
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 004.89+519.876+519.2

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ВЫПОЛНЕНИЯ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

© 2019 г. В. А. Холопов*, Е. Н. Каширская, А. Г. Шмелева, Е. В. Курнасов

*Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, Россия*** e-mail: holopov@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Неотъемлемой частью производственной системы является мониторинг выполнения технологических процессов. В настоящей статье предложены процедуры оценки характеристик технологических операций, позволяющие отслеживать как процент отказа каждого станка, так и всей системы на каждом этапе технологического процесса. Построена имитационная модель производственной системы, описывающая технологические процессы, разные по продолжительности и по набору операций, в основе которой используется математическая модель в виде цепей Маркова, когда число различных состояний системы конечно, а изменения состояний системы происходят в различные дискретные моменты времени. Первоначальное формирование набора факторов возникновения нештатных ситуаций в производственной системе определяется с использованием метода экспертных оценок. Использование метода Парето позволяет выявить наиболее часто встречающиеся факторы сбоев выполнения технологических операций. Нейронная сеть позволяет смоделировать различные ситуации и просчитать вероятность нарушения выполнения технологических процессов. Предложена процедура формирования матрицы переходных вероятностей как для первоначальной оценки выполнимости технологических процессов, так и матрицы, изменяющиеся дискретно во времени в зависимости от состояния выполнения технологической операции. На основе предложенных методов разработан интеллектуальная система мониторинга выполнения машиностроительных технологических процессов.

Ключевые слова: моделирование производственной системы, мониторинг процессов, интеллектуальные системы, автоматизация технологических процессов

DOI: 10.1134/S023571191902007X

Введение. Под мониторингом понимают идентификацию отклонений характеристик объекта мониторинга от штатного режима функционирования, либо выявления тенденции изменения характеристик на основе систематического сбора и анализа информации об объекте. Задача мониторинга характерна для тех видов деятельности, где наблюдаемый объект является сложной многокомпонентной системой [1–3], о состоянии которой можно судить по изменению свойств системы в целом или совокупности составляющих ее объектов.

В простейших случаях, для которых достаточно решить задачу сбора данных, сигнал датчика является одновременно и сигналом об отклонении функционирования системы от штатного режима. Пожарная сигнализация является очевидным примером, когда срабатывание одного датчика является сигналом об отклонении условий на наблюдаемом объекте от штатного режима. Возможностей систем сбора данных недо-

статочно для мониторинга систем, штатный режим которых характеризуется наличием “фоновых” сигналов датчиков. Наличие фона характерно для большинства сложных систем [4]. Примером в нашем случае является мониторинг выполнения технологического процесса при изготовлении изделий машиностроения. Построение системы мониторинга требует решения значительного количества различных многокритериальных задач с применением технологий искусственного интеллекта.

Для мониторинга таких систем необходимы более точные методы обработки информации, работающие в условиях наличия фона. Достаточной для применения в широком диапазоне предметных областей общностью обладают методы интеллектуального анализа данных, исследуемые в рамках искусственного интеллекта. Однако их применение на практике часто ограничено в связи со сложностью реализации и обучения интеллектуальных структур. Разрыв между простейшими методами и методами интеллектуального анализа данных приводит к появлению большого количества узкоспециализированных прикладных систем [5–7], число которых даже в одной предметной области достаточно велико.

Мониторинг состояний технологического процесса включает в себя сбор и аналитическую обработку больших объемов неструктурированной информации. Мониторинг может быть реализован только при условии определенной упорядоченности и взаимосвязи его элементов.

Автоматизация мониторинга и разработки программных систем, являющиеся необходимыми элементами в управлении, повышают эффективность процессов мониторинга в сложных системах. С учетом интеллектуальной составляющей процессов мониторинга, связанной с аналитической обработкой данных, агентная парадигма разработки программных систем представляется наиболее приемлемой как с точки зрения основных принципов автоматизации мониторинга, так и с позиций современных подходов в программной инженерии.

Мониторинг как процесс является неформализованной задачей, характеризующихся следующими свойствами: задача не может быть представлена в числовой форме; основные цели не могут быть описаны с помощью детерминированной функции; не существует алгоритмизированного решения задачи.

Перечисленные свойства дают основание на применение методов искусственного интеллекта.

Технологии искусственного интеллекта находят применение для мониторинга процессов в различных технических системах. Так, с помощью нейронных сетей анализируются аварии в полупроводниковой промышленности [8], прогнозируется качество изготовления деталей [9]. В работе [10] на основе экспертной системы с использованием аппарата нечеткой логики предложена навигационная система.

Вышеуказанные подходы к реализации мониторинга процессов являются основополагающими при создании различных компонент автоматизированных систем контроля в различных предметных областях и обеспечивают методическое единство всех подсистем управления.

Целью данной статьи является разработка комплексного подхода к построению системы мониторинга и оценивания технологических процессов при изготовлении продукции на многономенклатурном мелкосерийном машиностроительном производстве, с применением технологий искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: построить модель производственной системы для оценки вероятности возникновения отказов технологических операций; построить имитационную модель определения вероятности выполнения технологического процесса в реальном масштабе времени; разработать структуру интеллектуальной системы мониторинга.

