект отражает состояние, отличное от отказа. В соответствии с определением отказа, как события, заключающегося в нарушении работоспособности, предполагается, что до появления отказа объект был работоспособен. Отказ может быть следствием развития неустраненных повреждений или наличия дефектов.

Как известно, любое инженерное сооружение состоит из огромного количества составных элементов. Каждый элемент сооружения является неотъемлемой частью конструкции и несет в себе определенное функциональное назначение. Совокупность элементов конструкции и их взаимосвязь между собой могут составлять отдельную подсистему элементов либо техническую систему в целом. Виды элементов, их количество, надежность и способы взаимодействия между собой напрямую влияют на надежность технической системы.

Для описания любого инженерного сооружения, в нашем случае искусственного сооружения, используются блочные диаграммы надежности [1, 7]. Блочные диаграммы надежности — это графическое представление компонентов либо подсистем технической системы, связанных между собой определенным образом.

Для определения показателей надежности системы и оценки технического состояния сооружения необходимо составить модель сооружения и определить связи между элементами. Рассмотрим способы взаимодействия элементов.

При последовательном соединении элементов система (рис. 1) относится к категории простых систем. Очевидно, что при отказе одного из элементов происходит отказ системы в целом. При последовательном соединении по связи с другими отказами различаются независимые, частично зависимые и зависимые отказы.

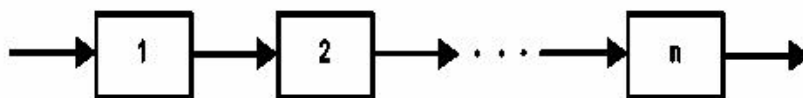


Рис. 1. Последовательное соединение элементов системы

Зависимые отказы происходят в том случае, если последовательно соединенные элементы подвергаются воздействию общих возмущающих факторов. Надежность такой системы будет равна надежности наиболее слабого элемента: $P_c = P_{i,\min}$, где $P_{i,\min}$ — вероятность безотказной работы i -го элемента.

При *независимых отказах* разрушение одного элемента не связано с отказами других элементов. Показатель надежности такой системы — вероятность безотказной работы — определяется перемножением соответствующих вероятностей:

$$P_c = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (1)$$

В системе, состоящей из элементов с *частично зависимыми отказами*, вероятность безотказной работы определяется следующим образом:

$$P_c = \prod_{i=1}^n P_i + 0,5 \left(P_{i,\min} - \prod_{i=1}^n P_i \right). \quad (2)$$

С увеличением в системе числа элементов с последовательным соединением надежность быстро убывает. Однако она не должна превышать надежность наиболее слабого элемента.

$$\prod_{i=1}^n P_i \leq P_c \leq P_{i,\min}. \quad (3)$$

Средний срок службы такой системы при экспоненциальном законе распределения отказов

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_0}{n}. \quad (4)$$

где $\bar{T}_0$ — средний срок службы одного элемента.

Параллельное соединение элементов (рис. 2) можно отнести к сложным системам, здесь выход из строя происходит при отказе двух или более

элементов. Особенностью такой системы является возникновение нескольких состояний работоспособности конструкции. При выходе из строя элементов сложная система может потерять работоспособность полностью, частично или оставаться полностью работоспособной и выполнять заданные функции. При параллельном взаимодействии элементов технической системы принцип независимости отказов нарушается, так как при отказе какого-либо элемента в конструкции происходит перераспределение усилий и перегрузка других элементов.

В случае параллельного соединения, теорема умножения применяется к вероятности наступления хотя бы одного отказа каждого из элементов. Обозначив эти вероятности через $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ получим

$$Q = \prod_{k=1}^n Q_k. \quad (5)$$

Отсюда показатель надежности для системы из параллельно соединенных элементов с независимыми отказами определяется как:

$$P_c = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_i). \quad (6)$$

Надежность технической системы с параллельным соединением элементов в случае независимости отказов оказывается выше, чем надежность любого из ее элементов.

