

Прогнозирование технического состояния токарного инструмента на базе фазохронометрической измерительной информации

М. И. КИСЕЛЁВ, А. С. КОМШИН, А. Б. СЫРИЦКИЙ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: syritsky@yandex.ru

Описана методика прогнозирующего мониторинга состояния токарного инструмента в процессе обработки. Рассмотрены результаты прогнозирования, базирующиеся на фазохронометрической измерительной информации. Показана возможность практического применения описанной методики прогнозирования в совокупности с фазохронометрическими данными. Приведён алгоритм прогнозирования фактического износа инструмента на примере простейшей токарной обработки.

Ключевые слова: фазохронометрический метод, мониторинг износа инструмента, процесс резания.

The predictive monitoring technique of turning tool condition during machining is described. The results of the prediction, based on phasechronometric measurement information, are presented. The possibility of practical application of the described forecasting technique in combination with phasechronometric data is shown. The algorithm for predicting the actual value of tool wear in the case of the simplest case of turning is given.

Key words: phasechronometric method, tool wear monitoring, cutting process.

Прогнозирование технического состояния необходимо практически на всех этапах жизненного цикла продукции: на стадии проектирования, при проведении испытаний (ускоренных, ресурсных) и эксплуатации технических устройств и систем [1]. Существующие математические методы, основанные на анализе временных рядов, можно применять для предсказания стоимостей биржевых акций, изменения климата, социальных прогнозов и т. п. [2]. На данный момент известно много методов и моделей, используемых при анализе временных рядов и прогнозировании: модель авторегрессии (AR) [3, 4], модель авторегрессии – скользящего среднего (ARMA) [3, 5], подход Бокса–Дженкинса [6]. Методы прогнозирования находят широкое применение в экономике для математического описания различных показателей научно-технического развития и управления [7, 8].

Существующие подходы к прогнозированию технического состояния режущего инструмента основаны на применении виброакустических методов измерений [9, 10]. В современной промышленности, особенно металлообрабатывающей, подавляющее большинство решений принимается на основе информации, полученной в процессе измерений. Особенно важно качество измерительной информации при диагностике и мониторинге, совмещённом с прогнозированием технического состояния оборудования. В настоящее время общей проблемой всех методов диагностики является вопрос эффективности получаемой информации, обусловленный низким уровнем метрологического обеспечения. Слабая прослеживаемость эталонной базы, низкий уровень точности измерений, отсутствие универсальности, регистрация лишь аварийных

и предаварийных ситуаций – всё это, к сожалению, свойственно современным системам технической диагностики. Поэтому все отрасли промышленности до сих пор используют систему планово-предупредительных ремонтов. В металлообрабатывающей отрасли промышленности сложившаяся ситуация сказывается особенно остро и оказывает негативный эффект. Повысить эффективность металлообработки можно при переходе от планово-предупредительного комплекса мер к ремонту по фактическому состоянию узлов станка, а также внедрением в производственный процесс самых современных информационно-измерительных технологий, позволяющих контролировать и прогнозировать параметры обработки непосредственно во время процесса резания.

Метод прогноза поведения членов временного ряда позволяет вычислить его последующие (ещё неизвестные) значения с помощью уже известных, предыдущих параметров. Особенность метода заключается в запоминании и воспроизведении нелинейной функциональной зависимости, несмотря на то, что прогнозирующий оператор – линейный. Следует отметить, что метод прогноза даёт возможность при необходимости восстановить предысторию по существующим данным, относящимся к текущему моменту.

Алгоритм, реализующий данный метод, можно представить соотношением

$$y_n = \sum_{i=0}^m a_i y_{n-i-1},$$

где a_i – составляющие прогнозирующего оператора, которые находятся из системы уравнений, построенных на отрезке

(участке) последовательности, где все значения её членов известны; y_{i-1} – известные члены начальной последовательности, с помощью которых можно вычислить последующие значения y_n ; n – количество точек для прогноза.

В общем случае число коэффициентов a_i выбирают с учётом особенностей конкретной задачи. Установлено, что с ростом количества начальных значений точность прогноза увеличивается. Тогда

$$y_n = a_0 y_{n-1} + a_1 y_{n-2} + a_2 y_{n-3} + \dots + a_m y_{n-m-1}$$

В настоящее время прогнозирование параметров, характеризующих состояние технических объектов, производится на основе классических моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего [4, 11]. При этом соответствующие временные ряды часто анализируются независимо, несмотря на возможную коррелированность рассматриваемых характеристик. Существующие подходы к обработке информации в системах управления, как правило, не обеспечивают необходимой точности прогноза, что приводит к увеличению вероятности принятия ошибочных решений по управлению объектом [11].

