

Становский А. Л.,
Торопенко А. В.,
Щедров И. Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАШИН, НАКАПЛИВАЮЩИХ СКРЫТЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Разработана модель накопления повреждений структуры узла сложной машины в период ее эксплуатации, учитывающая статические, динамические, стохастические и латентные процессы в объектах моделирования. На примере сварной рамы автомобильного прицепа рассмотрена задача моделирования жизненного цикла сложной технической системы в машиностроении. Предложен математический аппарат автоматической классификации данных о текущем состоянии системы для построения модели накопления повреждений в раме.

Ключевые слова: моделирование машин, жизненный цикл, скрытые повреждения.

1. Введение

Любые ремонтпригодные машины и их элементы, которые, находясь в эксплуатации, накапливают скрытые повреждения, на определенном этапе их жизненного цикла требуют восстановления элементов и соединяющих их связей, утративших работоспособность. Для проектирования работ и оборудования, необходимых для такого восстановления, проектировщик, в свою очередь, нуждается в адекватной оценке текущего состояния объекта, работоспособности всех его узлов и связей между ними. Примерами таких объектов в машиностроении могут служить элементы и узлы механического оборудования АЭС, расположенные в опасной радиоактивной зоне, часть гидравлического оборудования морского очистного комплекса, погруженная в воду, часть механической конструкции строительных машин, находящаяся в земле, недоступные части рамы, подвески, кузова электрооборудования транспортного средства во время его движения и многое другое.

Поэтому проблема разработки предназначенных для проектирования восстановления машин, поврежденных в период эксплуатации, методов оценки их текущего состояния, особенно основанных на моделях, позволяющих извлекать информацию о состоянии объекта при неполных данных о нем, является весьма актуальной.

2. Постановка проблемы

К сожалению, многие ответственные объекты современного машиностроения, которые могут быть представлены в виде сложной системы с нагруженным резервированием, частично недоступны для их непосредственного мониторинга, а значит, и для анализа в рамках проектирования, обязательно предшествующего восстановлению [1, 2].

Задача еще больше усложняется, если машина содержит части, недоступные не только для мониторинга, но и для ремонта. В этом случае приходится производить ремонтные работы только на доступной части, стараясь сохранить при этом работоспособность объекта в целом. Если же дополнительным ограничением является необходимость выполнять такой ремонт без остановки машины, «на ходу», то проблема сводится к автоматизированному комбинированному проектированию технологии и оборудования не только для ремонта, но и для реинжиниринга — деятельности по модернизации ранее реализованных технических решений на действующем объекте [3].

3. Анализ последних достижений и публикаций

Итак, главной проблемой ремонта и реинжиниринга машин в эксплуатации является построение моделей состояния структуры этих объектов на протяжении их эксплуатации [4–6]. При прогнозировании жизненного цикла сложной технической конструкции на этапе ее проектирования в качестве исходной информации используют «паспортную» конструкцию анализируемого варианта, данные стендовых испытаний пробного образца, а также статистическую информацию о внешних условиях и «поведении» при полигонных испытаниях и в эксплуатации изделий-аналогов.

Первые два источника служат, в основном, для получения расчетных и экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии деталей и узлов прогнозируемого объекта, последние два — для моделирования повреждений, «ожидающих» объект на всем протяжении его жизненного цикла [7].

При этом информация, собираемая на последних этапах, далеко не всегда соответствует основному требованию стохастического моделирования — качественной однородности характеристик объекта

во всех наблюдениях. Здесь объекты настолько сложны, а условия их функционирования настолько различны, что полное совпадение количественных характеристик невозможно [8]. Современные технологии обработки информации о текущем состоянии объекта позволяют повысить достоверность исходных данных, «закладываемых» в соответствующие САПР [9–11], однако, в конечном итоге, все зависит от применяемых методов первичной оценки состояния объектов.

Действительно, для проектирования ремонта и реинжиниринга нужны не только готовые запасные узлы, стандартный инструмент и приспособления, но и некоторые новые, раньше не проектировавшиеся детали и узлы машины. Для создания таких элементов и технологии реинжиниринга необходима новая комбинированная система их проектирования. С учетом потребности в сокращении сроков простоя ремонтируемого «в движении» объекта для решения таких задач трудно обойтись без соответствующей САПР реинжиниринга, работающей в он-лайн режиме.