Если отказы элементов полностью зависимы, то надежность такой системы будет равна вероятности безотказной работы наименее надежного элемента (наиболее слабого звена системы) $P_{i,\min}$:

$$P_c = P_{i,\min}. \quad (7)$$

При линейной зависимости между вероятностями безотказной работы элементов системы надежность конструкции с параллельными соединениями элементов определяется по следующей формуле:

$$P_c = P_{\text{нез}} - r(P_{\text{нез}} - P_{i,\min}), \quad (8)$$

где $P_{\text{нез}}$ — вероятность безотказной работы при независимых отказах; r — коэффициент корреляции.

Средний срок службы системы с параллельным соединением элементов увеличивается с ростом их числа и определяется по формуле

$$\bar{T} = \bar{T}_0 \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, \quad (9)$$

где $\bar{T}_0$ — средний срок службы одного элемента k .

Рассмотренные выше способы соединения элементов являются базовыми, и на их основе строятся комбинированные и сложные системы. Именно при помощи таких систем возможно описание искусственных сооружений.

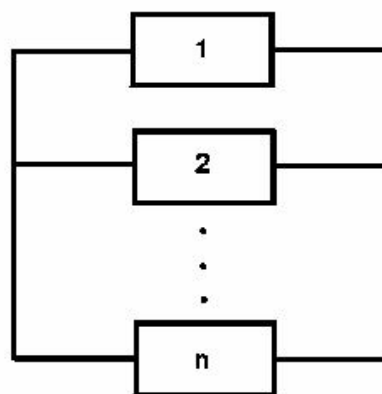


Рис. 2. Параллельное соединение элементов технической системы

Большинство технических систем может включать как последовательное соединение элементов, так и параллельное. Такие системы элементов являются комбинированными.

Для определения надежности комбинированной системы параллельно и последовательно соединенные элементы анализируются отдельно. В качестве примера рассмотрим комбинированную техническую систему, представленную на рис. 3. Пусть надежность первого элемента $P_1 = 99,5 \%$, надежность второго элемента $P_2 = 98,7 \%$ и надежность третьего элемента $P_3 = 97,3 \%$.

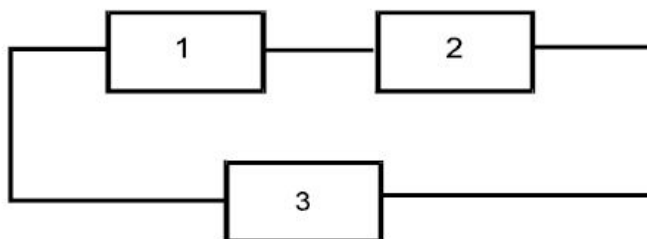


Рис. 3. Комбинированная техническая система

Сначала рассмотрим последовательно соединенные элементы, надежность такой системы равна: $P_{1-2} = P_1 P_2$. Следовательно, $P_{1-2} = 0,995 \cdot 0,987 = 0,982065$. Зная надежность системы из последовательно соединенных элементов, рассмотрим ее как параллельно соединенную с третьим элементом. Надежность системы из параллельно соединенных элементов равна:

$$P_c = 1 - [(1 - 0,982065)(1 - 0,973)] = 0,9995, \text{ или } 99,95 \%.$$

Во многих случаях непросто определить, какие элементы технической системы соединены последовательно, а какие параллельно. Пример такой сложной системы приведен на рис. 4.

