

фика ППР на определенный период времени с учетом ограничений важно реализовать в рамках предлагаемых на рынке типовых систем автоматизации ЕАМ-систем.

Таким образом, в статье рассмотрен алгоритм, позволяющий автоматизировать процедуру составления графика ППР на определенный период времени с учетом ограничений. Этот алгоритм может быть полезен разработчикам ЕАМ-систем, на его основе может быть создан модуль автоматизированного расчета графика ППР.

**Список литературы**

1. *Ицкович Э.Л.* Методы автоматизации обслуживания оборудования предприятий по его фактическому состоянию // Промышленные АСУ и контроллеры. 2009. №8.
2. *Lodi A., Martello S., Vigo D.* Recent advances on two-dimensional bin packing problems. *Discrete Applied Mathematics* v. 123. 2002.
3. *Картак В.М., Месягутов М.А., Мухачева Э.А., Филиппова А.С.* Локальный поиск ортогональных упаковок с использованием нижних границ // Автоматика и телемеханика. 2009. №6.
4. *Coffman E.G., Garey M.R., Johnson D.E.* Performance bounds for level-oriented two-dimensional packing // *SIAM Journal of Computing*. 9. 1980.

*Дудников Евгений Евгеньевич – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления РАН. Контактный телефон (495)334-76-40. E-mail:e\_dudnik@ipu.ru*

**ПРОЦЕДУРЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА**

**В.Р. Милов, И.В. Шалашов (НГТУ им. Р.Е. Алексева),  
О.В. Крюков (ОАО "Гипрогазцентр")**

Предложена концепция управления состоянием технического объекта с применением прогнозирования, позволяющая повысить эффективность автоматизированных систем технического обслуживания и ремонта (ТОИР). Получен критерий эффективности прогнозирования состояния объектов. Предложен способ принятия решений о проведении процедур технической диагностики и подготовки к ремонту.

*Ключевые слова:* автоматизированные системы принятия решений, техническое обслуживание и ремонт, коэффициент технического использования, прогнозирование отказов.

**Введение**

Современные технические системы характеризуются высокой конструктивной и функциональной сложностью. Нарушение работоспособности системы в результате возникающих отказов влечет большие материальные затраты. Особенно это проявляется в больших системах, обеспечивающих жизнедеятельность населения, к которым относятся многие предприятия топливно-энергетического комплекса. Ущерб здесь носит не только материальный, но и социальный, экологический и даже политический характер. Снижение потерь от нарушения работоспособности может быть достигнуто с помощью автоматизации и оптимизации процедур ТОИР. Повысить эффективность ТОИР позволяет применение прогнозирования состояния объектов.

**Способ управления техническим состоянием на основе прогнозирования**

Предлагается способ управления техническим состоянием объекта на основе прогнозирования (рис. 1).

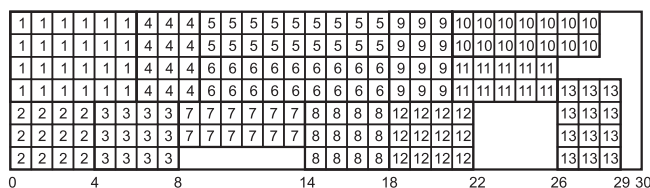


Рис. 6

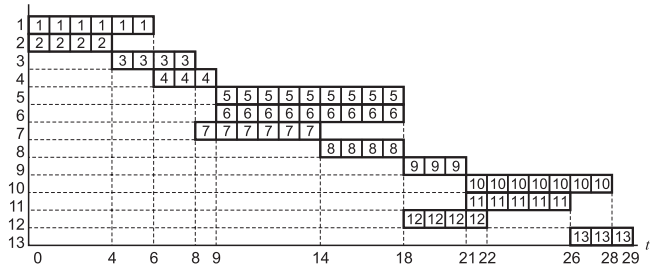


Рис. 7

5. *Coffman E.G., Shor P.W.* Packings in two dimensions: Asymptotic average-case analysis of algorithms // *Algorithmica*. 9. 1993.
6. *Lodi A., Martello S., Vigo D.* Heuristic and metaheuristic approaches for a class of two-dimensional bin packing problems // *INFORMS Journal on Computing*. v. 11. 1999. № 4.