В основе такой САПР лежит, прежде всего, моделирование и анализ текущего состояния объекта, которые бывают достаточно затрудненными, если по условиям работы последнего он частично недоступен для мониторинга, т. е. состояние, целостность и повреждения его структуры не могут быть определены непосредственно. Современные CALS-технологии — подходы к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоемкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия, также нуждаются в моделировании процесса повреждения структуры машин в процессе эксплуатации [12, 13].

4. Цель и задачи работы

Цель работы — повышение эффективности ремонта и реинжиниринга машин в процессе эксплуатации путем создания моделей повреждения машин, наиболее приближенных к реальным событиям.

Задачи работы — построение математической модели процессов повреждения машин во время их эксплуатации, учитывающей статические, динамические, стохастические и латентные (скрытые) процессы в объектах моделирования.

5. Моделирование накопления повреждений в период эксплуатации машин

В качестве примера, иллюстрирующего создание и использование моделей накопления повреждений,

рассмотрим раму автомобильного прицепа, схема которой приведена на рис. 1.

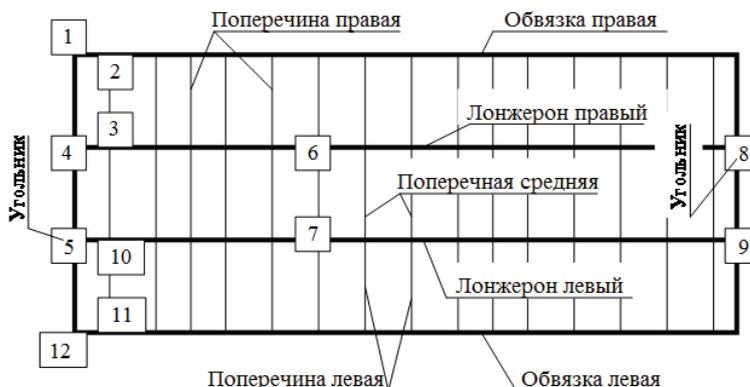


Рис. 1. Схема расположения учитываемых повреждений рамы автомобильного прицепа

В модели рассматриваются понятия «тип повреждения» и «место повреждения». Каждый тип повреждения из конечного списка этих типов соответствовал определенным местам в раме, а каждому месту предпосылали несколько уровней глубины повреждения, моделирующих его развитие (например, развитие трещины и превращение ее в полумку изделия в соответствующем месте). В табл. 1 приведены типы повреждений, соответствующие пронумерованным на рис. 1, а также количество мест повреждений каждого типа и количество уровней повреждения в каждом месте. Таким образом, общее количество учитываемых повреждений в объекте равно 456.

Таблица 1

Типы и количество учитываемых повреждений

№ по рис. 2	Тип повреждения (место зарождения и развития трещины)	Количество мест	Количество уровней
1	Обвязка правая	17	68
2	Правая поперечина/обвязка	17	51
3	Правая поперечина/лонжерон	17	51
4	Средняя поперечина/правый лонжерон	17	51
5	Передняя поперечина/угольник	2	2
6	Правый лонжерон	1	5
7	Левый лонжерон	1	5
8	Задняя поперечина/угольник	2	2
9	Средняя поперечина/левый лонжерон	17	51
10	Левая поперечина/лонжерон	17	51
11	Левая поперечина/обвязка	17	51
12	Обвязка левая	17	68
Всего:			456

Сообщения о текущих повреждениях поступали из различных автотранспортных организаций через дискретные промежутки времени в виде матриц

повреждений $A_{ij\xi}$ на конец каждой очередной итерации наблюдения:

$$A_{ij\xi} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \dots & K_{1,N} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \dots & K_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{M,1} & K_{M,2} & \dots & K_{M,N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где K_{ij} — количество повреждений j -го объекта в i -м автотранспортном предприятии, i — номер автотранспортного предприятия, j — номер объекта наблюдения, ξ — номер итерации наблюдения, N — количество мест повреждений каждого типа (в нашем примере $N = 17$), M — количество типов повреждений (в нашем примере $M = 12$).