Моделирование производственной системы. Производственные системы машиностроительных предприятий обладают большой степенью уникальности, особенно ко-

гда тип производства относится к многономенклатурному и мелкосерийному [11]. Это обусловлено тем, что предприятия, оснащенные уникальным набором технологического оборудования, реализующего технологические процессы, либо уникальны, либо обладают собственной спецификой, а подходы к организации и проведению вспомогательных производственных процессов существенно отличаются даже на однотипных производствах. Такое свойство рассматриваемых производств не дает возможности создать универсальную систему мониторинга выполнения технологических процессов, без методики адаптации системы к конкретному производству, реализуемому в цехе данного предприятия.

Для решения поставленной задачи разработана методика моделирования конкретной производственной системы, которая направлена на анализ параметров технологических операций с целью выявления факторов возникновения нештатных ситуаций при реализации технологических процессов. Результатом моделирования будет являться модель оценки производственной системы, определяющая вероятность возникновения отказов технологических операций.

Методика моделирования производственной системы строится на использовании: системы экспертных оценок, необходимой для определения совокупности факторов и степени их влияния на отказы и сбои технологического оборудования и выполнения технологических операций; анализа Парето, необходимого для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на выполнение технологических операций конкретного технологического процесса; нейронной сети, необходимой для определения вероятности выполнения технологических операций данного технологического процесса с учетом совокупности всех технологических операций, протекающих в цехе.

Моделирование производственной системы выполняется в следующей последовательности: формирование группы экспертов; изучение характеристик технологических операций; формирование массива факторов; экспертная оценка факторов; выявление значимых факторов; экспертная оценка вероятности сбоев технологических операций при возникновении факторов; формирование множества вероятностей возникновения нештатных ситуаций; формирование обучающей выборки для нейронной сети; обучение нейронной сети; формирование базы знаний (данных) – информационных карт технологических операций и соответствующих расчетных вероятностей отказа выполнения технологических операций.

Процесс моделирования направлен на анализ функционирующей производственной системы предприятия для выявления факторов, параметров, характеристик и вероятности их появления, влияющих на выполнение технологических процессов на заданном уровне качества. Объектами анализа должны быть все технологическое оборудование, режущий и вспомогательный инструмент, обслуживающие системы анализируемой производственной системы, используемые при реализации технологических процессов, а также типовые представители технологических процессов, выполняемые производственной системой.

На рис. 1 представлен результат моделирования производственной системы – модель оценки вероятности возникновения отказов технологических операций.

Представленная модель оценки включает в себя следующие компоненты: экспертную оценку начального состояния производственной системы; статистическую оценку наиболее значимых факторов; нейронную сеть.

Для построения модели и ее адаптации к производству группой экспертов исследуются типовые технологические процессы. Мнения экспертов по поводу возможных причин нарушения штатного выполнения технологических операций формируют базу знаний [12].

Основной задачей экспертов является определение причин и вероятности сбоев. Идея заключается в определении факторов, воздействующих на выполнение технологических операций, расстановке приоритетов. Для каждого технологического оборуду-