Данные о состоянии технического объекта снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования. Если формируется решение о наступающем отказе, подсистема ТОИР выполняет действия, направленные на: предотвращение отказов (включая комплекс мероприятий по обеспечению функционирования системы без прерывания) и минимизацию последствий отказа за счет подготовки к ожидаемому отказу, что позволяет сократить время ремонта и продолжительность неработоспособного состояния.

Известно множество методов, применяемых для прогнозирования отказов и основанных на определении

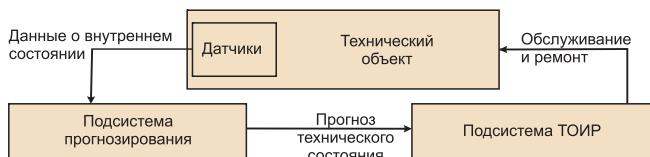


Рис. 1. Система управления состоянием технического объекта на основе прогнозирования

объективных закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработки данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и на вероятностной оценке значений показателей.

В подсистеме прогнозирования определяется вероятность  $P(z = 1|x)$  наступления отказа на рассматриваемом интервале времени. Здесь  $z$  – переменная, характеризующая состояние технического объекта,  $x$  – данные наблюдения, снимаемые с датчиков. В условиях априорной неопределенности в решающем правиле используется оценка  $\bar{P}(z = 1|x)$ , которая находится в результате структурно-параметрического синтеза (обучения) предиктора на основе эмпирических данных, составляющих обучающую выборку  $D$ .

Решение о формировании сигнала-предупреждения о наступающем отказе выносится в результате сравнения с пороговым значением найденной вероятности наступления отказа на заданном интервале. Определение этого значения представляет отдельную задачу и связано с используемым критерием.

#### Критерий эффективности прогнозирования отказов

Эффект от внедрения прогнозирующего контроля можно оценить с помощью коэффициента технического использования:  $K = T_F / (T_F + T_R)$ . Для системы управления техническим состоянием с использованием прогнозирования запишем аналогичную формулу:  $K' = T'_F / (T'_F + T'_R)$ , где  $T_F$  и  $T'_F$  – среднее время наработки на отказ,  $T_R$  и  $T'_R$  – среднее время ремонта системы без/с применением прогнозирующего контроля соответственно. Эффект от применения прогнозирующего контроля охарактеризуем величиной

$$v = \frac{1 - K'}{1 - K} = \frac{(T_R + T_F)T'_R}{(T'_R + T'_F)T_R}, \quad (1)$$

показывающей во сколько раз изменяется среднее время неработоспособного состояния технического объекта. Эффект от применения прогнозирующего управления техническим состоянием имеет место при  $v < 1$  и возрастает по мере уменьшения неотрицательной величины  $v$ .

Для проведения анализа эффективности применения процедур прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием, следуя [1], охарактеризуем подсистему ТОИР вероятностью  $P_p$  возникновения (не предотвращения) отказа при условии правильного предсказания и вероятностью  $P_E$  привнесения отказа при условии ошибочного предсказания (ложной тревоги). Подсистема прогнозирования отказов может быть охарактеризована вероятностью ложной тревоги (ошибки первого рода)  $\alpha$  и вероятностью пропуска наступающего неисправного состояния технического объекта (ошибки второго рода)  $\beta$ .

