

УДК 004.942:004.02



О.С. Савельева,
к.т.н, доцент,
Одесский национальный
политехнический
университет



Д.А. Пурич,
инженер,
Одесский национальный
политехнический
университет



Ан.А. Становский,
магистр,
Одесский национальный
политехнический
университет

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

О.С. Савельева, Д.А. Пурич, Ан.А. Становський. *Автоматизоване проектування структури складних об'єктів після відновлення.* Запропонований метод автоматизованого проектування структури складних об'єктів після відновлення, заснований на чисельній взаємодії двох моделей: схованої марковської об'єкта діагностики та морфологічної комп'ютерної. Метод створює додаткові можливості при проектуванні ремонту складних відпо-відальних об'єктів зі структурним резервуванням.

O.S. Saveleva, D.A. Purich, An.A. Stanovsky. *The automated design of difficult objects structure after restoration.* The method of the automated design of difficult objects structure after the restoration, based on numerical interaction of two models: hidden Markov object of preliminary treatment and the morphological computer is offered. The method creates additional opportunities at design of difficult responsible objects with structural reservation.

Введение. Многие ответственные объекты современного производства, энергетики, транспорта, медицины и пр. по мере морального и физического старения, а также изменения условий эксплуатации нуждаются в улучшении их служебных характеристик или восстановлении. Часто эта необходимость касается структуры объекта, а восстановление заключается в устранении накопившихся повреждений и наращивании исходной структуры: увеличении количества узлов и связей между ними.

1. Постановка проблемы. В практике проектирования восстановления сложных систем с резервированием зачастую возникает необходимость оценки надежности будущего объекта, представленного на текущий момент лишь «старой», частично поврежденной структурой, не всегда доступной для оценки ее состояния.

При этом исследователь имеет информацию о вариантах проекта восстановливаемой части объекта, об исходном (проектном) состоянии существ-

вующей части, а также о некоторых измеряемых характеристиках ее «поведения» (трендах) за некоторый период до текущего времени включительно. Это могут быть параметры жизнедеятельности (температура, давление, концентрация), механические характеристики (напряжение, деформация) и др.

2. Анализ последних достижений и публикаций. Структура любого сложного объекта может быть представлена в виде сети, причем, для оценки структурной надежности резервированных сетей существуют различные методы [1]. В основе многих из них – нахождение математической зависимости между реальным текущим состоянием структуры объекта и его остаточной работоспособностью [2 – 4]. Подобный анализ частично не существующей системы, новая структура после восстановления которой только проектируется, еще больше затруднен тем, что состояние восстанавливаемой (существующей) ее части на этапе проектирования не может быть определено непосредственно: простым осмотром или каким-либо зондированием. В этом случае приходится пользоваться данными в виде некоторых косвенных сигналов от существующей части за некоторый отрезок времени, предшествующий восстановлению [5].

В методе оценки обобщенной (подвергшейся модернизации) структуры на основе характеристик косвенного сигнала должен быть предусмотрен определенный механизм анализа последнего, который позволяет получить желаемый результат. Применяемые при этом математические модели можно разделить на детерминированные и статистические. Детерминированные используются, если известны фундаментальные характеристики сигнала: ряд Фурье или, например, сумма экспонент. В таком случае достаточно просто описать подобную модель – для этого нужно подобрать (вычислить) ее параметры. Модели, базирующиеся на статистических характеристиках сигнала, описывают Гауссовы, пуассоновские, марковские, а также подобные им процессы.

3. Цель работы – создание дополнительных возможностей при принятии конструкторских решений при автоматизированном проектировании будущей структуры сложных ответственных резервированных объектов после восстановления.

4. Основной материал. Разобьем процесс поддержки принятия решений в САПР структуры сложных объектов после восстановления на два этапа.

На первом этапе определим реальное состояние существующей части объекта. Для этого рассмотрим две сущности, обладающие структурой: сложный резервированный объект и его структурная модель, причем, в начальном, проектном, неповрежденном состоянии обе эти структуры морфологически подобны. Последнее означает, что графы, описывающие эти структуры, равны: $\mathbf{H}_{об0} = \mathbf{H}_{мод0}$.

Предположим далее, что на протяжении жизненного цикла объекта в результате повреждений его структура итерационно изменяется в соответ-

вии с рядом $\mathbf{H}_{об\ r}$, где r ($0 \leq r \leq R$) – номер итерации цикла. Из-за отсутствия части объекта структура каждого из членов ряда $\mathbf{H}_{об\ r}$ нам не известна. Именно эта структура является фигурантом оценки – целью анализа объекта.

