

СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ РИСКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Приводятся основные положения по разработке системы прогнозирования и оценки риска эксплуатации промышленных зданий и сооружений, функционирующих в критических и близких к ним режимах.

Ключевые слова: прогнозирование, промышленные здания и сооружения, системы мониторинга.

N.A. Loskutov, A.S. Kozharinov

FORECASTING AND RISK ASSESSMENT SYSTEM OF OPERATION OF INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES

Major theses of forecasting and risk estimation system of exploitation buildings and structures, which function under critical or close to critical conditions are provided.

Key words: forecasting, industrial buildings and structures, monitoring systems.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 23 мая 2017 г.

За последние годы в России обострилась проблема обеспечения безопасности объектов промышленного назначения. В 2014 г. средняя степень износа промышленных **зданий и сооружений (ЗиС)**, по данным Росстата превысила 50 % [1]. Эта объективная оценка позволяет спрогнозировать увеличение числа аварий и чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах уже в самом ближайшем будущем. Для снижения рисков в разных областях промышленности, для объектов транспортной и социальной инфраструктуры разрабатывают и используют различные аппаратно-программные **системы мониторинга (СМ)**. Такие системы позволяют отслеживать динамику различных показателей, являющихся ключевыми для оценки состояний ЗиС, рабочих зон и территорий, промышленной инфраструктуры, оборудования и разнообразных объектов технического назначения. Однако, если здание или сооружение имеет сложный режим эксплуатации, высокую степень износа, проектные и/или строительные нарушения, подвергается каким-либо внешним воздействиям (в первую очередь, погодные и сейсмические явления), то только функций мониторинга для снижения рисков уже недостаточно.

Необходимо совершенствовать технологию СМ в таком направлении, которое позволит наделять их функциональностью, связанной с своевременным получением *высокоточных и надёжных прогнозов* о неблагоприятной эскалации развития процессов, находящихся под наблюдением (например, критические изменения нагрузок и деформации строительных конструкций ЗиС при сложных погодных условиях). Получение и правильное использование таких прогнозов существенно снизит риски эксплуатации ЗиС, возникновения

аварий и ЧС на промышленных объектах. Прогнозирование может быть осуществлено только с использованием самых современных достижений в области прикладной математики, искусственного интеллекта и информационных технологий.

Сотрудниками НИТУ "МИСиС", совместно с ведущими экспертными организациями в области промышленной безопасности, был создан промышленный прототип автоматизированной **интеллектуальной системы прогнозирования (ИСП)** состояний и предварительной оценки ущерба (рисков) для типовых спортивных зданий и сооружений Московского региона [2]. В основе интеллектуального математического блока ИСП лежит модифицированная **искусственная нейронная** рекуррентная **сеть (ИНС)** модели Элмана, прогнозирующая значения временных рядов показаний датчиков в режиме "мягкого" реального времени [2].

Положительные результаты НИР послужили базой для дальнейшего развития реализованных в ИСП идей и решений. Решается задача создания принципиально нового программного комплекса, реализующего **систему прогнозирования и оценки риска** состояний **зданий и сооружений (СПОР-ЗиС)**, а также различных промышленных объектов. Разрабатываемая СПОР-ЗиС должна, как и ИСП, решать аналогичные задачи, но уже для более широкого спектра предметных областей.

Основными подзадачами проводимого исследования являются:

1. Разработка архитектурной концепции и системы требований к функциональности СПОР-ЗиС, включающей функции прогнозирования и оценки рисков.
2. Нарботка основных принципов методики создания таких систем.
3. Создание системы для конкретного класса промышленных ЗиС.

Типовой предметной областью для разрабатываемой СПОР-ЗиС будет являться множество ЗиС промышленного назначения, отвечающее следующим условиям:

- все ЗиС подключены к единой, отдельной от СПОР-ЗиС, **системе мониторинга технических показателей (СМТП)**, которая обеспечивает сбор, сохранность и контроль поступающей первичной информации с объектов мониторинга;

- на каждом из ЗиС установлены устройства (датчики) сбора первичной информации о состоянии контролируемых в ЗиС: элементах строительных конструкций; территорий (зоны, участки); машин, оборудования и каких-либо технологических объектов; внутренней атмосферы и т.д.

- каждый датчик формирует временной ряд (последовательность) показаний, который сохраняется в базе данных СМТП, а множество всех временных рядов, сохраняемое в СМТП, формирует общее пространство исходных данных СПОР-ЗиС.