Если выполненные превентивные действия при правильном предсказании не позволили предотвратить отказ, то, как правило, устранение отказа выполняется за меньшее время. Соответствующее среднее время ремонта с подготовкой обозначим  $T_{RP}$ , а изме-

нение (сокращение) среднего времени ремонта за счет подготовки охарактеризуем коэффициентом

$$k_p = T_{RP} / T_R. \quad (2)$$

Среднее время ремонта, вызванного привнесенным отказом, обозначим  $T_{RE}$ , и введем коэффициент

$$k_E = T_{RE} / T_R. \quad (3)$$

После преобразований (аналогично [2]) приходим к выражению для оценки эффекта от применения прогнозирования:

$$v = K_p + \alpha K_E (1 - P_p) / P_p + \beta (1 - K_p), \quad (4)$$

где  $P_p$  – априорная вероятность возникновения неисправного состояния за анализируемый интервал времени,  $K_p = k_p P_p$  и  $K_E = k_E P_E$ .

Как следует из формулы (4), эффективность прогнозирования технического состояния возрастает (величина  $v$  уменьшается) при уменьшении  $K_p$  и  $K_E$ . Для идеальной подсистемы ТОИР  $K_p = 0$  и  $K_E = 0$ , что может быть обеспечено при  $P_p = 0$  и  $P_E = 0$ . При этом все правильно предсказанные отказы предотвращаются, а обработка ложных тревог не приводит к дополнительному простоям. В этом случае величина выигрыша  $v = \beta$  полностью определяется вероятностью пропуска при прогнозировании отказа.

Выигрыш от применения прогнозирования технического состояния возрастает при уменьшении  $\alpha$  и  $\beta$ . При высокой точности прогнозирования  $\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 0$  величина выигрыша составляет  $v \approx K_p$ . Однако уменьшение одной из вероятностей  $\alpha$  или  $\beta$  сопровождается увеличением другой в соответствии с рабочей характеристикой предиктора. При этом возникает необходимость синтеза решающего правила для принятия решений о наступающем отказе из условия минимизации целевой функции (4).

#### Принятие решений при прогнозировании отказов

Анализ выражения (4) свидетельствует о том, что целевая функция представляет собой взвешенную сумму вероятностей ошибок первого и второго рода и по своей структуре близка к выражению для среднего риска. Рассуждая, как и при выводе решающего правила по критерию минимума среднего риска, приходим к правилу принятия решения о наступающем отказе:

$$\bar{z} = H(\Lambda(x) - h), \quad (5)$$

где  $H(a)$  – функция Хевисайда такая, что  $H(a) = 1$  при  $a \geq 0$  и  $H(a) = 0$  при  $a < 0$ ;  $\Lambda(x) = f_1(x)/f_0(x)$  отношение правдоподобия, где  $f_0(x)$  и  $f_1(x)$  – плотности вероятности признаков для прогнозируемого исправного и неисправного состояний;  $h$  – порог, определяемый выражением

$$h = \frac{(1 - P_p)K_E}{P_p(1 - K_p)}. \quad (6)$$

Переходя к использованию апостериорных вероятностей, решающее правило (5) представим в виде

$$\bar{z} = H(P(z = 1|x) - h_p). \quad (7)$$

Здесь  $h_p$  порог, определяемый с учетом (6) выражением

$$h_p = \frac{K_E}{1 - K_p + K_E}. \quad (8)$$

Выигрыш от применения прогнозирования уменьшается при уменьшении априорной вероятности  $P_F$  отказа на анализируемом интервале времени. При этом повышаются требования к точности прогнозирования. В то же время при использовании оптимального решающего правила (7), (8) не происходит снижения эффективности по отношению к системе ТОИР без прогнозирования технического состояния, то есть  $v_L \leq$ .

### Принятие решений о проведении процедуры технической диагностики

В общем случае информация о состоянии технического объекта может быть получена на основе обработки показаний датчиков и результатов тестов. При этом возникает задача о проведении тестов. В случае использования вероятностной модели сложной системы элементарное действие по сбору информации заключается в определении значения одной из переменных  $y_i$ . Такие действия (тесты) характеризуются определенной стоимостью  $c_i$ , представляющей затраты на проведение теста, и ценностью [3].