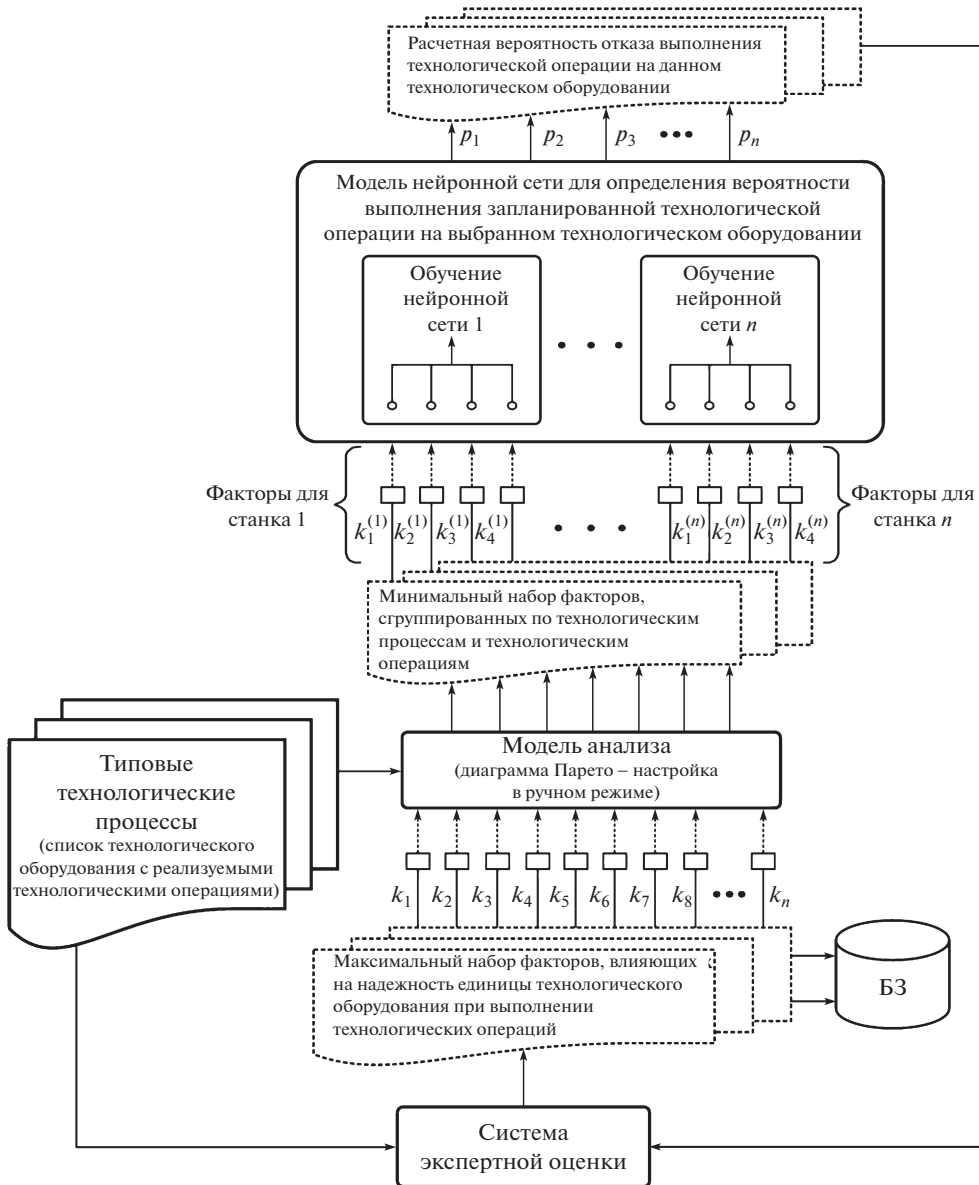


Рис. 1. Модель оценки вероятности возникновения отказов технологических операций.

дования посредством экспертных оценок формируется максимально возможный набор факторов, влияющих на выполнение технологической операции, далее оценивается вероятность их возникновения.

Для формирования массива факторов целесообразно применять несвязанные ранги [13], то есть выставять строго ранжированные оценки без дублирования значений, что позволит определить важные и второстепенные параметры в системе мониторинга выполнения технологического процесса. Методология исследований на основе экс-

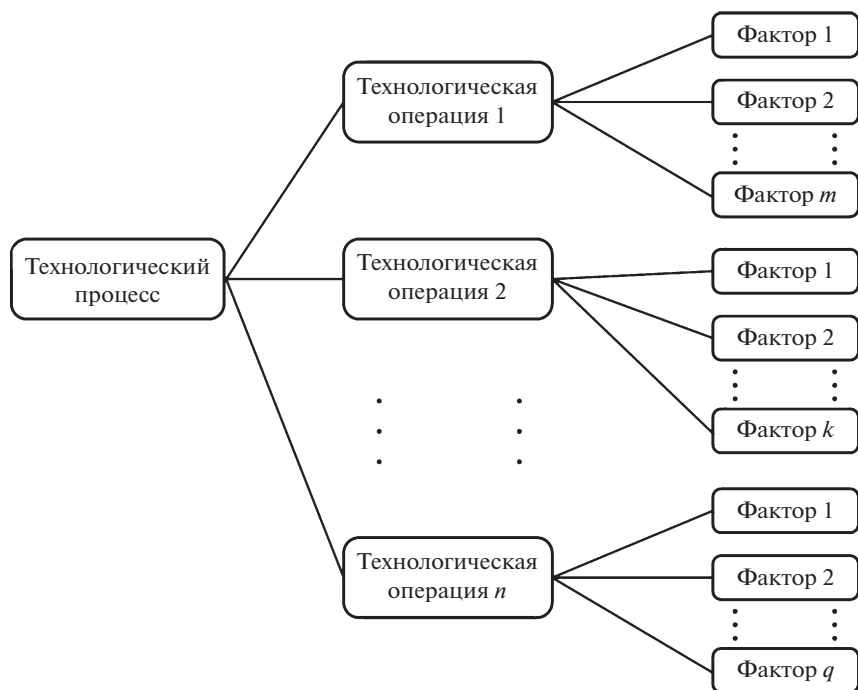


Рис. 2. Формирование набора факторов.

пертных оценок предполагает формирование взвешенного заключения, основанного на детальном изучении характеристик технологических операций [12].

Точность оценивания факторов зависит от характера высказываний эксперта. Необходимо учитывать, что полярные мнения внутри экспертной комиссии значительно снижают точность проводимой экспертизы. Для оценки согласованности применяют коэффициент конкордации W , который, без учета связанных рангов, рассчитывается по формуле

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{m^2(n^3 - n)},$$

где m — количество экспертов; n — количество объектов; x_i — суммарный набранный балл по i -му параметру; $\bar{x}$ — среднее значение всех набранных баллов.

Коэффициент конкордации изменяется от 0 до 1. Достаточный для принятия предложенных экспертной группой решений коэффициент конкордации должен быть более 0,7, т.е. как минимум 70% членов экспертной группы должны быть единодушны в своих оценках.

На основе метода экспертных оценок предлагается использовать процедуру формирования максимального набора факторов, влияющих на выполнение технологической операции (рис. 2).

В табл. 1 представлен вариант массива результирующих данных для одной технологической операции при применении процедуры экспертных оценок.