Автомобильный прицеп относится к восстанавливаемым техническим системам. Это значит, что после определенного количества предыдущих повреждений он отправляется в ремонт, который полностью изменяет картину накопления дальнейших повреждений. Фактически, «старый» прицеп исчезает, а на его место в эксплуатацию поступает «новый» с малопредсказуемыми из-за стохастического характера показателей качества ремонта характеристиками. Поэтому общая совокупность векторов $A_{ij\xi}$ по всем автотранспортным предприятиям непригодна для построения адекватной модели эксплуатации прицепа.

При обследовании технического состояния объектов, кроме матрицы $A_{ij\xi}$, могут быть также получены данные об *условиях их эксплуатации*: интенсивности, средней загруженности, характеристиках окружающей среды и т. п. Для автотранспортных средств — это, прежде всего, вид и масса перевозимого груза, метод погрузки, средние расстояния перевозок, состояние дорог, климат региона, уровень техобслуживания на предприятии, отношение персонала и прочее. Часть этих факторов малопредсказуема и даже носит субъективный характер.

Период эксплуатации $T_0 - T_\theta$ удобно разбить на конечное количество интервалов (не обязательно одинаковой продолжительности): $T_0 - T_1; T_1 - T_2; \dots; T_{(\theta-1)} - T_\theta$. Такая дискретизация позволяет рассматривать непрерывный процесс накопления эксплуатационных повреждений как скачкообразное изменение состояний системы на границах временных интервалов.

Рассмотрим состояние реального объекта. В период $0 - T_\theta$ при изготовлении и эксплуатации (полигонных испытаниях) в конструкции рамы происходят $Z_{T_\theta}^*$ событий, которые рассматриваются системой как повреждения одного из следующих видов: дефекты сборки; образование трещины; рост трещины; полное разрушение. В пределах каждого вида рассмотрим различные типы повреждений. К отдельному типу отнесем повреждения (непривар) сварного соединения между деталями с по-

стоянными для всех повреждений данного типа названиями либо трещины в отдельных элементах конструкции одного названия.

Например, к одному типу относятся все n_i повреждения сварного шва между левой обвязкой и любой поперечиной, любые повреждения правого лонжерона. Как указывалось выше, основой для принятия решения о признании того или иного состояния объекта на данной временной итерации работоспособным являются технико-экономические соображения. Для практической реализации такого решения лицу, несущему ответственность за его принятие, должна быть предоставлена информация о техническом состоянии объекта на данной временной итерации, т. е. о наличии повреждений не только определенного типа и вида, но и о конкретных местах их локализации и степени повреждения каждого места. Кроме того, последняя информация необходима для продолжения процесса моделирования возникновения повреждений, т. к. каждое изменение в последних влияет на НДС конструкции, а значит и склонность отдельных ее элементов к последующим повреждениям.

Для подготовки такой информации введем следующее понятие: «место повреждения». Относясь к конкретному типу, это понятие однозначно определяет место расположения на чертеже рамы деталей, между которыми возникает повреждение (например, тип повреждения: «поперечина — правая обвязка», место повреждения: «4-я поперечина — правая обвязка»).

Пусть каждому i -му типу повреждений соответствует M_i мест повреждений. Таким образом, общее учитываемое системой количество мест возможных повреждений Π равно:

$$\Pi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \Pi_{ij}, \quad (2)$$

где Π_{ij} — повреждение i -го типа в j -м месте.

С учетом описанной выше методики моделирования развития трещины (степени повреждения) каждое место повреждения рассматривается в модели как несколько (больше 1) релейных элементов. Пусть для каждого Π_{ij} из Π мест повреждения количество релейных элементов равно K_{ij} .

Тогда общее количество релейных элементов в модели рамы равно:

$$R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} r_{ijk}, \quad (3)$$

где r_{ijk} — релейный элемент, моделирующий k -ю степень повреждения i -го типа в j -м месте. Очевидно, что максимально возможное количество моделируемых повреждений $Z_\infty = R$.

Для рамы рассмотрим вероятностно-автоматную модель. Входной алфавит — матрицы повреждений в начале очередной итерации A_{Π}^T . Выходной алфавит — матрица повреждений в конце очередной итерации A_{Π}^{T+1} . В качестве функции внутреннего состояния принимаем матрицу вероятностей возникновения повреждений того или иного типа в том или ином месте A_p на временной итерации $T - (T + 1)$. Функция выхода при этом будет иметь следующий вид:

$$A_{\Pi}^{T+1} = A_{\Pi}^T + A_{\Delta}. \tag{4}$$

Матрицы в (4) имеют следующий физический и математический смысл.