Предполагается также, что ряд структур модели $\mathbf{H}_{мод\ r}$, $0 \leq r \leq R$ известен на всем протяжении жизненного цикла и не обязательно после каждой итерации должна быть равна $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $r \neq 0$.

Сформулируем *задачу первого этапа*: даны: начальная структура исходного объекта $\mathbf{H}_{об0}$, равная ей начальная структура модели $\mathbf{H}_{мод0}$, произвольный ряд структур модели на всех итерациях жизненного цикла $\mathbf{H}_{мод\ r}$, $1 \leq r \leq R$ и некоторый тренд сигналов от объекта \mathbf{C}_r . Необходимо определить, как изменялась структура объекта $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $1 \leq r \leq R$.

Задача относится к категории обратных, когда значения параметров модели должны быть получены из наблюдаемых данных. Обратные задачи являются некорректно поставленными задачами. Из трёх условий корректно поставленной задачи (существование решения, единственность решения и его устойчивость) в обратных задачах наиболее часто нарушается последнее. В функциональном анализе обратная задача представляется в виде отображения между метрическими пространствами. Обратные задачи обычно формулируются в бесконечномерных пространствах, но ограничение на конечность измерений и целесообразность вычисления конечного числа неизвестных параметров приводят к изменению задачи в дискретной форме. В этом случае используют метод регуляризации для того, чтобы избежать переобучения [6].

Решение задачи первого этапа. Логика решения задачи вытекает из ее постановки: необходимо на каждой r -й итерации подобрать такую структуру модели, которая по некоторому показателю соответствовала бы тренду \mathbf{C}_r , и в этом случае признать равенство $\mathbf{H}_{мод\ r} = \mathbf{H}_{об\ r}$.

В качестве такого показателя был выбран энтропийный критерий надежности $E_{мод}$, получаемый на специальной компьютерной морфологической модели с помощью статистического эксперимента [2 – 4] (рис. 1).

Выражение для $E_{мод}$ имеет вид:

$$E_{мод} = - \sum_{q=Q_1+1}^{Q_2-1} [P_q \log_2 P_q + (1 - P_q) \log_2 (1 - P_q)], \quad (1)$$

где Q_1 – максимальное количество повреждений в резервированном объекте, при которых вероятность безотказной работы объекта, рассчитанная с помощью морфологической модели, еще равна 1, Q_2 – минимальное количество повреждений в резервированном объекте, при которых вероятность безотказной работы объекта уже равна 0, P_q – вероятность безотказной работы при q повреждениях.

Значение $E_{мод\ r}$ для произвольного $r > 0$ сравнивали с числом $E_{об\ r}$, которое получали из тренда \mathbf{C}_r с помощью скрытой марковской модели (СММ)

– статистической модели, имитирующей работу процесса внесения повреждений в структуру объекта, похожего на марковский процесс с неизвестными параметрами. Задачей СММ являлось «разгадывание» неизвестных параметров $\mathbf{H}_{об\ r}$ на основе наблюдаемых \mathbf{C}_r [5].

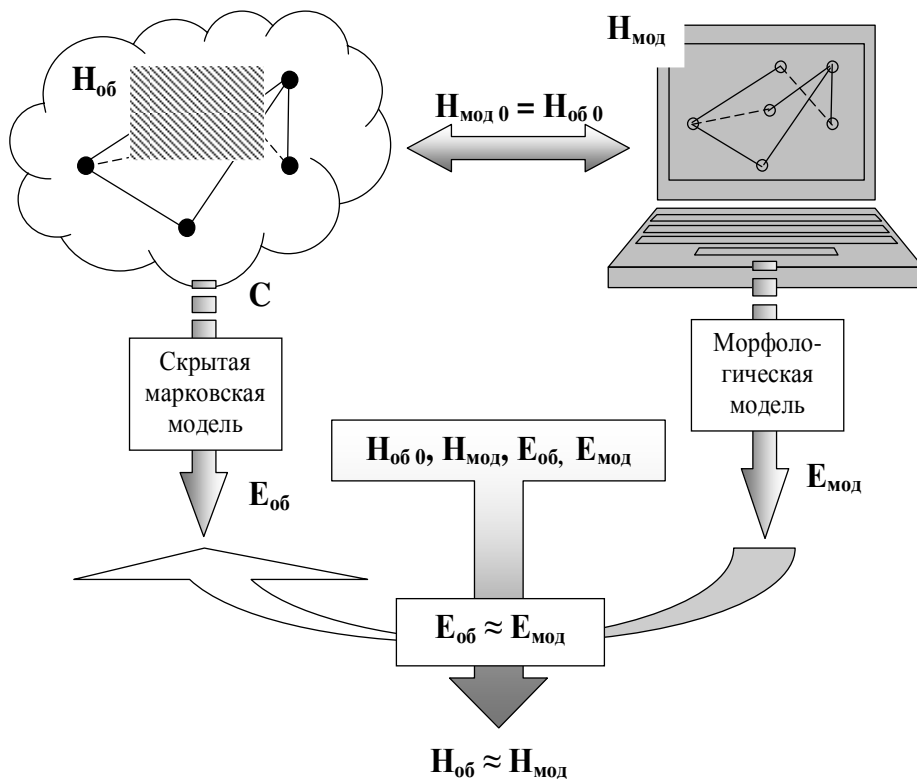


Рис. 1. Схема метода дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта для произвольного $r > 0$.