Для повышения точности прогнозирования авторы предлагают применить подход адаптивного регрессионного моделирования и его расширение для моделирования системы временных рядов, а также псевдоградиентный метод для обновления коэффициентов моделей [12, 13]. В совокупности это позволит получать модели с более высокой точностью аппроксимации и прогнозирования, а также обеспечит поступление своевременных предупреждений о возможности аварийной ситуации и безопасного функционирования технического объекта.

Прогнозирование нарушений процесса возможно также при использовании контрольных карт, позволяющих обнаружить изменения в текущем процессе до того, как контролируемые параметры выйдут за допустимые пределы.

Пусть $x^t(t)$ – j -й временной ряд, $j=1, \dots, N$. Тогда модель векторной авторегрессии порядка p для j -го временного ряда будет иметь вид

$$x^t(t) = a_0^t + \sum_{j=1}^N a_{1j}^t x^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^t x^j(t-2) + \dots + \sum_{j=1}^N a_{pj}^t x^j(t-p) + \varepsilon^t(t),$$

где $\varepsilon^t(t)$ – нерегулярная составляющая (случайная величина).

Коэффициенты уравнений модели можно получить методом наименьших квадратов. Остатки после вычитания из исходного ряда регулярной составляющей можно представить как

$$\begin{aligned} \varepsilon_{g^t(t)} - g^t(t) &= a_0^t + \sum_{j=1}^N a_{1j}^t y^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^t y^j(t-2) + \dots \\ &+ \sum_{j=1}^N a_{pj}^t y^j(t-p) + \sum_{k=1}^p a_{ki}^t \varepsilon - g^t(t-k) + \varepsilon^t(t), \end{aligned}$$

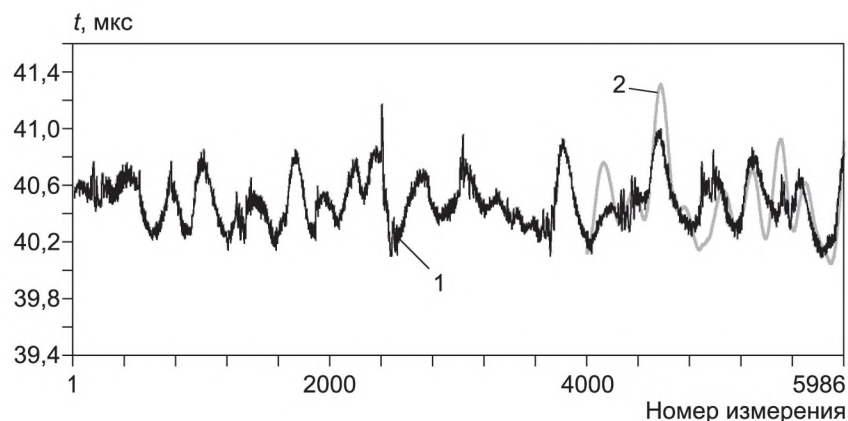


Рис. 1. Прогнозирование хронограммы вращения:
1 – исходная хронограмма; 2 – прогноз

где $g^t(t)$ – неслучайная периодическая функция – совместная гармоническая составляющая ряда.

В итоге для каждого из N временных рядов формируется комплексная модель следующего вида:

$$\begin{aligned} y^t(t) &= f^t(t) + g^t(t) + a_0^t + \sum_{j=1}^N a_{1j}^t y^j(t-1) + \sum_{j=1}^N a_{2j}^t y^j(t-2) + \dots \\ &+ \sum_{j=1}^N a_{pj}^t y^j(t-p) + \sum_{k=1}^p a_{ki}^t \varepsilon - g^t(t-k) + \varepsilon^t(t). \end{aligned}$$

С помощью описанного метода адаптивного регрессионного моделирования осуществлено прогнозирование временного ряда хронограммы вращения шпинделя станка. Данная хронограмма отражает неравномерность вращения привода станка и получается при измерениях длительностей интервалов прохождения фаз оборота. Более подробно получение фазохронометрической измерительной информации описано в [14]. Начальное количество точек исходной хронограммы составило 4000, прогноз – на 2000 точек. Результаты расчётов приведены на рис. 1. Экспериментальные данные представляли собой непрерывную запись интервалов времени вращения шпинделя станка на холостом ходу при частоте вращения 315 мин^{-1} с дискретностью 5000 измерений за оборот. Алгоритм даёт малое расхождение с исходной хронограммой. При этом можно отметить достаточную глубину прогнозирования – 50 % от длины исходного массива данных. В качестве оценки погрешности прогнозирования было принято максимальное отклонение $\zeta = 0,58 \text{ мкс}$, которое не превышает 1,5 % в относительном выражении.

