

В представленной на рисунке схеме организации процесса компьютерного моделирования (имитации) основная цепочка (реальный технологический объект (система)—математическая модель—моделирующий алгоритм—программа ЭВМ—вычислительный эксперимент) соответствует традиционной схеме, но во главу теперь ставится понятие триады: модель—алгоритм—программа (блоки 4, 5, 6), стратегическое и тактическое планирование вычислительного эксперимента (блок 7), интерпретация и документирование его результатов (блок 8).

Создав триаду «модель—алгоритм—программа», исследователь получает в руки универсальный, гибкий и сравнительно недорогой инструмент, который вначале отлаживается, тестируется в «пробных» вычислительных экспериментах. После того, как адекватность триады исходному технологическому объекту удостоверена, с моделью можно проводить разнообразные «опыты», дающие все требуемые качественные и количественные свойства и характеристики объекта. Процесс компьютерного моделирования сопровождается улучшением и уточнением по мере необходимости всех звеньев триады [3].

**Заключение.** В настоящее время наблюдается бурное развитие компьютерных технологий как на аппаратном, так и на программном уровнях. Возможности ПК расширяются за счёт структуризации пользователем решаемых задач и пополнения её базы знаний, а возможности пользователя — за счёт автоматизации решения тех задач, которые ранее было нецелесообразно переносить на компьютер по экономическим или техническим соображениям. Примером таких задач служат производственные задачи оптимизации.

#### Список цитируемых источников

1. Кузнецов Ю. Н., Кузубов В. И., Волощенко А. В. Математическое программирование. М. : Высш. шк., 1980. 320 с.
2. Берлинер Э. М., Таратынов О. В. САПР в машиностроении. М. : ФОРУМ, 2008. 448 с.
3. Кондратов А. И. САПР технологических процессов : учеб. для студентов высш. учеб. заведений. 2-е изд., стер. М. : Академия, 2008. 272 с.

УДК 62-799

**А. В. Ковалёв**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Тульский государственный университет»,  
Тула, Российская Федерация*

**В. С. Сальников,**

*доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Тульский государственный университет»,  
Тула, Российская Федерация*

### ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИЗНОСА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Проанализированы необходимость и важность прогнозирования износа ответственных узлов промышленного оборудования. Представлена методика прогнозирования технического состояния промышленного оборудования на основе самонастраивающихся систем управления. Приведены результаты моделирования.

The necessity and importance of forecasting of industrial machinery critical units runout is analysed. The methods of industrial equipment performance forecasting are represented on the basis of adaptive control system. Simulation data is described.

**Введение.** Современное оборудование, применяемое на производстве, является сложным, наукоемким и дорогостоящим по своей сути. Чтобы оно прослужило максимально длительный срок и принесло наибольшую выгоду, необходимо минимизировать время простоя оборудования. Для обеспечения постоянной его работоспособности разработаны и внедрены различные комплексы мер. Наиболее распространённым промышленным оборудованием являются металлообрабатывающие станки. Для поддержания их заданных технологических возможностей оптимальным является обслуживание по фактическому техническому состоянию. Это позволяет максимально выработать ресурс узлов и исключить вероятность аварий и простоев, вызванных ими.

Однако нередки случаи, когда поставщики и потребители запчастей находятся на большом удалении друг от друга, а иногда и на территории других стран, что делает оперативную доставку необходимых комплектующих в короткие сроки невозможной. Поэтому необходимо прогнозировать время наступления критического износа узла.

**Основная часть.** В наше время известно несколько подходов к прогнозированию износа в промышленности. Одним из первых стал активно внедряться метод прогноза, основанный на вероятностных расчётах. Основным показателем работоспособности оборудования является его вероятность безотказной работы в прогнозируемый интервал времени. Вероятность определяет теоретическую возможность оборудования проработать в заданном интервале времени в пределах заданной точности. Этот показатель безотказной работы оборудования можно определить, если известен закон распределения наработки до отказа. Данный подход уместен для оценки средних значений износа оборудования, он некорректно прогнозирует выработку конкретных узлов станка.

Известны методы прогнозирования, основанные на нейронно-сетевом моделировании. Нейронные сети хорошо зарекомендовали себя в области моделирования систем и процессов, внутренние связи которых либо мало изучены, либо реализуют сложные взаимодействия. К таким системам можно отнести ответственные узлы металлообрабатывающего оборудования. Основным недостатком этой методики является её узконаправленность. Для каждого типа оборудования необходима своя база накопленных зависимостей уровня технического состояния от параметров системы. Применение этой методики целесообразно в рамках крупных предприятий, когда имеется большое количество однотипного оборудования.

Существуют способы прогноза, базирующиеся на графоаналитических методах. В работе [1, с. 554] была предложена прогнозная модель, основанная на показательной функции. При данном подходе для построения прогноза необходима история наблюдений за изменением диагностического сигнала и значения данных диагностики, соответствующих критическому прогнозу. Соответственно, зная аналитическое описание зависимости изменения диагностических данных и максимально допустимый их уровень, возможно спрогнозировать время максимального износа.