Разрабатываемая СПОР-ЗиС никаким образом не пересекается по функциональности с СМТП, не влияет на её работоспособность и использует СМТП только как источник данных для прогнозирования и последующего анализа

рисков. Предполагается, что в качестве устройств получения первичных данных могут использоваться следующие типы датчиков: тензорезисторы, инклинометры, анемометры, сейсмодатчики; датчики контроля раскрытия трещин, уровня влажности, температуры и т.д.

В настоящий момент значительное число применяемых СМТП не обладают функциями прогнозирования и оценки рисков, а многие существующие примеры СМТП представляют собой "продвинутые" варианты комплексов, известных как системы мониторинга несущих конструкций. Однако, несмотря на то, что работы в этой области давно ведутся и имеются уже неплохие примеры действующих систем прогнозирования, тем не менее, результаты в данном направлении представлены лишь небольшим числом исследовательских проектов, как уже упомянутая ранее работа [2].

В целом наличие возможностей прогнозирования и оценки рисков развития тех или иных процессов, контролируемых СМТП, могло бы существенно снизить риски эксплуатации следующего ряда сооружений:

- ЗиС с дефектами, допущенными при проектировании;
- ЗиС построенные с нарушениями норм или при строительстве которых были допущены дефекты;
- ЗиС, получившие повреждения в ходе эксплуатации;
- старые ЗиС, находящиеся в состоянии, близком к аварийному;
- шахтные комплексы;
- ЗиС, находящиеся в зоне обильных снегопадов и имеющие конструкции, способствующие накоплению больших масс снега на крышах и перекрытиях;
- ЗиС, эксплуатирующиеся в зонах сложных погодных, сейсмических условий и размыва почв;
- промышленные ЗиС, имеющие режим эксплуатации, предусматривающий экстремальные нагрузки.

Создание СПОР-ЗиС затрудняется также и потому, что деятельность и результаты в сфере информационных технологий и научных исследований для решения задач техносферной безопасности должна отвечать многочисленным требованиям, нормам и стандартам, устанавливаемым на уровне федерального законодательства и нормативных документов соответствующих органов государственной власти.

Результаты прогнозирования всегда носят вероятностный характер, который накладывает особый отпечаток на требования к надёжности и точности как самих прогнозов, так и к функциональности программных систем. Нормативные документы, систематизирующие требования к программным комплексам прогнозирования, необходимы, поскольку такие системы являются сложным программным обеспечением с высоким уровнем наукоёмкости.

Особое внимание надо уделять требованиям к системам, использующим методы искусственного интеллекта, поскольку для ряда его областей до сих пор не существует законченных и общепринятых теорий. Поэтому любые методические предложения, инженерные решения и особенно применение научных методов в области техносферной безопасности необходимо нормативно закреплять.

Исходными данными для системы прогнозирования являются временные ряды, образованные значениями показателей, поступающими с датчиков СМ. Каждому датчику соответствует один временной ряд, представляющий собой упорядоченную последовательность пар время – значение показателя.

Данные временные ряды можно охарактеризовать как одномерные, случайные, интервальные и равноотстоящие. В силу характера эксплуатации ЗиС они имеют большое количество промежутков нестационарности, что хорошо заметно на рис. 1. Как правило, при штатной эксплуатации СМ ряды будут полными, отсутствие значений же говорит о сбоях в системе мониторинга.

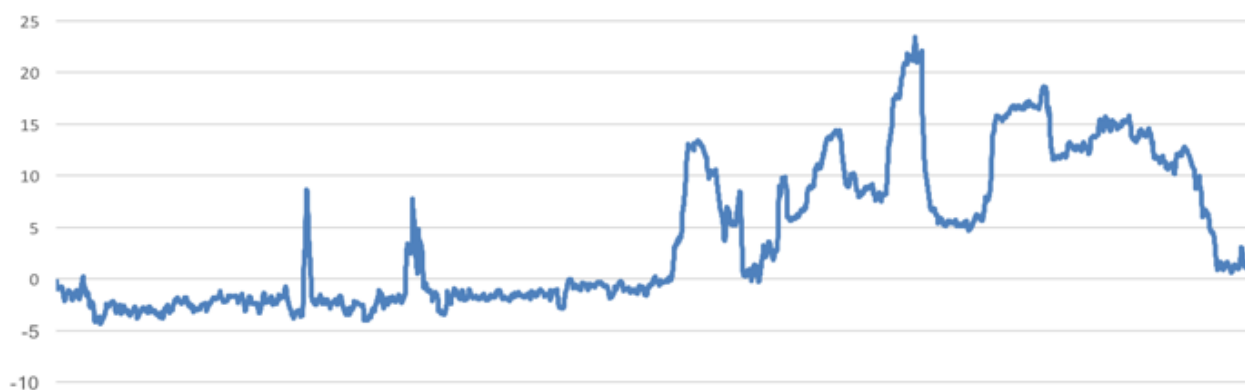


Рис. 1. Промежутки нестационарности в структуре временного ряда

В ряде случаев, во временных рядах может наблюдаться сезонная компонента, что характерно для ЗиС, в эксплуатации которых имеются различные периоды интенсивности.