Таблица 1. Данные, полученные после проведения экспертной оценки для одной технологической операции

Количество объектов: 4									Количество экспертов: 8		
	Э1	Э2	Э3	Э4	Э5	Э6	Э7	Э8	Суммарный набранный балл	Средний балл факторов	Вероятность, %
Фактор 1	1	1	1	1	1	1	1	1	8	1.00	10
Фактор 2	3	3	2	3	3	2	3	3	22	2.75	28
Фактор 3	4	4	4	4	4	4	4	2	30	3.75	37
Фактор 4	2	2	3	2	2	3	2	4	20	2.50	25
Среднее значение набранных баллов									20		
Коэффициент конкордации									0.78		

Применение метода экспертных оценок к анализу производственного процесса подробно рассмотрено в работе [12]. Метод позволяет сформировать массив факторов, установить степень влияния каждого из них, определить наиболее значимые, ранжировать, выявить сопутствующие технологическому процессу вероятности сбоев операций.

Для уточнения статистических начальных данных возможных вероятностей сбоев технологических процессов и оценки наиболее значимых факторов возникновения нештатных ситуаций целесообразно применить анализ Парето. Результатом анализа является столбчатая диаграмма, характеризующая минимальный набор наиболее важных факторов отказов и сбоев выполнения технологической операции согласно накопленной статистической информации.

Процедура формирования минимального набора значимых факторов, влияющих на отказы и сбои выполнения технологической операции, при реализации конкретного технологического процесса, представлена на рис. 3. К значимым факторам могут относиться, например, брак заготовки; неучтенные особенности эксплуатации; некритические ситуации, устраняемые оператором (сбой энергоснабжения, программный сбой управления и т.п.); некачественная оснастка станка; нарушение сборки станка; простой станка вследствие технических причин, например, отказа механизма подачи заготовки; нарушение технологии производства и др.

Статистические данные зафиксированных факторов [12], приводящих к нарушению выполнения технологической операции за наблюдаемый временной период, представлены в табл. 2.

Диаграмма на рис. 4 наглядно отражает принцип Парето – 20% наиболее значимых факторов приносят 80-процентный вклад в изменение характеристик системы – это и есть цель применения анализа Парето.

Анализ диаграммы Парето приводит к выводу о том, что для рассматриваемой технологической операции значимыми факторами являются четвертый, первый и седьмой. Разработка мероприятий, направленных на устранение или уменьшение частоты появления факторов, позволит снизить вероятность возникновения нештатных ситуаций. Таким образом, анализ Парето отбирает минимальный, но достаточный в рамках решаемой задачи набор факторов, влияющих на выполнение технологической операции при реализации конкретного технологического процесса, и обеспечивает формирование значимых факторов с уточнением массива значений вероятностей их возникновения.

Для определения вероятности выполнения технологических операций конкретного технологического процесса используется нейронная сеть. При решении подобных за-



Рис. 3. Процедура проведения анализа Парето применительно к технологической операции.

дач в управлении технологическими системами целесообразно применять нейронную сеть прямого распространения [14, 15]. Использование нейронной сети позволяет предсказать возможный вариант технологических сбоев в результате возникновения некоторых дополнительных воздействующих факторов. Обученная нейронная сеть позволяет смоделировать возможные ситуации и просчитать вероятность нарушения технологического процесса, а, следовательно, своевременно устранять сбои. В результате для каждой операции по отношению к технологическому процессу соответствующей нейронной сетью выдается вероятность сбоя.

Таблица 2. Пример оценки деструктивных факторов

	Количество	Сбои, %	Суммарный процент, %
Фактор 4	73	39.04	39.04
Фактор 1	56	29.95	68.98
Фактор 7	17	9.09	78.07
Фактор 6	15	8.02	86.10
Фактор 3	8	4.28	90.37
Фактор 2	7	3.74	94.12
Фактор 5	6	3.21	97.33
Фактор 8	5	2.67	100
	187	100	

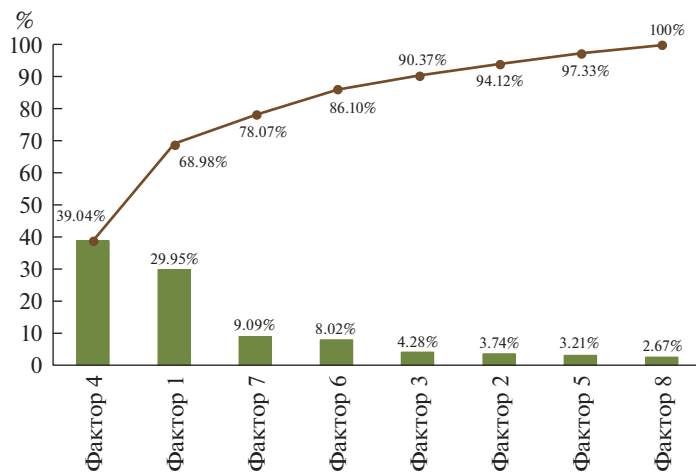


Рис. 4. Диаграмма Парето для технологической операции.

Рассматривая нейронную сеть как систему элементов, производящую некоторые вычисления над приходящими к ней данными, можно изучать решение главной и вспомогательных задач. К главной задаче относятся функции генерации, обучения и тестирования нейронных сетей. Вспомогательные задачи: определение значимости входных сигналов, контрастирование нейронных сетей, обучение примеров, определение минимального решающего набора входных параметров, получение логически прозрачной нейронной сети и, в конечном счете, извлечение знаний из данных. Нейронная сеть для каждой операции технологического процесса рассчитывает вероятность сбоя выполнения операции.