Для адаптации прогнозной модели к условиям реального производства в неё необходимо ввести пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (далее — ПИД-регулятор). Это позволяет компенсировать ошибку в действующий момент времени, определить величину ошибки во времени и реагировать только на неё, исключить отклики прогнозной модели на случайные возмущающие процессы, стабилизировать кривую прогноза (тренд). Теоретическое значение амплитуды диагностического сигнала  $\hat{y}$  определяется:

$$\hat{y} = a_0 \cdot a_1^t \cdot U[k],$$

где  $a$  — коэффициент показательной функции, определённый по экстраполяционным данным диагностического сигнала;  $t$  — условное обозначение времени;  $U[k]$  — ПИД-регулятор. Для определения коэффициентов прогнозной модели применяется метод наименьших квадратов, когда учитываются все эмпирические уровни и обеспечивается минимальная сумма квадратов отклонений эмпирических значений уровней диагностического сигнала  $y$  от теоретических  $\hat{y}_t$  [2, с. 305]. Параметры  $a_0$  и  $a_1$  определяются путём решения системы нормальных уравнений, полученных методом наименьших квадратов с использованием счёта условных моментов времени, от середины ряда ( $t = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ )

$$\begin{cases} n \cdot \lg a_0 + \lg a_1 \sum t = \sum \lg y, \\ \lg a_0 \sum t + \lg a_1 \sum t^2 = \sum t \lg y, \end{cases}$$

где  $n$  — количество уровней ряда.

Для расчёта параметров ПИД-регулятора используется выражение

$$U[k] = k_p y_k + k_i \cdot \int y_k dt + k_d \cdot (y_k - y_{k-1}),$$

где  $k_p$  — пропорциональный коэффициент;  $k_i$  — интегральный коэффициент;  $k_d$  — дифференциальный коэффициент.

Расчёт коэффициентов ПИД-регулятора в процессе прогнозирования осуществляется методом наименьших квадратов с решением системы уравнений с тремя неизвестными по формуле

$$\sum (y - a_0 \cdot a_1^t \cdot k_p \cdot k_i \cdot k_d \cdot \cdot)^2 \rightarrow \min.$$

Представим смоделированный тренд износа, рассчитанный по пяти значениям данных диагностики в условные моменты времени  $t = 0 \dots 5$  (рисунок 1).

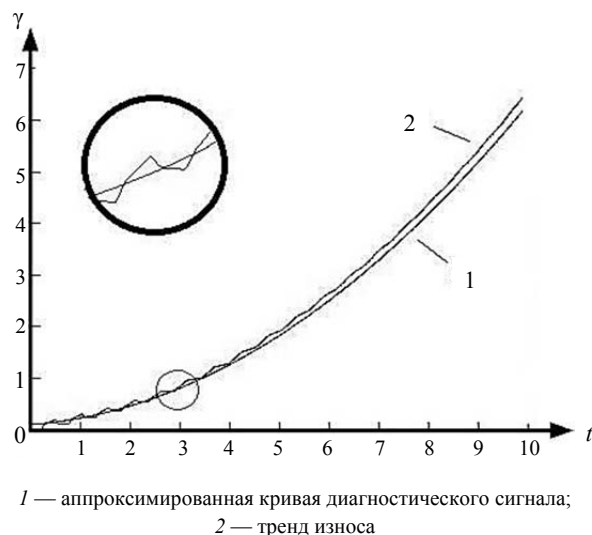


Рисунок 1 — Тренд износа диагностируемого узла

**Заключение.** Представленная модель прогнозирования зарекомендовала себя достаточно перспективной. Моделирование показало, что она точна и обладает высокой податливостью к резким изменениям диагностического сигнала, при этом отфильтровывая сигналы, которые являются помехами при диагностике. Это достигается за счёт использования ПИД-регулятора, что приводит к колебательности прогнозной модели, что может оказывать влияние на точность прогноза. Использование ПИД-управления при прогнозировании требует дальнейших исследований в области стабилизации тренда и большей адаптации прогнозной модели к условиям реального производства.

#### Список цитируемых источников

1. Ковалёв А. В., Трушин Н. Н., Сальников В. С. Прогнозирование технического состояния технологического оборудования // Изв. ТулГУ. Техн. науки. Вып. 11 : в 2 ч. Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. Ч. 2. С. 554—560.
2. Громыко Г. Л. Теория статистики : учеб. М. : ИНФРА-М, 2005. 416 с.

УДК 004.02

О. Д. Кравчук

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

### НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДАМИ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА

В статье рассматриваются методы случайного поиска (далее — СП) для решения задач оптимизации сложных объектов. Произведён программный сравнительный анализ методов случайного поиска в зависимости от вида целевых функций. Результаты обоснованы и приведены в виде диаграмм.

In article methods of accidental search for the decision of problems of optimization of complex objects are considered. The program comparative analysis of methods of accidental search depending on a type of criterion functions is made. Results are proved and resulted in the form of diagrams.

**Введение.** Широкое внедрение вычислительных методов в практику инженерных расчётов обеспечило возможность решения задач оптимизации сложных многопараметрических объектов. Среди различных методов решения задач оптимизации большое распространение получили поисковые методы оптимизации, среди которых значительный интерес вызывают методы СП [1].

**Основная часть.** Нелинейное программирование — раздел математического программирования, изучающий методы решения экстремальных задач с нелинейной целевой функцией и (или) областью, определённой нелинейными ограничениями. Типичными областями применения нелинейного программирования являются прогнозирование, планирование промышленного производства, управление ресурсами, контроль качества выпускаемой продукции, планирование обслуживания и ремонта, проектирование технологических линий и процессов.