

УДК 004.891.3.001.57

О.С. Савельева, канд. техн. наук, доц.
В.Г. Максимов, канд. техн. наук,
Д.А. Пурич, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

МЕТОД ДИСТАНЦИОННОЙ СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ АНАЛОГОВОЙ СЕТИ, ЧАСТИЧНО НЕДОСТУПНОЙ МОНИТОРИНГУ

О.С. Савельева, В.Г. Максимов, Д.А. Пурич. Метод дистанційної структурної діагностики низькочастотної аналогової мережі, частково недоступної моніторингу. Запропоновано метод дистанційної структурної діагностики частково недоступної моніторингу низькочастотної аналогової мережі, заснований на чисельній взаємодії двох моделей: схованої марковської об'єкта діагностики та морфологічної комп'ютерної. Метод забезпечує додаткові діагностичні можливості при обслуговуванні складних відпо-відальних об'єктів зі структурним резервуванням.

Ключові слова: структурна діагностика, аналогова мережа, структурне резервування.

О.С. Савельева, В.Г. Максимов, Д.А. Пурич. Метод дистанционной структурной диагностики низкочастотной аналоговой сети, частично недоступной мониторингу. Предложен метод дистанционной структурной диагностики частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети, основанный на численном взаимодействии двух моделей: скрытой марковской объекта диагностики и морфологической компьютерной. Метод обеспечивает дополнительные диагностические возможности при обслуживании сложных ответственных объектов со структурным резервированием.

Ключевые слова: структурная диагностика, аналоговая сеть, структурное резервирование.

O.S. Savelyeva, V.G. Maksimov, D.A. Purich. Method of remote structural diagnostics of a low-frequency analogue network partially inaccessible to monitoring. The method of remote structural preliminary treatment of the low-frequency analog network partially inaccessible to monitoring, based on numerical interaction of two models: the hidden Markov one of a diagnostic object, and the morphological computer one, is offered. The method creates additional diagnostic possibilities when servicing complex critical objects with structural reservation.

Keywords: structural diagnostics, analogue network, structural reservation.

Многие ответственные объекты современного производства, энергетики, транспорта, медицины и др. могут быть представлены в виде низкочастотной аналоговой сети с резервированием и частично недоступными для их непосредственного мониторинга 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. Примерами таких объектов могут служить недоступная по каким-либо причинам часть живого организма, часть сложной механической конструкции, находящаяся в земле (фундамент), скрытые части электрооборудования транспортного средства в движении и многое другое. При этом исследователь имеет информацию об исходном состоянии скрытой части, о состоянии доступной для наблюдения части объекта, а также о некоторых характеристиках “поведения” объекта в целом (трендах) за некоторый период до текущего времени включительно, которые можно непосредственно измерить (температура, давление, концентрация, напряжение).

В практике исследования надежности объектов в виде низкочастотных сетей с резервированием зачастую возникает необходимость диагностики состояния скрытой (недоступной) части последних.

Для оценки структурной надежности сетей с резервированием существуют различные методы [1]. В основе многих из них — нахождение математической зависимости между повреждением структуры системы и ее работоспособностью [2]. Однако подобный анализ для частично скрытой части объекта затруднен как раз тем, что его состояние, целостность и повреждения структуры не могут быть определены непосредственно: простым осмотром или каким-либо зондированием. В этом случае приходится пользоваться некоторыми косвенными сигналами [3]. Существующие методы оценки остаточной структуры на основе характеристик косвенного сигнала как правило содержат определенный математический аппарат анализа такого сигнала. Применяемые при этом 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.

Для создания дополнительных диагностических возможностей при обслуживании сложных ответственных объектов с резервированием предлагается использовать метод дистанционной структурной диагностики частично недоступной мониторингу низкочастотной аналоговой сети, который основывается на использовании двух моделей — скрытой марковской и морфологической, что позволяет исследователю получать дополнительную диагностическую информацию, обладающую высокой степенью достоверности.

Представим в начальном состоянии сам объект и его структурную модель в виде морфологически подобных графов $\mathbf{H}_{об\ 0} = \mathbf{H}_{мод\ 0}$, т.е. графы, описывающие эти структуры, равны.

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 $\mathbf{H}_{об\ r}$ не известна (рис. 1). Именно эта структура является текущим “диагнозом” — 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 должен быть равным $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $r \neq 0$. Имейм также некоторый тренд сигналов от объекта \mathbf{C}_r .

Задача определения изменения структуры объекта $\mathbf{H}_{об\ r}$ при $1 \leq r \leq R$ (см. рисунок 1) относится к категории обратных, когда значения параметров модели должны быть получены из наблюдаемых данных. Обратные задачи являются некорректно поставленными. Из трех 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 [3].

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 $\mathbf{H}_{мод\ r} = \mathbf{H}_{об\ r}$.

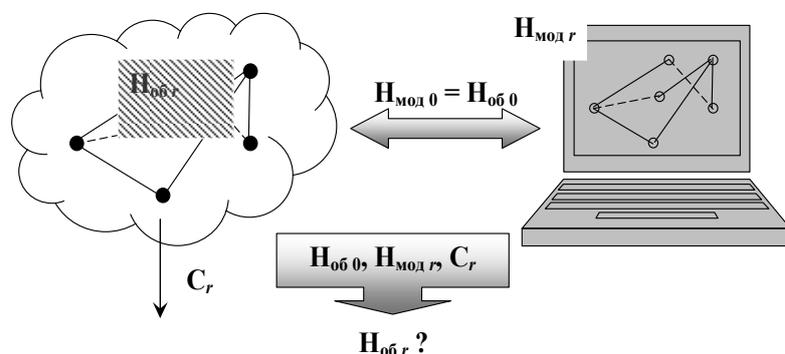


Рис. 1. К анализу методом дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта

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).

Выражение для $E_{\text{мод}}$ имеет вид

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

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 $E_{\text{мод } r}$ для произвольного $r > 0$ сравнивали с числом $E_{\text{об } r}$, 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 нахождение неизвестных параметров $H_{\text{об } r}$ на основе наблюдаемых C_r [3]. При этом полагали, что 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 $S_r = \{S_{1r}, S_{2r}, \dots, S_{ir}, S_{jr}, \dots, S_{Nr}\}$, тогда первую итерацию моделирования с помощью СММ можно представить в виде схемы (рис. 3).

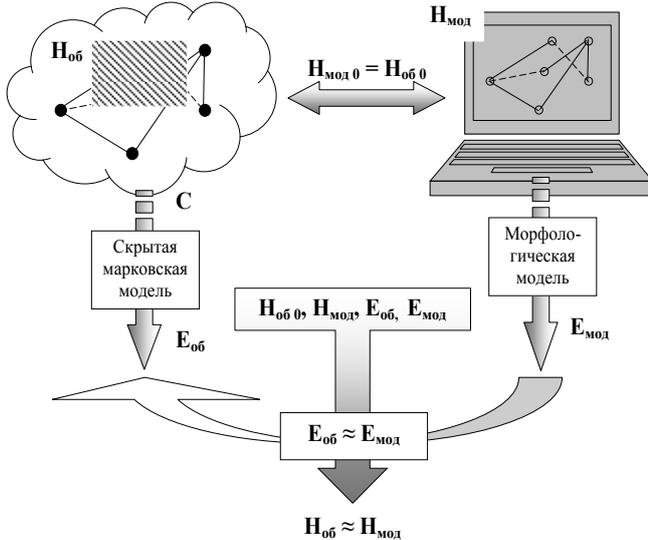


Рис. 2. Схема метода дистанционного определения состояния структуры частично недоступного объекта для произвольного $r > 0$

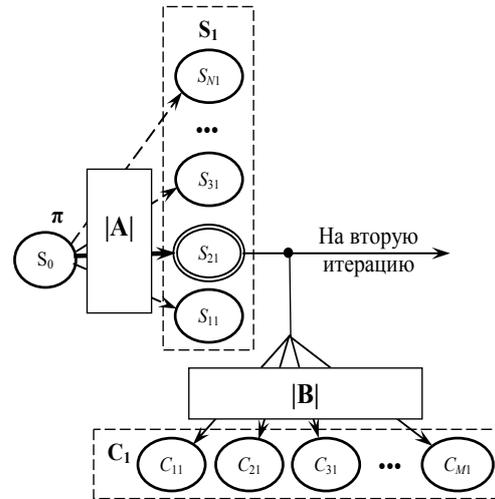


Рис. 3. Схема первой итерации моделирования ($r = 1$) с помощью СММ

— Распределение вероятностей начального состояния структуры объекта $\pi = \{\pi_i\}$, где $\pi_i = P[S_i]$, $1 \leq i \leq N$ 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 $\pi_1 = 1$.

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

— Алфавит значений энтропийного критерия $\mathbf{E}_{об} = \{E_{об\ 1}, E_{об\ 2}, \dots, E_{об\ m}, \dots, E_{об\ M}\}$ подобран в результате обучения СММ так, что его функциональная зависимость энтропийного критерия от алфавита наблюдаемой последовательности $\mathbf{C} = \{C_1, C_2, \dots, C_m, \dots, C_M\}$ известна.

— Матрица вероятностей переходов (или матрица переходов) $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}$, где $a_{ij} = P[S_{r+1} = S_j | S_r = S_i]$, $1 \leq i, j \leq N$. 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.