С учетом качественных характеристик информации о факторах, разработанная процедура позволяет определять минимальный, но достаточный набор данных для идентификации и принятия решений по дальнейшему учету причин сбоев. С использованием полученных данных производят обучение нейронной сети. Обученную нейронную сеть можно применять для мониторинга работы как цеха, так и всего производственного предприятия.

Имитационная модель определения вероятности выполнения технологического процесса. В производственных системах многономенклатурного мелкосерийного типа одновременно реализуется несколько технологических процессов, состав которых изменяется в зависимости от поступающих на предприятие заказов. В таких условиях для оценки реализуемости технологических процессов недостаточно знать вероятности выполнения технологических операций, а необходимо учитывать и взаимовлияние всех одновременно реализуемых технологических процессов, так как они используют одни и те же станки, режущий и вспомогательный инструмент и другие элементы производственной системы, поэтому разрабатываемая имитационная модель определения вероятности выполнения технологического процесса должна учитывать вышеуказанные факторы на основе Марковских цепей [16].

Разрабатываемая модель позволяет в рамках предлагаемой системы осуществлять мониторинг N технологических процессов, отличающихся по продолжительности и по набору элементов, выявлять процент отказа каждого технологического оборудования и системы в целом на каждом этапе технологического процесса. Метод эффективен для анализа надежности системы. Он позволяет оценить состояние всего технологического процесса с учетом простоя используемого оборудования, возможности автоматического восстановления системы из состояния отказа к штатной реализации технологического процесса.

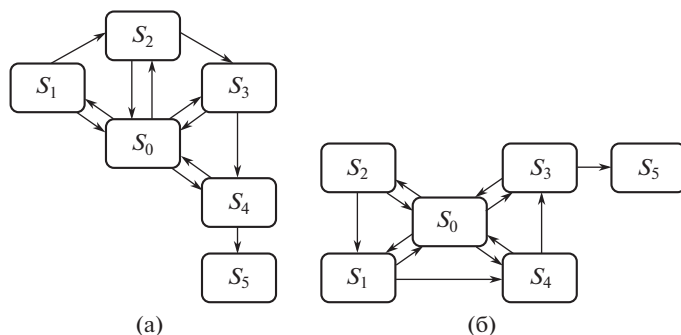


Рис. 5. Графы технологических процессов.

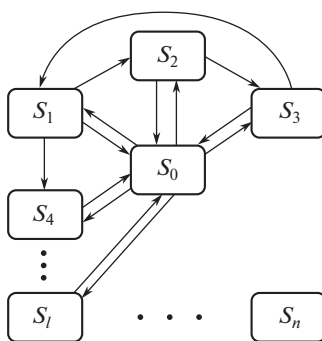


Рис. 6. Граф состояний системы.

В качестве примера рассмотрим систему S , в которой протекает случайный процесс с дискретными состояниями процесса $S_1, S_2, \dots, S_l, \dots, S_n$, число которых конечно. Состояния $S_1, S_2, \dots, S_l, \dots, S_n$ могут быть качественными, то есть описываться словами, например, последовательности технологических операций, а могут характеризоваться случайными величинами (случайным вектором).

При расчете оценивалась возможность системы S переходить из состояния S_i в требуемое состояние S_j непосредственно или через другие состояния. Для визуализации дискретных состояний применялись ориентированные графы, вершины которых соответствовали состояниям системы. Граф состояний показан на рис. 5.

Стрелка, ведущая из вершины S_i в вершину S_j , обозначает возможность перехода системы S из состояния S_i в состояние S_j непосредственно, минуя другие состояния. Данное представление позволяет определить любой технологический процесс, состоящий из последовательности элементов — технологических операций. При построении имитационной модели мониторинга необходимо отслеживать состояние системы “отказ” и завершения технологического процесса. Будем учитывать данные требования при построении любого графа и матрицы переходных вероятностей. Отказ может произойти на любом этапе реализации процесса, следовательно, необходимо учесть переход в состояние “отказ” на каждом этапе.

Для наглядности приведем пример модели технологического процесса, реализующего $n - 2$ технологических операций. С учетом изложенных предпосылок, система будет иметь следующий набор возможных состояний (для графа, представленного на рис. 6): S_0 — отказ; S_1 — выполняет технологические операции 1; S_2 — выполняет тех-

нологические операции 2; S_3 — выполняет технологические операции 3; ...; S_n — технологический процесс завершен.

Основной задачей исследования является нахождение безусловных вероятностей пребывания системы S на любом (k -м) шаге в состоянии S_i , то есть вероятность $p_i(k)$

$$p_i(k) = P\{S(k) = s_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 0, 1, \dots).$$

Для нахождения этих вероятностей необходимо знать условные вероятности перехода системы S на k -м шаге в состояние S_j , если известно, что на предыдущем ($k - 1$)-м шаге она была в состоянии S_i . Обозначим эту вероятность

$$p_{ij}(k) = P\{S(k) = s_j | S(k-1) = s_i\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

Вероятности $p_{ij}(k)$ называются переходными вероятностями на k -м шаге.