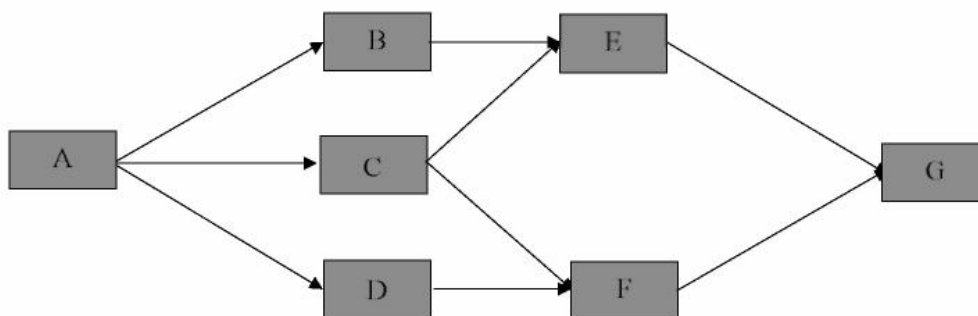


Рис. 4. Сложная техническая система

Для определения надежности таких систем используются следующие методы.

Метод декомпозиции

Метод декомпозиции является применением закона общей вероятности. Он заключается в том, что для определения надежности системы выбирается «ключевой» компонент и надежность системы вычисляется дважды, как будто надежность компонента $P = 0$ (отказ элемента) и $P = 1$ (элемент исправен). Для определения надежности системы эти две вероятности необходимо рассматри-

вать комплексно, поскольку в любое время может произойти отказ данного «ключевого» элемента, либо он может оставаться исправным. Для этого используется стохастическая теория и соответствующее уравнение вероятности.

В качестве иллюстрации метода декомпозиции рассмотрим комбинированную систему, представленную на рис. 3.

Обозначим события, которые могут произойти с системой.

Случай $A(\bar{A})$ — исправное состояние (отказ) элемента 1.

Случай $B(\bar{B})$ — исправное состояние (отказ) элемента 2.

Случай $C(\bar{C})$ — исправное состояние (отказ) элемента 3.

Случай s — исправное состояние системы в целом.

В качестве «ключевого» элемента выбираем элемент 3 и рассматриваем надежность системы элементов при исправном состоянии данного элемента и его отказе. Тогда уравнение надежности такой системы можно записать следующим образом:

$$P_c = P(s / C)P(C) + P(s / \bar{C})P(\bar{C}). \quad (10)$$

Если элемент 3 исправен, то $P(s / C) = 1$.

Если произошел отказ элемента 3, то $P(s / \bar{C}) = P_1 P_2$.

Следовательно, уравнение надежности системы примет вид:

$$P_c = P(C) + P_1 P_2 P(\bar{C}) = P_3 + P_1 P_2 (1 - P_3) = P_1 P_2 + P_3 - P_1 P_2 P_3. \quad (11)$$

Метод случайных исключаяющих событий

Данный метод основан на рассмотрении всех возможных событий, которые могут произойти с технической системой. Надежность системы является вероятностью всех взаимно исключаяющих событий, которые не приводят к отказу системы в целом. И наоборот, вероятность отказа системы является совокупностью всех взаимно исключаяющих событий, которые приводят к отказу. В качестве примера рассмотрим комбинированную техническую систему.

Обозначим события, которые могут произойти с системой.

Случай $A(\bar{A})$ — исправное состояние (отказ) элемента 1.

Случай $B(\bar{B})$ — исправное состояние (отказ) элемента 2.

Случай $C(\bar{C})$ — исправное состояние (отказ) элемента 3.

Определим все взаимно исключаяющие события:

$X1 = ABC$ — все элементы системы исправны, система исправна;

$X2 = \bar{A}BC$ — отказ элемента 1, система работоспособна;

$X3 = A\bar{B}C$ — отказ элемента 2, система работоспособна;

$X4 = ABC\bar{C}$ — отказ элемента 3, система работоспособна;

$X5 = \bar{A}\bar{B}C$ — отказ элементов 1 и 2, система работоспособна;

$X6 = \bar{A}B\bar{C}$ — отказ элементов 1 и 3, система неработоспособна;

$X7 = A\bar{B}\bar{C}$ — отказ элементов 2 и 3, система неработоспособна;

$X8 = \bar{A}\bar{B}\bar{C}$ — отказ всех элементов системы.

