

УДК 004.08:519.1

Д.А. ПУРИЧ,

О.С. САВЕЛЬЕВА, канд. техн. наук,

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р. техн. наук, Одесса, Украина

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Запропонований метод експрес-аналізу структурної надійності частково недоступної моніторингу низькочастотної аналогової мережі із навантаженим резервуванням, заснований на чисельній взаємодії двох моделей: схованої марковської об'єкта діагностики та морфологічної комп'ютерної. Метод створює додаткові діагностичні можливості при обслуговуванні складних відповідальних об'єктів зі структурним резервуванням.

Предложен метод экспресс-анализа структурной надежности частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети с нагруженным резервированием, основанный на численном взаимодействии двух моделей: скрытой марковской объекта диагностики и морфологической компьютерной. Метод создает дополнительные диагностические возможности при обслуживании сложных ответственных объектов со структурным резервированием.

The method of the express analysis of low-frequency analog network partially inaccessible structural reliability to monitoring with the loaded reservation, based on numerical interaction of two models: hidden markov of preliminary treatment object and the morphological computer is offered. The method creates additional diagnostic possibilities at service of difficult responsible objects with structural reservation.

Введение. Многие ответственные объекты современного производства, энергетики, транспорта, медицины и пр. могут быть представлены в виде низкочастотной аналоговой сети с нагруженным резервированием и частично недоступными их непосредственному мониторингу фрагментами. «Прямая» диагностика (например, осмотр)

таких объектов затруднена их недоступностью, а современные цифровые методы исследования неприменимы из-за ограничений на частоту передаваемого по связям сетей сигнала. В качестве примера сравним диагностические возможности компьютерного сетевого кабеля, позволяющего получать полную цифровую характеристику состояния сети, и не только структурного, и стержень рамы моста, несущий только аналоговую информацию о механическом напряжении, деформации и параметрах колебаний звуковой частоты.

Постановка проблемы. В практике исследования надежности объектов в виде низкочастотных сетей с нагруженным резервированием зачастую возникает необходимость диагностики состояния латентной (ненаблюдаемой, скрытой) части последних. Примерами таких объектов могут служить недоступная по каким-либо причинам часть живого организма, измерительный комплекс (датчики, связи) системы контроля параметров АЭС, расположенный в опасной радиоактивной зоне, часть сложной механической конструкции, находящаяся в земле (фундамент), скрытые части резервированного электрооборудования транспортного средства в движении и многое другое. При этом исследователь имеет информацию об исходном состоянии латентной части, о состоянии наблюдаемой части сети, а также о некоторых измеряемых характеристиках «поведения» объекта в целом (трендах) за некоторый период до текущего времени включительно. Это могут быть параметры жизнедеятельности (температура, давление, концентрация), механические характеристики (напряжение, деформация) и др.

Анализ последних достижений и публикаций. Для оценки структурной надежности резервированных сетей существуют различные методы [1]. В основе многих из них – нахождение математической зависимости между повреждением структуры системы и ее остаточной работоспособностью [2 – 4]. Однако подобный анализ частично скрытой системы затруднен как раз тем, что состояние системы, целостность и повреждения ее структуры не могут быть определены непосредственно: простым осмотром или каким-либо зондированием. В этом случае приходится пользоваться некоторыми косвенными сигналами [5].

В методе оценки остаточной 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.

Цель работы – создание дополнительных диагностических возможностей при обслуживании сложных ответственных резервированных объектов путем разработки и внедрения метода дистанционной структурной диагностики частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети.

Основной материал. Рассмотрим две сущности, обладающие структурой: сложный резервированный объект и его структурная модель, причем, в начальном, неповрежденном состоянии обе эти структуры морфологически подобны. Последнее означает, что графы, описывающие эти структуры, равны: $\mathbf{H}_{об\ 0} = \mathbf{H}_{мод\ 0}$.

Далее, на протяжении жизненного цикла объекта в результате повреждений его структура итерационно изменяется в соответствии с рядом $\mathbf{H}_{об\ r}$, где r ($0 \leq r \leq R$) – номер итерации цикла. Из-за скрытости объекта (или его части) структура каждого из членов ряда $\mathbf{H}_{об\ r}$ нам не известна. Именно эта структура является текущим «диагнозом» – целью анализа объекта. Предполагается также, что ряд структур модели $\mathbf{H}_{мод\ r}$, $0 \leq r \leq R$ известна на всем протяжении жизненного цикла и не обязательно после каждой итерации должна быть равна $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $r \neq 0$.

Сформулируем **задачу**: известны: начальная структура объекта $\mathbf{H}_{об\ 0}$, равная ей начальная структура модели $\mathbf{H}_{мод\ 0}$, 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 $1 \leq r \leq R$ (рис. 1).

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.

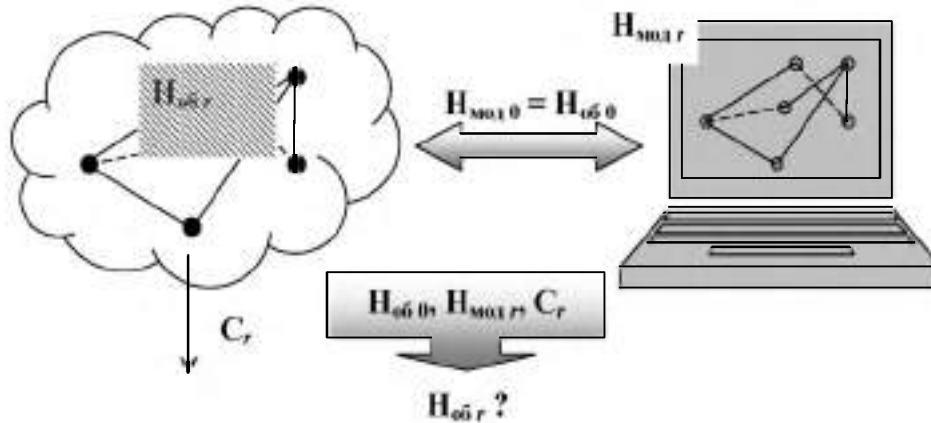


Рисунок 1 – Постановка задачи к методу дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта

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. Логика решения задачи вытекает из ее постановки: необходимо на каждой r -й итерации подобрать такую структуру модели, которая по некоторому показателю соответствовала бы тренду C_r , и в этом случае признать равенство $H_{мод r} = H_{об r}$. В качестве такого показателя был выбран энтропийный критерий надежности $E_{мод}$, получаемый на специальной компьютерной морфологической модели с помощью статистического эксперимента [2 – 4] (рис. 2)%

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

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.

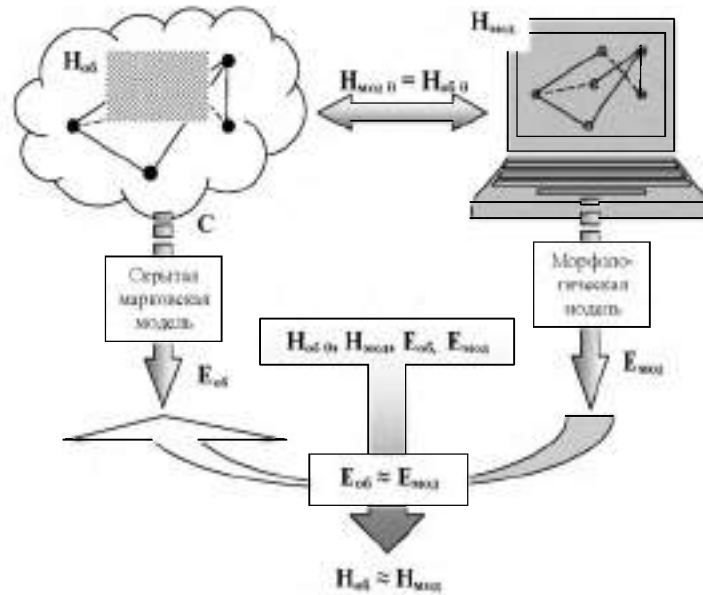


Рисунок 2 – Схема метода дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта для произвольного $r > 0$

Значение $E_{мод r}$ для произвольного $r > 0$ сравнивали с числом $E_{об r}$, которое получали из тренда 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 $H_{об}$ на основе наблюдаемых C_r [5].

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 $H_{мод r}$, обеспечивающему эту сходственность, можно с некоторой степенью вероятности судить о структуре (а значит, и о повреждениях!) скрытого объекта $H_{об r}$.

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 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, S_j, \dots, S_N\}$, а текущую совокупность состояний объекта на итерации r как $S_r = \{S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{ir}, S_{jr}, \dots, S_{Nr}\}$ (рис. 3).

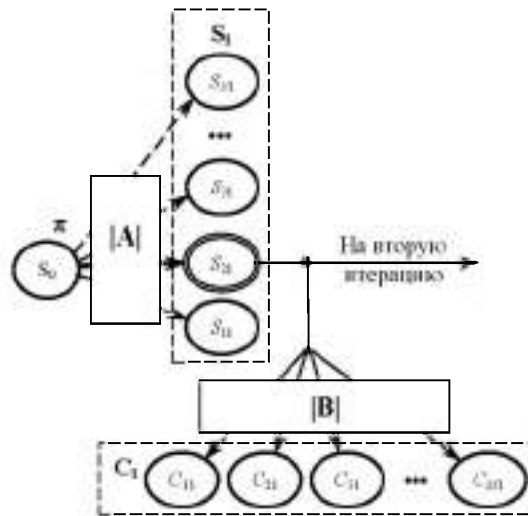


Рисунок 3 – Схема первой итерации моделирования ($r = 1$) с помощью СММ

Рассмотрим в качестве примера объект, структура которого выглядит так, как это представлено на рис. 4.

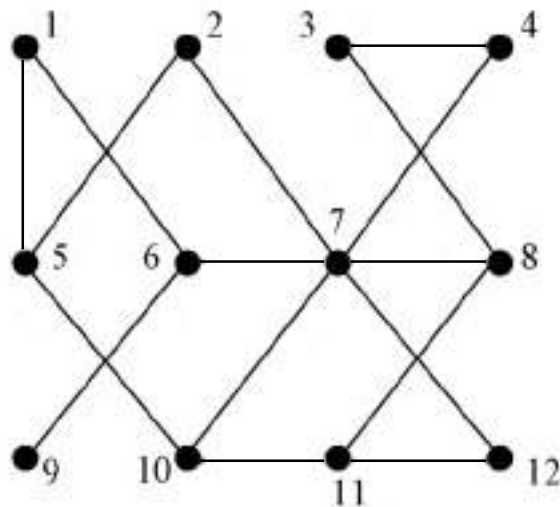


Рисунок 4 – Пример структуры объекта

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 $\pi_1 = 1$ (рис. 3).

3. M – размер алфавита наблюдаемой последовательности $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ (рис. 3). 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 функциональная зависимость энтропийного критерия от алфавита наблюдаемой последовательности $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ известна.

5. Матрица вероятностей переходов $A = \{a_{ij}\}$, 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 (рис. 3). 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.

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_j), 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 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.

Так, например, при использовании метода в медицине достоверность поставленного диагноза составила 76 % (при 28 больных), в механике – 82 % (при 34 различных рамных конструкциях).

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.

Список использованных источников: 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. Бибик, Л.В. Бовнегра, Д.А. Пурич* и др. // 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>. – 10.08.2012.