Переходные вероятности можно записать в виде матрицы

$$p_{ij}(k) = \begin{pmatrix} p_{11}(k) & p_{12}(k) & \dots & p_{1j}(k) & \dots & p_{1n}(k) \\ p_{21}(k) & p_{22}(k) & \dots & p_{2j}(k) & \dots & p_{2n}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{i1}(k) & p_{i2}(k) & \dots & p_{ij}(k) & \dots & p_{in}(k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1}(k) & p_{n2}(k) & \dots & p_{nj}(k) & \dots & p_{nn}(k) \end{pmatrix}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots).$$

По главной диагонали матрицы стоят вероятности задержки системы в данном состоянии S_j ($j = 1, \dots, n$) на k -м шаге.

$$p_{11}(k), \quad p_{22}(k), \quad \dots, \quad p_{ij}(k), \quad \dots, \quad p_{nn}(k).$$

Так как на каждом шаге система S может находиться только в одном из несовместных состояний, то для любой i -й строки матрицы сумма всех стоящих в ней вероятностей $p_{ij}(k)$ равна единице

$$\sum_{j=1}^n p_{ij}(k) = 1.$$

Любой элемент матрицы удовлетворяет условию $0 \leq p_{ij}(k) \leq 1$.

Вероятности простоя (задержек) определяется формулой

$$p_{ii}(k) = 1 - \sum_{j \neq i} p_{ij}(k).$$

Для нахождения безусловных вероятностей $p_i(k)$ недостаточно знать матрицу переходных вероятностей. Необходимо знать начальное распределение вероятностей, то есть вероятности состояний $p_i(0)$, соответствующие началу процесса — моменту $t_0 = 0$: $p_1(0), p_2(0), \dots, p_i(0), \dots, p_n(0)$, в сумме дающие единицу:

$$\sum_{i=1}^n p_i(0) = 1.$$

Если известно, что в начальный момент система S находилась в заданном состоянии S_i , то вероятность $p_i(0)$ этого состояния принимается равной единице, а все остальные — нулю

$$p_i(0) = 1, \quad p_1(0) = p_2(0) = \dots = p_{i-1}(0) = p_{i+1}(0) = \dots = p_n(0).$$

Зная состояние системы в начальный момент времени, найдем распределение вероятностей на первом шаге

$$p_j(1) = \sum_{i=1}^n p_i(0)p_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

Далее найдем распределение вероятностей на втором шаге

$$p_j(2) = \sum_{i=1}^n p_i(1)p_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

Рекуррентные формулы, определяющие распределение вероятностей на k -м шаге, имеют вид

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k-1)p_{ij}, \quad (k = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n).$$

На рис. 5 представлены возможные графы технологических процессов.

В качестве примера приведем соответствующую рис. 5а матрицу переходных вероятностей p_{ij} технологического процесса

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0.95 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.05 & 0 & 0 & 0.95 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В начальный момент времени система находится в состоянии S_2 , следовательно

$$p_0(0) = 0, \quad p_1(0) = 0, \quad p_2(0) = 1, \quad p_3(0) = 0, \quad p_4(0) = 0, \quad p_5(0) = 0.$$

Проведя расчеты, получим характеристики технологического процесса. Например, при $k = 5$ будем иметь

$$p_0(5) = 0.06, \quad p_1(5) = 0.02, \quad p_2(5) = 0.01, \quad p_3(5) = 0.06, \quad p_4(5) = 0.04, \quad p_5(5) = 0.82.$$

Вероятность завершения технологического процесса составляет 82%.

Построенная имитационная модель применима не только для первоначальной оценки выполнимости технологических процессов, но и в реальном времени. Интеллектуальная система информирует о нарушениях штатной реализации технологической операции. Матрицы переходных вероятностей технологического процесса при его многократной реализации, изменяясь в реальном времени, показывают вероятность завершения технологического процесса в целом.

В результате последовательного выполнения операций технологических процессов матрица переходных вероятностей может измениться и принять, например, следующий вид

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для представленной матрицы вероятность завершения технологического процесса составляет 64%. Ответственное лицо принимает решение о завершении технологического процесса или диагностике и устранении неисправностей технологического оборудования.

Реализованная авторами имитационная модель расчета вероятности перехода от $(k - 1)$ -й технологической операции к k -й формирует вероятность выполнения технологического процесса. Процесс повторяется итерационно в реальном времени с учетом уже выполненных операций и текущего состояния технологического оборудования.

При рассмотрении всех технологических процессов получим массив вероятностей, позволяющий оценивать выполнимость и сбой как любой операции каждого технологического процесса, так и работу цеха в целом.

Итогом проведенного исследования является имитационная модель в виде графа, вершины которого соответствуют основным технологическим операциям, составляющим конечные множества, описывающие N технологических процессов, разных по продолжительности и по набору элементов, а весовыми коэффициентами служат вероятности исполнения технологических операций.

Структура интеллектуальной системы мониторинга. На основе приведенных выше модели производственной системы и имитационной модели расчета вероятности выполнения технологического процесса авторами предложена структура интеллектуальной системы мониторинга выполнения машиностроительных технологических процессов, приведенная на рис. 7.

Данная система функционирует в составе системы мониторинга производственного процесса и использует текущие данные, поступающие с системы мониторинга технологического оборудования. Ее работа поддерживается системой обработки и анализа данных и базой знаний.

Система условно делится на три уровня. Первый уровень формирует минимальный набор факторов, влияющих на выполнимость технологических процессов, которые в данный момент времени реализуются в цехе. Для этого используется адаптированная к данному цеху модель производственной системы. На вход модели подаются параметры реализуемых технологических процессов, а именно задействованное технологическое оборудование и реализуемые на нем технологические операции. Эти параметры выбираются из определенного с помощью системы экспертных оценок общего списка факторов, влияющих на надежность единицы технологического оборудования при выполнении технологических операций. Выбор производится посредством разработанной модели анализа, что дает возможность определить минимальный набор факторов, сгруппированных по технологическим процессам и технологическим операциям.