Величина  $v_L$ , обеспечиваемая при принятии решений о наступающих отказах с помощью (7), (8), зависит от множества переменных, значения которых доступны на момент принятия решения. Так, после проведения  $i$ -го теста решение о состоянии системы принимается с использованием результатов теста  $y_i$  на основе распределения вероятностей  $P(x, y_i)$ .

Однако на момент вынесения решения о целесообразности проведения некоторого теста его результат является неизвестным. Поэтому ожидаемый эффект от проведения теста определяется с использованием усреднения по множеству возможных исходов

$$\bar{v}_L(y_i, x) = \sum_{y_i \in Y_i} P(y_i | x) v_L(y_i, x). \quad (9)$$

Проведение теста позволяет получить дополнительную информацию о состоянии технического объекта и, следовательно, приводит к меньшим значениям  $\bar{v}_L(y_i, x)$  по сравнению с величиной  $v_L(x)$ , обеспечиваемой при использовании с использованием показаний датчиков.

Сопоставляя сокращение издержек, вызванных простоем оборудования и стоимость теста, можно определить ценность теста. Проведение дополнительных тестов завершается, если для любого из тестов их стоимость превышает ценность получаемой информации.

Процедуру принятия решений о проведении процедуры технической диагностики, обслуживания и ре-

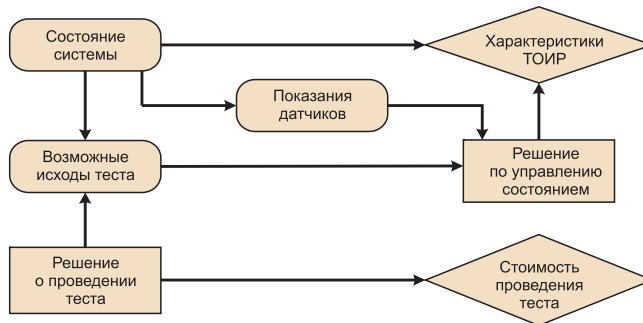


Рис. 2. Сеть принятия решений диагностической экспертной системы

монта представим с помощью сети принятия решений, содержащей три типа вершин. Эта сеть может рассматриваться как расширение байесовской сети. Для упрощения на рис. 2 показана сеть принятия решений, соответствующая единственному тесту. Вершины жеребьевки, обозначенные овалами, как и в байесовских сетях, представляют переменные (случайные величины). Вершины принятия решений (прямоугольники) предоставляют возможность лицу, принимающему решение, выбрать одно из доступных действий на основе рассчитываемых значений целевой функции. В сетях принятия решений, основанных на критерии минимума среднего риска, вершины, обозначенные ромбами, содержат значения элементов матрицы потерь. В рамках развиваемого подхода последствия ошибочных решений и соответственно значения целевой функций (4) зависят от характеристик подсистемы ТОИР  $K_p$  и  $K_E$ .

### Выводы

Таким образом, сокращение времени простоя и увеличение коэффициента технического использования системы может быть достигнуто за счет применения прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием, которое позволяет инициировать превентивные действия для предотвращения отказа или подготовки к ремонту. Возможности встроенных систем прогнозирования планируется проверить для электрооборудования компрессорных станций.

### Список литературы

1. Salfner F., Malek M. Proactive fault handling for system availability enhancement // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05). 2005. Workshop 16, Vol. 17.
2. Милов В.Р., Баранов В.Г., Эпштейн А.Ю. и др. Способ управления техническим состоянием на основе прогнозирования // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 2.
3. Баранов В.Г., Милов В.Р., Шалашов И.В. и др. Применение байесовских сетей для поддержки принятия решений и управления техническим состоянием сложных систем // Системы обработки информации и управления. НГТУ: т. 65. 2007.

Милов Владимир Ростиславович - д-р техн. наук, зав. кафедрой "Электроника и сети ЭВМ", Шалашов Иван Владимирович - аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

Крюков Олег Викторович - канд. техн. наук, главный специалист НТИ ОАО "Гипрогазцентр". Контактный телефон (831) 428-25-84. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru