

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.

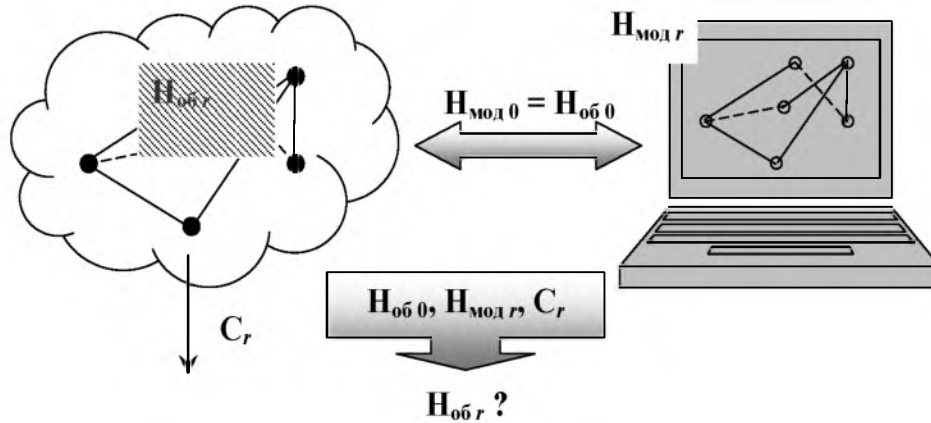


Рисунок 1 – Постановка задачи к методу дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта

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

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

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.

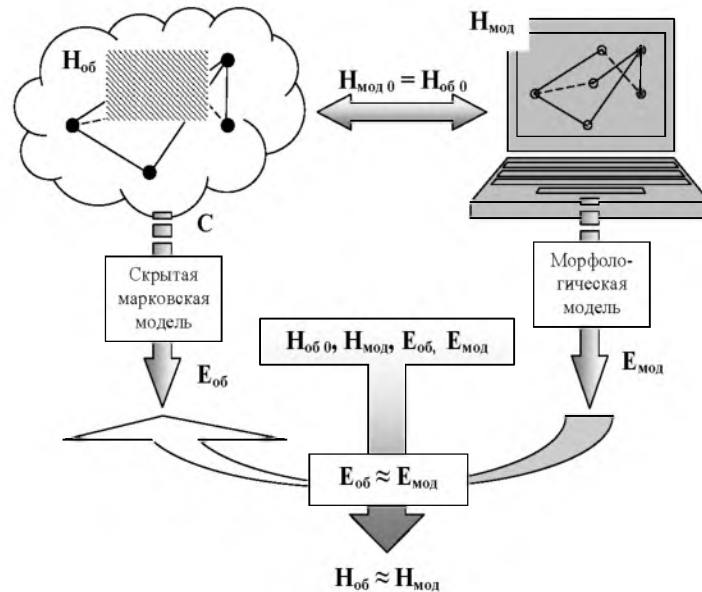


Рисунок 2 – Схема метода дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта для произвольного  $r > 0$

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).

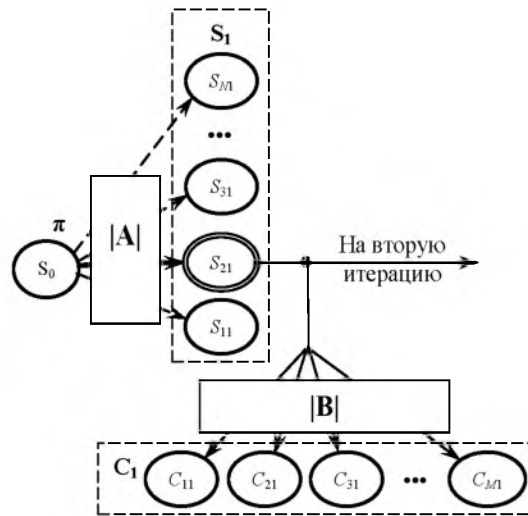


Рисунок 3 – Схема первой итерации моделирования ( $r = 1$ ) с помощью СММ

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

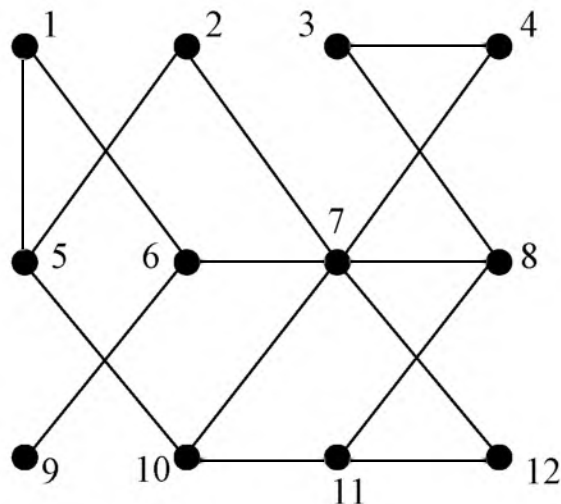


Рисунок 4 – Пример структуры объекта

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  $S_i$ ), 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 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](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.