Далее, на втором уровне, с помощью разработанной модели нейронной сети определяется вероятность отказа выполнения каждой реализуемой и запланированной технологической операции на данном технологическом оборудовании.

На третьем этапе используется имитационная модель расчета вероятности выполнения технологического процесса. На вход модели поступают последовательность операций каждого реализуемого технологического процесса, вероятности их выполнения и факт работоспособности технологического оборудования, что на выходе дает прогнозируемую вероятность выполнения каждого технологического процесса.

Данная вероятность поступает в систему мониторинга производственного процесса, где анализируется диспетчером с целью оперативного влияния на ход реализации технологических процессов. Надо отметить, что предлагаемая авторами система позволяет оценить выполнимость технологических процессов как на стадии планирования, так и в процессе реализации.

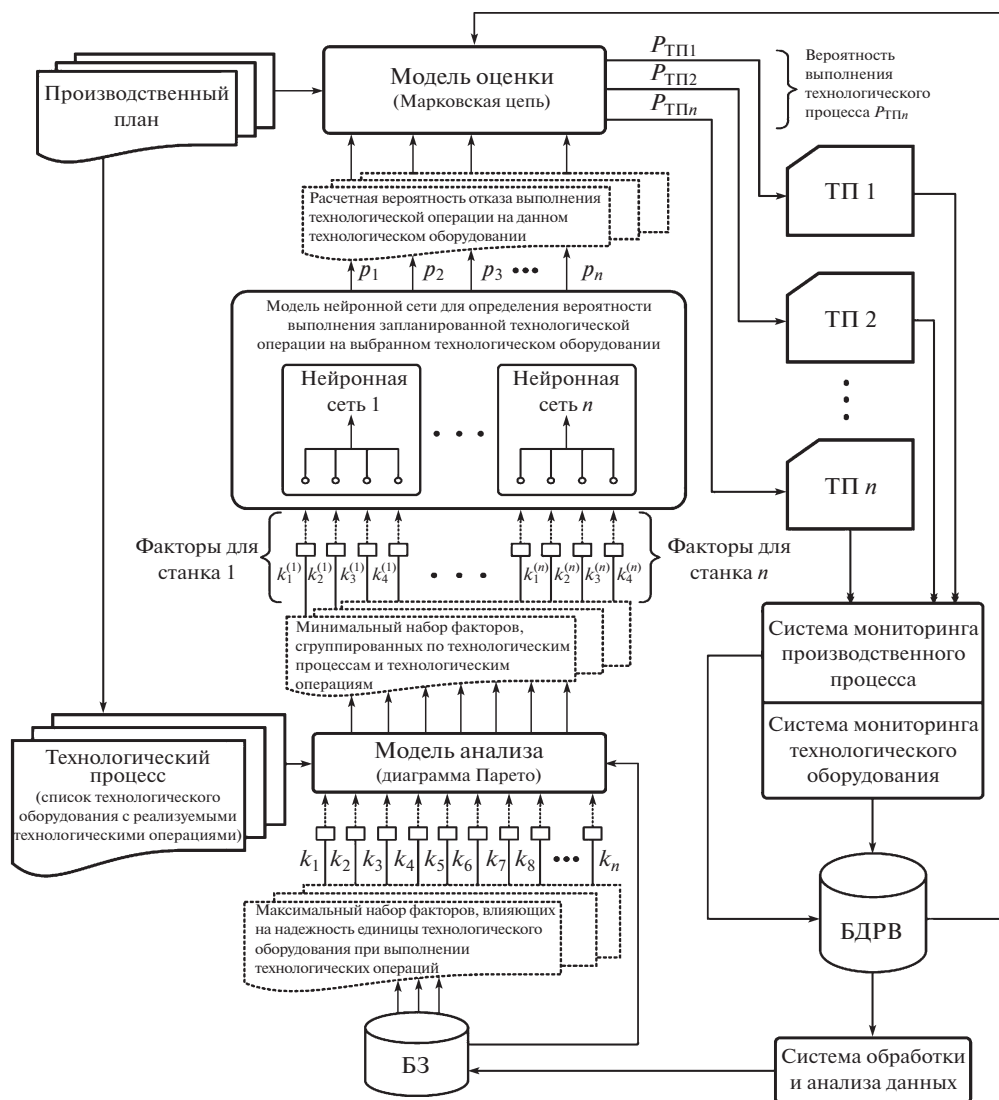


Рис. 7. Интеллектуальная система мониторинга выполнения машиностроительных технологических процессов.

Заключение. Мониторинг является трудно формализуемым процессом, характеризующимся следующими свойствами: он не может быть представлен в числовой форме; основные цели его не могут быть описаны с помощью определенной функциональной зависимости; не существует стандартного алгоритмизированного описания мониторинга.