Прогнозирование хронограммы вращения осложнено большими объёмами полученных данных. Для качественного прогноза за одну минуту обработки необходимо обработать две минуты записанной хронограммы вращения. Учитывая, что при частоте вращения шпинделя станка 300 мин^{-1} за две минуты накапливаются 3 млн интервалов времени, построение прогноза потребует затратных и технически сложных решений по увеличению вычислительных ресурсов блока обработки измерительной информации. К тому же, подобная глубина прогноза (1 мин) не является

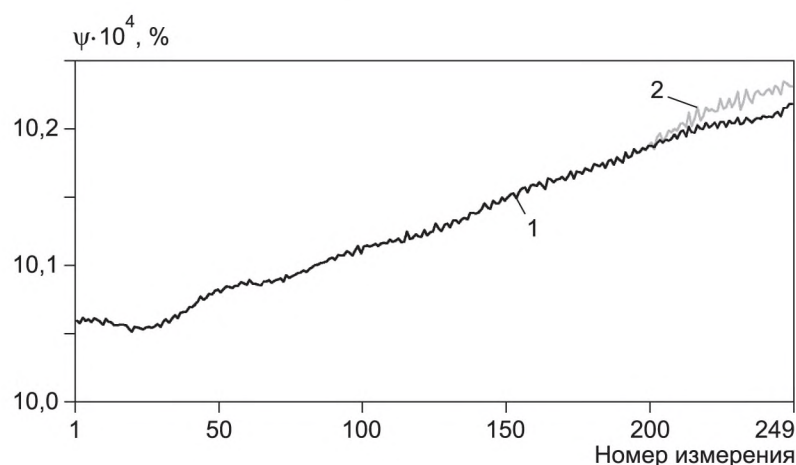


Рис. 2. Прогнозирование изменения оценки Ψ относительной доли высокочастотных составляющих спектра хронограммы вращения: 1 – реальные данные; 2 – прогноз

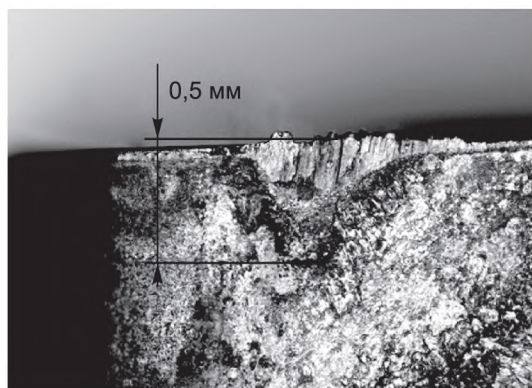


Рис. 3. Износ задней поверхности резца $h_{\max}=0,5$ мм

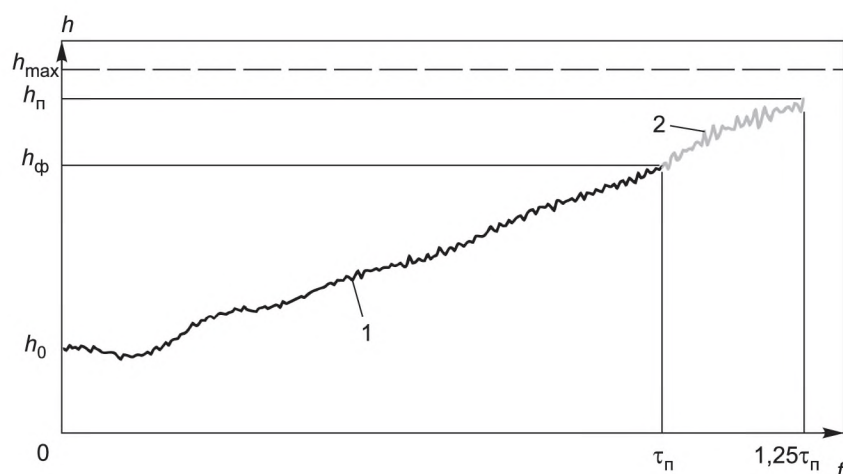


Рис. 4. Иллюстрация общего подхода к прогнозированию износа режущего инструмента: 1 – априорные данные; 2 – прогноз

достаточной в вопросах прогнозирования состояния режущего инструмента.