Полная информация о месте расположения и количестве релейных элементов модели представляет собой некоторый двухмерный числовой массив с числом строк, равным N , числом элементов массива в каждой строке, равным M_i , и значением каждого элемента массива, равным K_{ij} ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M_i$). Выбирая из чисел элементов массива в каждой строке M_i максимальное $M_{\max}\{M_{\max} \subset M\}$ и дополняя в каждой строке справа столько нулевых элементов, чтобы их общее количество стало равным M_{\max} , получим прямоугольную $N \times M_{\max}$ матрицу, которая может иметь, например, такой вид:

$$A_R = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & 0 & 0 \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} & K_{37} \\ K_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Если элементами матрицы A_R считать не количество релейных элементов (то есть потенциальных способностей к повреждению), а сами повреждения, то получим некоторую аналогичную по размеру ($M \times N$) матрицу:

$$A_{\Pi}^t = f(t). \tag{6}$$

Такая матрица для проекта рамы, не предусматривающего повреждений, будет нулевой:

$$A_{\Pi}^0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \tag{7}$$

а для некоторого предельного случая, когда все «запланированные» повреждения состоялись, — совпадать с матрицей релейных элементов:

$$A_{\Pi}^{\infty} = A_R. \tag{8}$$

Так как величина t — дискретная с узлами в $0; T_0; T_1; \dots, T_{\theta}$, то процесс моделирования эксплуатации рамы будет состоять из последовательного преобразования матриц:

$$A_{\Pi}^{T_0} = f(A_{\Pi}^0; T_0); \quad A_{\Pi}^{T_1} = f(A_{\Pi}^{T_0}; T_1); \quad \dots ; \\ A_{\Pi}^{T_i} = f(A_{\Pi}^{T_{i-1}}; T_i),$$

где T_{θ} — временной предел испытаний (моделирования).

Преобразование:

$$A_{\Pi}^{T_i} = f(A_{\Pi}^{T_{i-1}}; T_i), \tag{9}$$

осуществляется на основании добавлений к элементам исходной матрицы $A_{\Pi}^{T_i}$ элементов такой же по размеру модернизированной Δ -матрицы, т. е. суммированием:

$$A_{\Pi}^{T_i} = A_{\Pi}^{T_{i-1}} + A_{\Delta}^{T_i}. \tag{10}$$

Модернизированная Δ -матрица $A_{\Delta}^{T_i}$, в свою очередь, получается последовательным умножением каждого элемента немодернизированной Π -матрицы $A_{\Pi}^{T_{i-1}}$ на соответствующие элементы матрицы-сита (C -матрицы) A_C , имеющие возможность принимать значения «0» или «1» (рис. 2).

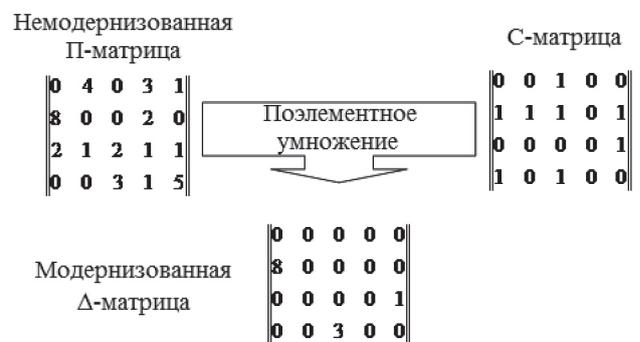


Рис. 2. Пример вычисления модернизированной Δ -матрицы

Источниками немодернизированной Π -матрицы и C -матрицы после каждой временной итерации моделирования являются соответствующие подсистемы общей системы экспресс-оценки удельных затрат на эксплуатацию металлоконструкций типа рам.

Рассмотрим подробно работу соответствующих подсистем [14, 15].

Подсистема прогнозирования повреждений. Предназначена для формирования D -матрицы на каждой временной итерации. Как было сказано выше, для несущих систем мобильной техники, выполненных в виде сварных рам, наиболее характерными повреждениями являются трещины элементов конструкции и сварных швов между ними. Место и время появления подобных повреждений носят, с одной стороны, стохастический характер из-за неопределенности условий изготовления и эксплуатации объекта (тщательность сборки, состояние дорог, характеристики перевозимого груза, навыки вождения и т. п.), а с другой — вполне детерминированный, связанный, например, с распределением внутренних напряжений, обусловленным конструкцией рамы.