Эффективный мониторинг может быть реализован только при условии установления определенной упорядоченности и взаимосвязи элементов исследуемой системы. Возможности современной вычислительной техники позволяют на новом уровне вернуться к вопросу описания технических систем, дополняя имитационным моделиро-

ванием решение проблем, недоступных для аналитического или экспериментального решения. Разработанная авторами методология и процедуры мониторинга с использованием совокупности математических методов и алгоритмов позволяют проводить моделирование производственных систем, реализующих технологические процессы, разные по продолжительности и по набору операций, осуществлять анализ и контроль характеристик исследуемых производственных систем.

В данной статье отражены результаты исследований, проводимых в рамках прикладной научно-исследовательской и экспериментальной разработки по теме “Разработка информационно-программных средств для автоматизации управления высокотехнологичным оборудованием в условиях цифрового машиностроительного производства” (уникальный идентификатор RFMEFI58016X0008).

В разработанной интеллектуальной системе мониторинга выполнения технологических процессов применены методы экспертных оценок, анализ Парето, нейронная сеть и марковские цепи, что позволяет создать комплексную модель системы мониторинга и оценивания выполнимости технологических процессов при изготовлении продукции на многономенклатурном мелкосерийном машиностроительном производстве.

Вместе с тем можно сказать, что использование метода экспертных оценок, анализа Парето и процедуры обучения нейронной сети, на основе сформированной выборки, в совокупности представляют собой разработанную методику построения модели производственной системы.

Предложенные подходы идентификации и определения значимости факторов, воздействующих на выполнение технологических процессов, позволяют рассматривать не весь спектр влияющих факторов, а определить наиболее значимые и произвести их ранжирование, что позволяет существенно упростить разрабатываемую систему.

Применение нейронной сети позволило рассчитать вероятности выполнения запланированных и уже реализуемых технологических операций на выбранном технологическом оборудовании. В нейронную сеть подается массив значимых факторов, вызывающих сбой выполнения технологической операции. Для расчета вероятности выполнения запланированных и реализуемых технологических процессов предложена имитационная модель на основе марковских цепей, которая обеспечивает оценку состояния системы в реальном масштабе времени. Результаты мониторинга позволяют сделать вывод о возможности завершения всех процессов и устранения предпосылок возможных сбоев в течение смены.

В совокупности предложенные методики и модели систем могут представлять собой методологию построения интеллектуальной системы мониторинга производства.

Апробация полученных результатов исследований проводится в заготовительном машиностроительном цехе ФГУП “НПО “Техномаш”.

Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по заказу Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58016X0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ge Zhiqiang*. Improved two-level monitoring system for plant-wide processes // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2014. V. 132. P. 141.
2. *Bleakie Alexander, Djurdjanovic Dragan*. Feature extraction, condition monitoring, and fault modeling in semiconductor manufacturing systems // *Computers in Industry*. 2013. V. 64. Iss. 3. P. 203.
3. *Holopov V., Kushnir A., Kurnasov E., Ganichev A., Romanov A*. Development of digital production engineering monitoring system based on equipment state index // *Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus*. 2017. P. 863.

4. *Jiang Qingchao, Yan Xuefeng*. Probabilistic monitoring of chemical processes using adaptively weighted factor analysis and its application // *Chemical Engineering Research and Design*. 2014. V. 92. Iss. 1. P. 127.
5. *Zhang Bin, Shin Yung C.* A multimodal intelligent monitoring system for turning processes // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. V. 35. P. 547.
6. *Gunther Jon C., Conner Jeremy S., Seborg Dale E.* Process monitoring and quality variable prediction utilizing PLS in industrial fed-batch cell culture // *Journal of Process Control*. 2009. V. 19. Iss. 5. P. 914.
7. *Chizhikov V.I., Kurnasov E.V., Vorob'ev E.I.* Capture of an object based on tactile surface recognition // *Russian Engineering Research*. 2018. V. 38. № 4. P. 251.
8. *Chao L., Peichen H., Jianping W.* A study of semiconductor industry accidents: making predictions based on BP artificial neural networks // *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2014. P. 492.
9. *Huang P.B., Shiang W.-J., Jou Y.-T., Chang C., Ma C.* An in-process adaptive control of surface roughness in end milling operations // 2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC. 2010. V. 3. P. 1191.
10. *Kalach G.G., Romanov A.M., Tripolskiy P.E.* Loosely coupled navigation system based on expert system using fuzzy logic // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM*. 2016. P. 167.
11. *Kholopov V.A., Kashirskaya E.N., Kushnir A.P., Kurnasov E.V., Ragutkin A.V., Pirogov V.V.* Development of digital machine-building production in the Industry 4.0 concept // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. V. 47. № 4. P. 380.
12. *Kashirskaya E.N., Kurnasov E.V., Kholopov V.A., Shmeleva A.G.* Methodology for assessing the implementation of the production process // *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS*. 2017. P. 232.
13. *Тюрин А.Г., Зуев И.О.* Кластерный анализ, методы и алгоритмы кластеризации // *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2014. № 2 (3). С. 86.
14. *Eroshenko S.A., Romanov A.M.* Decision support system for science-technical solutions efficiency assessment based on hybrid neural networks // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM*. 2016. P. 462.
15. *Zhe Mao, Zhuo Ran Zhang, Ya Ling Lu.* The data fusion in multi-sensors grain information monitoring system based on improved BP neural networks // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. V. 263. P. 269.
16. *Kashirskaya E.N., Kholopov V.A., Shmeleva A.G., Kurnasov E.V.* Simulation model for monitoring the execution of technological processes // *Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS*. 2017. P. 307.