Как видно, системные события $X6, X7, X8$ приводят систему в неработоспособное состояние. Таким образом, вероятность отказа системы может быть записана следующим образом:

$$P_f = P(X6) + P(X7) + P(X8). \quad (12)$$

$$P(X6) = P(\overline{ABC}) = (1 - P_1)P_2(1 - P_3);$$

$$P(X7) = P(\overline{AB}\overline{C}) = P_1(1 - P_2)(1 - P_3);$$

$$P(X8) = P(\overline{A}\overline{B}\overline{C}) = (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3).$$

Тогда получим следующее уравнение:

$$P_f = 1 - P_1P_2 - P_3 + P_1P_2P_3. \quad (13)$$

Надежность системы составляет: $P_c = 1 - P_f$, следовательно:

$$P_c = P_1P_2 + P_3 - P_1P_2P_3. \quad (14)$$

Метод трассирования

Данный метод заключается в рассмотрении тех путей, когда техническая система остается работоспособной и надежность системы зависит от надежности всех элементов, присутствующих на этом пути. Схема применения метода трассирования к комбинированной системе элементов представлена на рис. 5.

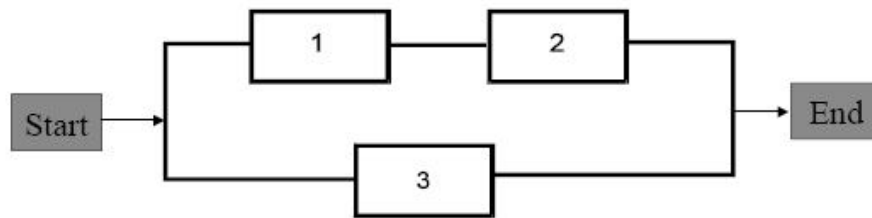


Рис. 5. Определение надежности комбинированной системы методом трассирования

Основными путями данной системы являются: $X1 = 1, 2$ и $X2 = 3$.

Надежность (вероятность безотказности) системы можно записать следующим образом:

$$P_c = P(X1 \cup X2); \quad (15)$$

$$P_c = P(X1 \cup X2) = P(X1) + P(X2) - P(X1|X2) = P(1, 2) + P(3) - P(1, 2, 3),$$

или $P_c = P_1P_2 + P_3 - P_1P_2P_3$.

Реализация оценки надежности по вышеизложенным алгоритмам потребует создания в АСУ ИССО специального модуля, позволяющего описать блочную диаграмму надежности каждого искусственного сооружения и сохранить ее в базе данных.

Далее, для прогнозирования изменения состояния искусственных сооружений в целом необходимо иметь модель изменения состояния каждого его элемента и воздействия на него внешних факторов. В отношении ряда элементов сооружений задача прогнозирования частично решена — существуют аналитические методы определения остаточного усталостного ресурса элементов главных ферм и проезжей части металлических пролетных строений, определения ресурса по выносливости бетона и арматуры железобетонных пролетных строений. В отношении остальных элементов предполагается решить задачу прогнозирования статистически, по результатам обработки данных АСУ ИССО о неисправностях сооружений.

Библиографический список

1. Бокарев С.А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2002. 276 с.
2. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. М.: Науч.-изд. центр «Инженер», 1999. 295 с.
3. Филиппов В.М. Прогнозирование технического состояния верхнего строения пути: Учеб. пособие. Самара: СамИИТ, 1993. 80 с.
4. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». М.: Транспорт, 2005. 62 с.
5. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
6. Прибытков С.С. Обоснование нормативных требований к содержанию мостового полотна на железобетонных пролетных строениях с ездой на балласте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2005. 26 с.
7. System Analysis Reference. Reliability, Availability and Optimization / Tucson, Arizona, USA: ReliaSoft Publishing, 2003. 419 p.