Отсюда следует, что при прогнозировании на модели процесса накопления эксплуатационных повреждений, заключающемся в «назначении» повреждения (трещины) в то или иное место конструкции в заданное время, не подходят ни метод случайного выбора из ранее составленного списка «опасных» мест, ни метод переноса на моделируемый объект результатов полигонных и эксплуатационных испытаний других объектов аналогичного класса или даже других таких же объектов. Поэтому наиболее эффективным представляется комбинированный метод получения потока псевдослучайных чисел, т. е. потока случайных чисел, «модулированных» информацией о реальных повреждениях рам, полученной в результате полигонных испытаний или при эксплуатации, а также информацией о напряженно-деформированном состоянии (НДС) рамы, полученной на модели.

Результаты производственных испытаний сводят в матрицу реальных событий (Z -матрицу) размером $M \times N$, где N — количество типов возможных повреждений, M — количество мест возможных повреждений того или иного типа.

Обозначим через Z_{ijt} количество повреждений i -го типа в j -м месте, произошедших в результате таких испытаний на временной итерации $T_{t-1} - T_t$ (заметим, что под «временной» итерацией не обязательно понимается шаг по шкале времени, — это может быть, например, шкала длины пробега или другой ресурсный параметр). Тогда вероятность возникновения того или иного повреждения на этой итерации, полученная экспериментальным путем, может быть рассчитана по формуле:

$$P_{ijt} = \frac{Z_{ijt}}{Z_{\infty}}. \quad (11)$$

Для повторного повреждения одного и того же места (развитие трещины) вероятность может

быть увеличена на заранее согласованную величину $K_{\text{повт}}$:

$$P_{ijt}^{\text{повт}} = K_{\text{повт}} \cdot P_{ijt}. \quad (12)$$

Рассчитывая по (11) вероятности всех повреждений, полученных на той же итерации, получим (после дополнения неполных строк нулями) матрицу вероятностей (P -матрицу):

$$A_P^t = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} \\ P_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

P -матрица также имеет размерность $M \times N$.

Перейдем далее к формированию I -матрицы, которая совместно с генератором случайных чисел позволяет построить немодернизованную матрицу повреждений (Π -матрицу).

Настроим генератор случайных чисел для итерации $T_{t-1} - T_t$ на работу в диапазоне $\{1 \dots L \cdot Z_{\infty}\}$. Чем больше величина L , тем точнее модуляция (в нашем примере $L = 100$).

В немодулированной последовательности случайных чисел всем возможным повреждениям Π_{ijt} ставятся в соответствие равные по величине участки отрезка числовой оси $\{1 \dots L \cdot Z_{\infty}\}$:

$$L_{\text{немод}} = \frac{L \cdot Z_{\infty}}{\Pi_t}. \quad (14)$$

Если в результате расчета по (14) получается дробное значение $L_{\text{немод}}$, противоречащее смыслу описываемого метода модуляции (каждому повреждению Π_{ijt} должно соответствовать целое количество элементов отрезка натурального ряда чисел), его приходится округлять до ближайшего целого числа. В результате можно говорить лишь о приблизительном равенстве отрезков $L_{\text{немод}}$ для каждого Π_{ijt} , причем точность этого приближения возрастает с увеличением L .

Модулирование потока равновероятных чисел диапазона $\{1 - L \cdot Z_{\infty}\}$ заключается в умножении их количества $L \cdot Z_{\infty}$ на весовые коэффициенты, равные вероятностям P_{ijt} возникновения соответствующих повреждений Π_{ijt} :

$$L_{\text{мод } ijt} = L \cdot Z_{\infty} \cdot P_{ijt}. \quad (15)$$

На рис. 3 приведены примеры немодулированного и модулированного отрезков числового ряда.