В основе такого метода – следующая гипотеза.

Гипотеза. Если энтропийные критерии объекта $E_{об\ r}$ и модели $E_{мод\ r}$ для произвольного $r > 0$ в некотором смысле сходственны, то по $\mathbf{H}_{мод\ r}$, обеспечивающему эту сходственность, можно с некоторой степенью вероятности судить о структуре (а значит, и о повреждениях!) скрытого объекта $\mathbf{H}_{об\ r}$.

В рассматриваемой задаче СММ определяется такими компонентами.

1. N – общее количество состояний резервированного объекта. Любое новое (отличное от исходного) состояние получается из предыдущего удалением некоторого количества элементов и (или) связей между ними. Обозначим общую совокупность состояний исследуемого объекта множеством $\mathbf{S} =$

Технології, матеріали, транспорт і логістика
Technologies, materials, transport and logistic

$\{S_1, S_2, \dots, S_i, S_j, \dots, S_N\}$, а текущую совокупность состояний объекта на итерации r как $S_r = \{S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{ir}, S_{jr}, \dots, S_{Nr}\}$.

Рассмотрим в качестве примера объект, структура которого выглядит так, как это представлено на рис. 2.

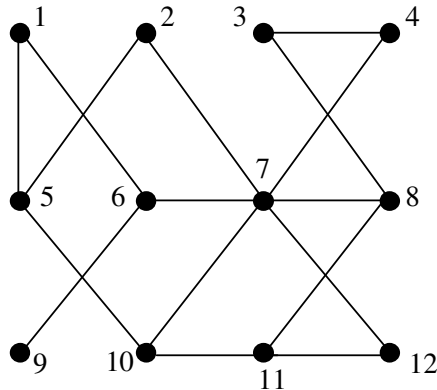


Рис. 2. Пример структуры объекта.

Если считать повреждениями только удаление узлов 1 – 12, то совокупность возможных поврежденных плюс исходное неповрежденное состояний этого объекта имеет мощность:

$$N = 2 \cdot 12! \sum_{l=1}^6 \frac{1}{l!(12-l)!} + 1 = 5019. \quad (2)$$

Таким образом, из начального состояния возможен переход к любому из 5019 состояний множества S мощностью N .

2. Распределение вероятностей начального состояния структуры объекта $\pi = \{\pi_i\}$, где

$$\pi_i = P[S_i], \quad 1 \leq i \leq N \quad (3)$$

есть вероятность того, что S_i – это начальное состояние модели.

В нашем случае в качестве единственного ($i = N = 1, S_0 = \{S_{10}\}$) начального состояния принимали его исходное «паспортное» состояние, а вероятность его «достижения», естественно, была равной $\pi_1 = 1$.

3. M – размер алфавита наблюдаемой последовательности $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$. Компоненты вектора C – суть числа, величина и размерность которых определяется предметной областью. Это могут быть, например, ряд давлений в медицине, ряд напряжений в механике, ряд токов в электротехнике и проч. Пользователь определяет также величину M и равномерность разбиения интервала значений C .

4. Алфавит значений энтропийного критерия $E_{об} = \{E_{об 1}, E_{об 2}, \dots, E_{об m}, \dots, E_{об M}\}$, подобранный в результате обучения СММ так, что его функцио-

нальная зависимость энтропийного критерия от алфавита наблюдаемой последовательности $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ известна.

5. Матрица вероятностей переходов (или матрица переходов) $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$, где

$$a_{ij} = P[S_{r+1} = S_j | S_r = S_i], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (4)$$

суть вероятность того, что объект, находящийся в состоянии S_i , перейдет в состояние S_j . Если для любых двух состояний в модели возможен переход из одного состояния в другое, то $a_{ij} > 0$ для любых i, j . В остальных СММ для некоторых i, j вероятность перехода $a_{ij} = 0$.

Матрица \mathbf{A} получается в результате предварительных испытаний объекта.