Некоторые временные ряды, относящиеся к датчикам, установленным на связанных конструкциях, могут также определённым образом коррелировать друг с другом, пример приведён на рис. 2. Эта особенность может быть полезна для восстановления пропущенных значений в случае сбоев в работе СМ.

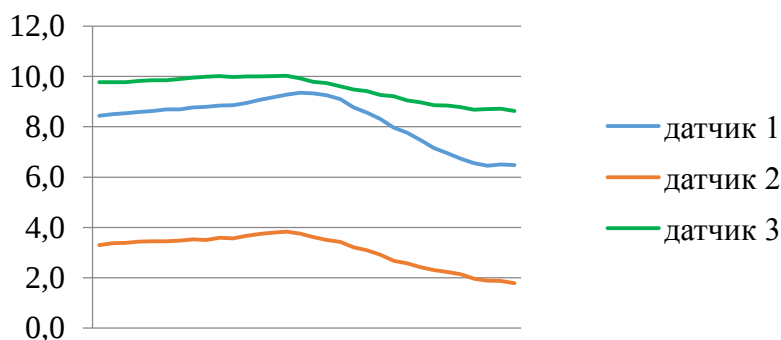


Рис. 2. Пример коррелирующих временных рядов

В общем случае для заданного ЗиС задача прогнозирования выглядит следующим образом.

Ключевые технические показатели исследуемого объекта измеряются с использованием фиксированного набора датчиков $\{D_k\}_{k=1}^K$. Каждый отдельный датчик D_k отслеживает единственный показатель и описывается следующей моделью состояния k -го показателя:

$$f_{D_k}(t): T \rightarrow X_{D_k},$$

где множество $T = \{t_n\}_{n=1}^N \subset [0, +\infty)$ представляет собой дискретную равномерную временную шкалу. Датчик D_k записывает историю показаний, начиная с момента своего включения $t_0 = 0$. Последующие замеры происходят в равноотстоящие моменты времени $t_{k+1} = t_k + \tau$, где $\tau > 0$ – временной шаг синхронизации датчика;

- множество X_{D_k} представляет собой показания датчика D_k . Как правило, конкретная структура множества показаний описывается в технических характеристиках самого датчика D_k ; из содержательного наполнения ясно, что множество X_{D_k} ограничено. Зачастую $X_{D_k} = [\alpha, \beta]$, где α и β – нижний и верхний пороги чувствительности датчика D_k .

Серия пар "время – значение" $\{(t_n, f_{D_k}(t_n))\}_{n=1}^N$ характеризует динамику изменений показаний k -го датчика. Все датчики работают синхронно.

Рассмотрим пространство состояний исследуемого объекта:

$$X = \prod_{k=1}^K X_{D_k} X_{D_k},$$

состоящее из всевозможных K -мерных точек $x = (x_1, x_2, \dots, x_K)$,

где $x_1 \in X_{D_1}, x_2 \in X_{D_2}, \dots, x_K \in X_{D_K}$.

Каждая точка $x \in X$ представляет собой совокупность показаний всех датчиков в некоторый момент времени и характеризует техническое состояние объекта исследования в целом.

Для описания динамики изменения состояния объекта во времени, введём в рассмотрение векторнозначную функцию скалярного аргумента, описывающую состояние объекта в момент времени t :

$$f(t): T \rightarrow X, \quad f(t) = \begin{pmatrix} f_{D_1}(t) \\ f_{D_2}(t) \\ \dots \\ f_{D_K}(t) \end{pmatrix}.$$

С использованием этой функции можно сформировать многомерный временной ряд

$$\{(t_n, f(t_n))\}_{n=1}^N,$$

собранный в результате функционирования датчиков за N моментов времени.

Требуется спрогнозировать значения $f(t_{N+1}), f(t_{N+2}), \dots, f(t_{N+M})$ для натурального $M > 0$.

Каждому датчику сопоставлена шкала состояния, состоящая из трёх секторов: {"Норма", "Внимание", "Опасность"}. Общее состояние объекта определяется как наихудшее из состояний, определённое по значениям измеряемых показателей.

Основные требования к функциональности разрабатываемой СПОР-ЗиС заключаются в следующем. Любая система прогнозирования и оценки риска состояний зданий и сооружений, использующая в качестве основных исходных данных временные ряды, сформированные последовательностями показаний датчиков, применяемых для контроля состояния ЗиС, *должна обладать* следующими основными функциональными возможностями:

- подготовка временных рядов для последующей обработки (очистка данных, заполнение пропусков, нормализация и т.п. процедуры);
- анализ динамики временных рядов с соблюдением условий, установленных для каждого ЗиС;
- выбор метода прогнозирования для каждого временного ряда;
- прогнозирование значений каждого временного ряда для всего множества ЗиС в заданном режиме и с соблюдением установленных условий для каждого ЗиС;
- оценка качества выполненного прогнозирования путём вычислений заданного множества показателей качества (метрик) и последующего анализа качества прогноза;
- вычисление (на основании результатов прогнозирования) оценки заданного множества рисков для изначального известного множества сценариев возможных аварий и ЧС;
- формирование отчётности по результатам работы системы.
- надёжное и долговременное хранение всех результатов вычислений и анализа;
- предоставление дружественного пользовательского интерфейса;
- предоставление развёрнутых возможностей по администрированию СПОР.

В качестве концепции построения СПОР-ЗиС предлагается функциональная схема, представленная на рис. 3.

Сбор данных о состоянии объекта осуществляется системой датчиков, установленных на ключевых конструктивных элементах ЗиС. Также система сбора первичных данных должна обеспечивать получение информации из внешних источников: например, погодные прогнозы, прогнозы сейсмической обстановки и т.д.

Собранные данные необходимы для построения прогноза технических показателей. Подсистема прогнозирования – это важнейший элемент СПОР-ЗиС, от эффективности работы которого зависит функционирование всей системы.

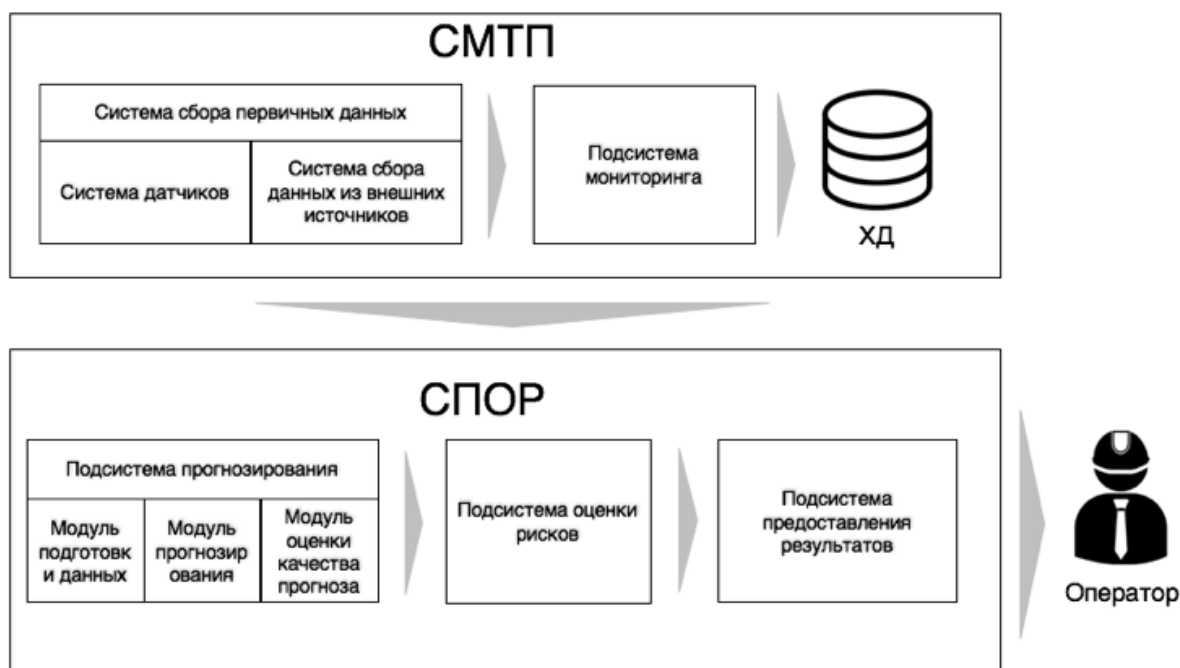


Рис. 3. Общая функциональная схема СПОР

Предлагается для обеспечения наибольшей адаптивности в основу её построения положить принцип композиции придективных алгоритмов, общие положения которого описаны в работах [5, 6]. В соответствии с данным принципом, прогнозирование может осуществляться путём применения ряда методов. Наиболее перспективными являются нейросети, дающие качественные результаты при прогнозировании временных рядов, что подтверждается многочисленными работами в различных областях [7-10].

Подбор и адаптация методов является одной из наиболее сложных задач. В настоящий момент она осуществляется либо вручную, либо с использованием особенностей временного ряда, например, сезонности, корреляции с какими-либо событиями и т.д., как, например, в работе [7]. Однако, для рассматриваемой предметной области такой подход неприемлем. Необходима разработка системного модуля, способного оценивать качество прогнозирования и осуществлять подбор методов в автоматическом режиме.

Также важным элементом подсистемы прогнозирования является модуль подготовки исходных данных, необходимый для решения таких задач как контроль выбросов, обработка пустых значений и т.д.

На основе полученных прогнозов необходимо производить оценку рисков эксплуатации ЗиС в стоимостном эквиваленте. Одним из возможных вариантов реализации модуля оценки рисков является реализация посредством построения экспертной системы. Что объясняется тем, что знания, позволяющие оценить ущерб от разрушения конструкций, являются сложно формализуемыми. Разработка данного модуля является перспективной и будет рассмотрена в последующих публикациях.

Также СПОР-ЗиС должна содержать подсистему предоставления результатов, предназначенную для построения аналитических отчётов.

Литература

1. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund/#
2. Кожаринов А.С., Виноградов И.Е. Система прогнозирования состояний спортивных зданий и сооружений на базе нейронной сети Элмана // Труды 6-й междун. конф. "Системный анализ и информационные технологии" САИТ – 2015 (г. Светлогорск). В 2-х т. Т. 1. С. 264-272.
3. Воронцов К.В., Каневский Д.Ю. Коэволюционный метод обучения алгоритмических композиций // Таврический вестник информатики и математики. 2005. № 2. С. 51-66.
4. Воронцов К.В., Егорова Е.В. Динамически адаптируемые композиции алгоритмов прогнозирования // Искусственный Интеллект. 2006. С. 277-280.
5. Intelligent techniques for forecasting multiple time series in real- world systems / Wagner N., Michalewicz Z., Schellenberg S., Chiriac C., Mohais A. // International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. 4 (2011). No 3. Pp. 284-310.
6. Marvuglia A., Messineo A. Using recurrent artificial neural networks to forecast household electricity consumption // Energy Procedia. V. 14. 2012. Pp. 45-55.
7. Multi-scale Internet traffic forecasting using neural networks and time series methods / Cortez P., Rio M., Rocha M., Sousa P. // ExpertSystems. May 2012. Vol 29. No 2. Pp. 143-155.
8. A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building / Khosravani H.R., Del Mar Castilla M., Berenguel M., Ruano A.E., Ferreira P.M. // Energies. 2016, 9, 57.

References

1. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund/#
2. Kozharinov A.S., Vinogradov I.E. Sistema prognozirovaniya sostojanij sportivnyh zdaniy i sooruzhenij na baze nejronnoj seti Jelmana (The system of predicting the States of sports buildings and structures based on The Elman neural network) // Trudy 6-j mezhdun. konf. "Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii" SAIT – 2015 (g. Svetlogorsk). V 2-h t. T. 1. Pp. 264-272.
3. Voroncov K.V., Kanevskij D.Ju. Kojevoljucionnyj metod obuchenija algoritmicheskikh kompozicij (Co-evolutionary learning method algorithmic compositions) // Tavricheskij vestnik informatiki i matematiki. 2005. № 2. Pp. 51-66.
4. Voroncov K.V., Egorova E.V. Dinamicheski adaptiruemye kompozicii algoritmov prognozirovaniya (Dynamic adaptable compositions of prediction algorithms) // Iskusstvennyj Intel- lekt. 2006. Pp. 277-280.
5. Intelligent techniques for forecasting multiple time series in real- world systems / Wagner N., Michalewicz Z., Schellenberg S., Chiriac C., Mohais A. // International Journal of Intel- ligent Computing and Cybernetics. 4 (2011). No 3. Pp. 284-310.
6. Marvuglia A., Messineo A. Using recurrent artificial neural networks to forecast house- hold electricity consumption // Energy Procedia. V. 14. 2012. Pp. 45-55.
7. Multi-scale Internet traffic forecasting using neural networks and time series methods / Cortez P., Rio M., Rocha M., Sousa P. // ExpertSystems. May 2012. Vol 29. No 2. Pp. 143-155.
8. A Comparison of Energy Consumption Prediction Models Based on Neural Networks of a Bioclimatic Building / Khosravani H.R., Del Mar Castilla M., Berenguel M., Ruano A.E., Ferreira P.M. // Energies. 2016, 9, 57.