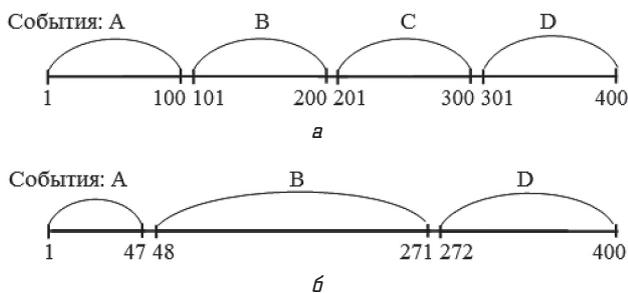


Рис. 3. Немодулированный (а) и модулированный (б) вероятностями наступления четырех событий отрезок натурального ряда (1...400)

Немодулированный отрезок можно считать моделирующим равновероятные события. Как видно из рис. 3, выпадение, например, числа 98 в первом случае соответствует событию «А», а во втором – событию «В». Событие «С» во втором случае вообще не моделируется, так как вероятность его наступления была равна нулю (либо была столь малой, что при округлении соответствующего $L_{\text{мод }ijt}$ до ближайшего целого числа получился нуль). Информация об интервалах для каждого места возможного повреждения группируется в I -матрицу, которая для простого случая, приведенного на рис. 3, имеет вид:

$$A_I = |47 \ 271 \ 400|. \tag{16}$$

Попадание чисел от ГСЧ в соответствующий интервал фиксируется как единица, прибавляемая к соответствующему элементу Π -матрицы.

Подсистема моделирования НДС рамы предназначена для формирования S -матрицы, которая, как и Δ -матрица, формируется после каждой временной итерации. Алгоритм ее расчета таков:

1. Формируется матрица размером $M \times N$ с нулевыми элементами.

2. В исходную конечноэлементную модель, соответствующую по структуре и параметрам элементов чертежу объекта, вносятся изменения (обнуляются параметры жесткости) у тех релейных элементов, отключение которых предусмотрено дефектами изготовления рамы.

3. Выполняется расчет на модели в статическом режиме напряжений σ_{ijt} в местах возможных повреждений Π_{ijt} .

4. Для тех мест возможных повреждений Π_{ijt} , где выполняется неравенство:

$$\sigma_{ijt} < \frac{1}{K_3} \sigma_{\text{max}}, \tag{17}$$

где σ_{max} – предельно допустимые напряжения для соответствующего месту материала конструкции; K_3 – коэффициент запаса, назначаемый отдельно для нового изделия и после каждого очередного

ремонта, соответствующие нули в матрице (п. 1) заменяются единицами.

S -матрица готова.

5. Далее до конца моделирования п.п. 1–4 повторяются с единственным отличием: в п. 2 дополнительно обнуляются параметры жесткости тех релейных элементов, которые «отключились» в конце предыдущей итерации.

Поэлементным умножением Π -матрицы и S -матрицы на каждой временной итерации получаем Δ -матрицу для расчета очередного состояния вероятностного автомата по (10).

Количество «повреждений» модели на каждой временной итерации Δ_t должно соответствовать количеству реальных повреждений Z_t на этой же итерации:

$$\Delta_t = Z_t. \tag{18}$$

Однако, отбор Z_t случайных чисел может в итоге привести к невыполнению равенства (18), т. к. не все они пройдут при поэлементном умножении через сито S -матрицы. Поэтому, если после умножения имеет место соотношение:

$$\Delta_t < Z_t, \tag{19}$$

программа возвращается к алгоритму формирования Π -матрицы и в его первом пункте добавляет к Z_t единицу. Создается новая Π -матрица, потом следует поэлементное умножение и проверка новой Δ -матрицы на соблюдение соотношения (18). Если и в этом случае имеет место (19), то к Z_t добавляют 2 и т. д., пока не будет достигнуто (18).

Для работы алгоритма в подсистеме моделирования НДС рамы, кроме собственно конечноэлементной модели рамы, включены блоки проверки ее статической адекватности и назначения соответствующего условиям эксплуатации внешнего нагружения. Система позволяет либо учитывать только статическую нагрузку, либо осуществлять ее коррекцию с учетом средних статических характеристик эксплуатации.

6. Выводы

В результате выполненной работы реализована возможность трехсторонней (статика конструкции, динамика нагружения, стохастика эксплуатации) оценки состояния структуры машины и формирования исходных данных для проектирования ее ремонта или реинжиниринга.