6. Распределение вероятностей появления того или иного сигнала из множества $\mathbf{C}_j = \{C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}, \dots, C_{Mj}\}$, когда объект находится в j -м состоянии, $\mathbf{B} = \{b_m(r)\}$:

$$b_m(r) = P[C_r | S_r = S_j], \quad 1 \leq j \leq N, \quad 1 \leq m \leq M, \quad (5)$$

где $b_m(r)$ – вероятность того, что на итерации r , объект, находящийся в j -м состоянии (состояние S_i), выдаст m -й символ (символ C_m) в наблюдаемую последовательность.

Матрица \mathbf{B} получается в результате обучения СММ.

Таким образом, полное описание СММ состоит из двух параметров модели (N и M), описания символов наблюдаемой последовательности и трех массивов вероятностей – \mathbf{A} , \mathbf{B} и $\boldsymbol{\pi}$: $\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$.

СММ строит наблюдаемую последовательность по следующему алгоритму.

1. Выбирается начальное состояние $S_1 = S_i$ в соответствии с $\boldsymbol{\pi}$.
2. Устанавливается $r = 1$.
3. Выбирается $C_r = C_m$ в соответствии с распределением $b_j(m)$ в состоянии (S_i).
4. Модель переводится в новое состояние $S_{r+1} = S_j$ в соответствии с матрицей переходов a_{ij} с учетом текущего состояния S_i .
5. Устанавливается итерация $r = r + 1$; далее возврат к шагу 3, если $r < R$; иначе – конец.

Продолжительность итераций определяется автоматически по мере наступления событий в объекте или принудительно пользователем.

Для решения задач настоящей работы использовали два варианта подхода к СММ.

Подход первый: обучение. Подобрать параметры модели $\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$ таким образом, чтобы максимизировать $P(\mathbf{C} | \boldsymbol{\lambda})$.

Решение прямой задачи обучения состоит в оптимизации модели с помощью обучающей последовательности таким образом, чтобы она как можно лучше описывала реальную наблюдаемую последовательность. При этом создается модель, наилучшим образом описывающая реальные процессы.

Подход второй: работа. Дана наблюдаемая последовательность S и модель $\lambda = (A, B, \pi)$. Необходимо подобрать последовательность состояний системы S , которая лучше всего соответствует наблюдаемой последовательности S , то есть «объясняет» наблюдаемую последовательность.

Эта задача обратная, в ней определяется, что же происходит в скрытой части модели, то есть ищется «правильная» последовательность, проходимая моделью. Ясно, что абсолютно точно нельзя определить эту последовательность. Здесь можно говорить лишь о предположениях с соответственной степенью достоверности.

Теперь можно сформулировать *задачу второго этапа*: рассчитать к каждому варианту проекта восстановления объекта некоторый критерий, по которому проектировщик сможет проранжировать варианты с точки зрения их структурной надежности. Для этого в настоящей работе пользовались представленной выше морфологической моделью [2 – 4].

Выводы. Разработан метод диагностики состояния сложных резервированных объектов, структура которых подвергается повреждениям на протяжении их жизненного цикла. Метод, основанный на реализации двух информационных моделей – скрытой марковской и морфологической, обеспечивает исследователя систем дополнительной диагностической информацией, обладающей высокой степенью достоверности. Это позволяет рекомендовать его для применения в широком спектре приложений: от медицины до строительной механики.

Литература.

1. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб: СПбГУ, 2007. – 326 с.
2. Налева, Г.В. Интеллектуальные методы повышения надежности телеметрической диагностики оборудования / Г.В. Налева, О.С. Савельева, Д.А. Пурич // Теорія і практика процесів. Подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: зб. наук. праць. – Вип.14. – Одеса ОНМА. – 2009. – С. 95 – 103.
3. Оценка сетевой надежности при структурном проектировании сложных технических систем / Т.В. Бирик, Л.В. Бовнегра, Д.А. Пурич, О.С. Савельева // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХП». – Харків, 2010. – Вип. 1(20). – С. 18 – 21.
4. Савельева, О.С. Морфологические модели отказоустойчивости сложных технических систем / О.С. Савельева, О.Е. Плачинда, Д.А. Пурич // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2011. – 3/2 (51). – С. 39 – 42.
5. Скрытые марковские модели. Материал из викиучебника. – Режим доступа: <http://ru.wikibooks.org/wiki/%D1%EA%F0%FB%F2%FB%E5_%EC%E0%F0%EA%EE%E2%F1%EA%E8%E5_%EC%EE%E4%E5%EB%E8>. – 08.08. 2012.
6. Обратная задача. – Режим доступа: <[http://ru.wikipedia.org/wiki/ Обратная_задача](http://ru.wikipedia.org/wiki/Обратная_задача)>. – 10.08.2012.