— 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, $\mathbf{B} = \{b_m(r)\}$,

$$b_m(r) = P[C_r | S_r = S_j], \quad 1 \leq j \leq N, \quad 1 \leq m \leq M, \quad (2)$$

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 λ состоит из двух параметров модели (N и M), описания символов наблюдаемой последовательности и трех массивов вероятностей — \mathbf{A} , \mathbf{B} и $\boldsymbol{\pi}$: $\lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$.

Для нахождения параметров структуры модели предлагается использовать два варианта подхода к СММ.

Подход первый: обучение. Подобрать параметры модели $\lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$ таким образом, чтобы максимизировать $P(\mathbf{C} | \lambda)$. Решение прямой задачи обучения состоит в оптимизации модели с помощью обучающей последовательности таким образом, чтобы она описывала реальную последовательность с достаточной точностью.

Подход второй: работа. Дана наблюдаемая последовательность \mathbf{C} и модель $\lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\pi})$. Необходимо подобрать последовательность состояний системы \mathbf{S} , которая лучше всего соответствует наблюдаемой последовательности \mathbf{C} , т.е. “объясняет” наблюдаемую последовательность. Эта задача обратная, в ней определяется, что же происходит в скрытой части модели, т.е. находится “правильная” последовательность, проходимая моделью. Однако, абсолютно точно определить эту последовательность нельзя, и речь может идти лишь о предположениях с определенной степенью достоверности.

Таким образом, для оценки остаточной структуры и диагностики состояния технических объектов с резервированием, имеющих частично недоступные для мониторинга составляющие, предложен метод, основанный на численном взаимодействии двух моделей – скрытой марковской и морфологической. В результате поитерационного моделирования состояния объекта и сравнения структур моделей с принятой величиной некоторого показателя можно с определенной достоверностью подтвердить выдвинутую гипотезу о состоянии объекта на протяжении некоторого интервала или в заданный момент времени.

Литература

1. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. — СПб: С.-Петербург. гос. ун-т, 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, ОН-МА. — 2009. — С. 95 — 103.

3. Загоруйко, Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н.Г. Загоруйко. — Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. — 270 с.
4. Оценка сетевой надежности при структурном проектировании сложных технических систем / Т.В. Бибик, Л.В. Бовнегра, Д.А. Пурич, О.С. Савельева // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. НТУ “ХПІ”. — Харків, 2010. — Вип. 1(20). — С. 18 — 21.
5. Савельева, О.С. Морфологические модели отказоустойчивости сложных технических систем / О.С. Савельева, О.Е. Плачинда, Д.А. Пурич // Восточ.-европ. журн. передовых технологий. Информ. технологии. — Харьков, 2011. — 3/2 (51). — С. 39 — 42.

References

1. Riabinin, I.A. Nadiezhost i bezopasnost strukturno-clozhuh system [Reliability and Safety of the Structurally Complex Systems]. — St.-Petersburg, 2007. — 326 p.
2. Nalieva, G.V. Intellectualnue metodu povushenia nadiezhosti telemetricheskoi diagnostiki oborudovaniia [Intellectual Methods for Increasing the Reliability of Telemetric Diagnostics of Equipment] / G.V. Nalieva, O.S. Saveleva, D.A. Purich // Teoria i praktuka prozhesiv. Podribnennia, rozdilenniaq, zmi-schuvannia i uzchilnennia: zb. nauk. Pratzh [Theory and Practice of Processes.Grinding, Separation, Mixing and Compaction: Coll. Sci. Papers]. — Vol. 14. — Odesa, ONMA. — 2009. — PP. 95 — 103.
3. Zagoruiko, N. G. Prikladnue metodu analiza dannuh i znaniy [Applied Methods of Analyzing Data and Knowledge] / N.G. Zagoruiko. — Novosibirsk: IM SO RAN, 1999. — 270 p.
4. Otzenka setevoi nadiezhosti pri strukturnom proektirovanii slozhnuh tehniceskikh system [Estimation of Network Reliability in the Structured Design of Complex Technical Systems] / T.V. Bibik, L.V. Bovnegra, D.A. Purich, O.S. Saveleva // Vusoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. pratzh NTU “HPI” [High Technologies in Machine Building: Coll. Sci. Papers of the Nat. Tech. Univ. “HPI”]. — Harkiv, 2010. — Vol. 1(20). — PP. 18 — 21.
5. Saveleva, O.S. Morphologicheskie modeli otkazouctoichivosti slozhnuh tehniceskikh sistem [Morphological Models of Fault Tolerance of Complex Technical Systems] / O.S. Saveleva, O.E. Plachinda, D.A. Purich // Vostoch.-evrop. zhur. peredovuh tehnologi. Inform. Tehnologii [East Europ. J. of Advanced Technologies]. — Kharkov, 2011. — 3/2 (51). — С. 39 — 42.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Ситников В.С.

Поступила в редакцию 3 июля 2012 г.