Эти же данные могут использоваться при проектировании такого же класса машин, предназначенных для работы в сходных условиях. Здесь кроются недостатки модели: в случае неизвестных

условий експлуатації модель стає менш точною, і для компенсації цього недостатка необхідні далішні дослідження стохастическої складової життєвого циклу машини.

В результаті проведеного аналізу конкретного об'єкта: автомобільного полуприцепа отримані рекомендації по удосконаленню такої машини за рахунок посилення її конструкції в найбільш небезпечних місцях — в зоні приварки поперечин к елементам обв'язки і ланжеронам, а також в місцях з'єднання поперечини з угольником.

Литература

1. Пурич, Д. А. Экспресс-анализ структурной надежности сложных технических систем с нагруженным резервированием [Текст] / Д. А. Пурич, О. С. Савельева, В. М. Тонконогий // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць. — 2013. — Вип. 8. — С. 272–280.
2. Савельева, О. С. Метод дистанционной структурной диагностики низкочастотной аналоговой сети, частично недоступной мониторингу [Текст] / О. С. Савельева, В. Г. Максимов, Д. А. Пурич // Праці Одеського політехнічного університету. — Одеса: ОНПУ. — 2012. — Вип. 2(39). — С. 208–213.
3. Залогова, В. А. К вопросу о выборе стратегии отечественных машиностроительных предприятий в отношении конкурентоспособности продукции [Текст] / В. А. Залогова, К. А. Дядюра // Високі технології в машинобудуванні. — 2007. — Вип. 2. — С. 91–96.
4. Назаренко, С. А. Многодисциплинарный анализ чувствительности для исследования жизненного цикла изделия [Текст] / С. А. Назаренко // Труды 11-й Международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». — Харьков, 2005. — С. 29–34.
5. Piegł, L. A. Ten challenges in computer-aided design [Text] / L. A. Piegł // Computer-aided design. — 2005. — Vol. 37, № 4. — P. 461–470. doi:10.1016/j.cad.2004.08.012.
6. Кеворков, С. Поддержка жизненного цикла изделия [Текст] / С. Кеворков // Открытые системы. — 2004. — № 12(116). — С. 54–58.
7. Балан, С. А. Моделирование псевдослучайных событий модуляцией массива случайных чисел [Текст] / С. А. Балан // Труды Одесского политехнического университета. — 1998. — Вип. 2(6). — С. 73–76.
8. Савельева, О. С. Морфологические модели отказоустойчивости сложных технических систем [Текст] / О. С. Савельева, О. Е. Плачинда, Д. А. Пурич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 3/2(51). — С. 39–42.
9. Куприков, М. Ю. Применение информационных технологий на этапах жизненного цикла изделия [Текст] / М. Ю. Куприков // Качество и жизнь. — 2004. — № 4. — С. 210–213.
10. Курсин, Д. А. Разработка модели управления жизненным циклом изделия на стадии эксплуатации [Текст] / Д. А. Курсин // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 79–85.
11. Омельченко, И. М. Классификация информационных потоков на стадиях жизненного цикла наукоемкой продукции [Текст] / И. М. Омельченко, З. С. Терентьева // Машиностроитель. — 2005. — № 4. — С. 2–6.
12. Соломенцев, Ю. М. Концепции CALS-технологий [Текст] / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов // Автоматизация и современные технологии. — 2005. — № 9. — С. 3–9.
13. Lvov, G. The integrated information technologies on principles CALS at designing, manufacture and operation of high technology production [Text] / G. Lvov // 7 Magdeburger Maschinenbau-Tage, 11 bis 12 Oktober 2005. — P. 259–263.
14. Становський, О. Л. Критерії відмовостійкості складних технічних систем [Текст] / О. Л. Становський, О. С. Савельева // Наукові вісті інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». — 2007. — № 1(11). — С. 104–107.
15. Становський, А. Л. Моделирование надежности компьютерных сетей [Текст] / А. Л. Становський, О. Е. Плачинда, И. Л. Стадник // Збірник наукових праць Одеського інституту сухопутних військ. — 2006. — № 12. — С. 115–117.

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МАШИН, ЯКІ НАКОПИЧУЮТЬ ПРИХОВАНІ ПОШКОДЖЕННЯ

Розроблено модель накопичення пошкоджень структури вузла складної машини в період її експлуатації, що враховує статичні, динамічні, стохастичні і латентні процеси в об'єктах моделювання. На прикладі зварної рами автомобільного причепа розглянуто задачу моделювання життєвого циклу складної технічної системи в машинобудуванні. Запропоновано математичний апарат автоматичної класифікації даних про поточний стан системи для побудови моделі накопичення пошкоджень у рамі.

Ключові слова: моделювання машин, життєвий цикл, приховані пошкодження.

Становський Олександр Леонідович, доктор технічних наук, професор, кафедра нафтогазового і хімічного машиностроєння, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: stanovsky@mail.ru.

Торопенко Алла Владиславівна, кафедра нафтогазового і хімічного машиностроєння, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: alla.androsyk@gmail.com.

Щедров Ігорь Николаевич, кафедра нафтогазового і хімічного машиностроєння, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: shchedrov@mail.ru.

Становський Олександр Леонідович, доктор технічних наук, професор, кафедра нафтогазового та хімічного

машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Торопенко Алла Володимирівна, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Щедров Ігор Миколайович, кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Україна.

Stanovskyi Alexandr, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: stanovsky@mail.ru.

Toropenko Alla, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: alla.androsyuk@gmail.com.

Schedrov Igor, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: shchedrov@mail.ru

УДК 629.11.012.3: 621.512.001.24(075.8)

Зубенко Д. Ю.

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті показано запатентовану корисну модель пристрою для накачування пневматичних шин, яка дозволяє їхати машині з пробитим колесом. А також запропоновано запатентований прототип поршневого компресора безкривошипно-безшатунного типу, який дозволяє забезпечувати та підтримувати тиск повітря в пневмосистемі транспортних засобів. Показано ефективність роботи нового компресора в порівнянні зі стандартним.

Ключові слова: пневматична шина, компресор, транспортний засіб, надійність роботи, безвідмовність, пневматичні пристрої.

1. Вступ

На сьогоднішній день багато перевезень відбувається колісним транспортом — на його долю приходить близько 80 % від загальних перевезень. Однак постійні навантаження на колісний транспорт змушують шукати нові підходи в вирішенні питання безвідмовної роботи колеса, а саме шини транспортного засобу.

Багато пасажирських перевезень виконується електричним транспортом. На його долю приходить до 60 % загальних перевезень. Особу роль відіграють перевезення трамваями та тролейбусами — на них приходить близько 25 % від загальних перевезень. Однак рухомий склад, який експлуатується на транспортних підприємствах має граничний стан та морально застарілий. Так як його необхідно ремонтувати чи замінювати на новий, треба розробляти техніку нового покоління, яка б відповідала сучасним вимогам по безпеці та надійності.

У пневматичній системі тролейбусів типу Т2 ЮМЗ українського виробництва джерелом стисненого повітря є поршневі, одноступінчасті, двоциліндрові електрокомпресора типів ЕК-4В і ЕКВО-0,3 з приводом від електродвигуна ДК-408 постійного струму паралельного збудження; електродвигун отримує енергію від контактної мережі постійного струму; компресор ЕК-4В з повітряним охоло-

дженням, рядним, горизонтальним розташуванням циліндрів; компресор-0,3-опозитний з горизонтальним розташуванням циліндрів, охолоджуваних атмосферним повітрям [1].

Актуальність даної роботи полягає в тому, що при сучасному експлуатаційному режимі роботи транспортної техніки та збільшенню навантаження на основні вузли та агрегати основних елементів рухомого складу, необхідним є розробка нових конструктивних елементів, лімітуючих надійність роботи вузла.

2. Аналіз літературних даних

Надійність роботи шини транспортного засобу є лімітуючим елементом в безпеці дорожнього руху. Багато фірм та наукових організацій працюють над поставленим завданням. Створюються нові аналоги надійної шини транспортного засобу, але існують деякі проблеми при експлуатації шини при її проколах. Так у роботі [2] були розглянуті питання прогнозування залишкового ресурсу, але питання надійної експлуатації в умовах пошкодження розглянуті не були. У роботі [3] розглядається методи переробки шин транспортних засобів, але не розглянуто питання експлуатації. В статті [4] показані заходи запобігання проковзуванню та наведені розрахунки не дозволяють прогнозувати роботу шини запропонованої конструкції. Зменшення