Исходя из сказанного выше, авторы предложили прогнозировать непосредственно изменение оценки Ψ относи-

тельной доли высокочастотных составляющих в спектре хронограммы вращения, коррелированное с износом режущего инструмента [15]. При выявлении критерия затупления инструмента в фазохронометрическом представлении была исследована и подтверждена возможность применения оценки Ψ для мониторинга процесса обработки. В колебаниях, связанных с износом токарного инструмента и имеющих частоты до 1000 Гц (для станков типа 16К20Ф3), содержится информация о неравномерности работы электродвигателя станка, дефектах зубчатого зацепления и смазки. К тому же такие колебания, связанные с износом токарного инструмента, являются высокочастотными. Поэтому, разделив мощность спектра из области высокочастотных колебаний (предположим, что P_2 – колебания выше 1000 Гц) на общую мощность спектра колебаний (P_1+P_2), можно получить некоторое процентное соотношение Ψ , увеличение которого коррелировано с изнашиванием режущей кромки:

$$\Psi = P_2 / (P_1 + P_2) \cdot 100,$$

где P_1+P_2 – общая мощность спектра колебаний; P_2 – мощность спектра из области высокочастотных колебаний.

Экспериментальные исследования подтвердили вышеописанную гипотезу. Для подтверждения в качестве исходных данных были приняты результаты расчёта параметра Ψ . Прогнозирование выполнялось по 200 точкам с глубиной прогноза 25 %, что соответствует 8 мин в пересчёте на время обработки. Такая глубина прогноза оптимальна, исходя из точности прогнозирования, так как при прогнозе более 25 % погрешность начинает экспоненциально расти. На рис. 2 представлены исходный массив реальных данных и график прогноза. Максимальное относительное отклонение результатов прогноза составляет 0,2 %, что свидетельствует об эффективности предложенного решения.

Переход к прогнозированию износа режущего инструмента осуществлён через перепределение оси ординат графика (см. рис. 2). Для этого необходимо найти значение параметра $\Psi_{\max}$, при котором достигается критический износ инструмента, а затем перестроить шкалу ординат от 0 до $h_{\max}$, т. е. значению $\Psi_{\max}$ должно соответствовать $h_{\max}$. В данном случае принимается допущение о линейности изменения износа в течение времени обработки. Использование же дополнительной информации о характере процесса изнашивания режущего инструмента способно привести к увеличению достоверности прогнозирования. Максимальный износ $h_{\max}$ определяется один раз с помощью оптического микроскопа. Это происходит при настройке системы мониторинга. Пример полученного результата измерений приве-

дён на рис. 3. Данный пример свидетельствует о конечном состоянии инструмента после проведения эксперимента по точению 10 заготовок (материал – сталь марки Ст 45, диаметр 70 мм, длина 150 мм) на станке 16к20 инструментом со сменной пластиной типа CNMG 12 04 08-ММ при следующих режимах резания: глубина резания 1 мм, подача 0,2 мм/об., частота вращения шпинделя 1000 мин⁻¹. Максимальный износ $h_{\max}$ был определён на уровне 500 мкм. Для каждой заготовки после обработки была измерена шероховатость поверхности, которая практически линейно возрастала по мере изнашивания инструмента, что согласуется с классическим представлением о развитии износа инструмента во времени.

Общий подход к прогнозированию показан на рис. 4. В определённый момент времени τ_n делается прогноз на время, соответствующее 25 % от τ_n . Уровень h_n является прогнозируемым значением износа в момент времени $1,25\tau_n$, соответствующий концу участка прогнозирования. Прогнозируемый уровень износа h_n может быть использован оператором для оценки остаточного ресурса инструмента с целью его своевременной замены, либо в качестве информации для станка с числовым программным управлением для прекращения операций обработки при достижении критических значений износа.

Заключение. В статье описан новый подход к диагностике режущего инструмента, в частности, токарного, основанный на фазохронометрическом методе диагностики циклических машин и механизмов. Данный метод весьма перспективен для непрерывного мониторинга состояния оборудования в реальном времени. Рассмотрен переход от мониторинга состояния инструмента в режиме реального времени к прогнозированию с высокой степенью надёжности состояния этого инструмента. Внедрение данной технологии в промышленность, особенно при обработке крупногабаритных дорогостоящих и уникальных прецизионных деталей, позволит повысить уровень рентабельности обработки и снизить риск возникновения брака из-за пропущенного отказа инструмента.

Результаты работы получены в рамках выполнения инициативных научных проектов базовой части государственного задания (НИР 9.4968.2017/БЧ). Отдельные результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ, и при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Л и т е р а т у р а

1. Киселёв М. И. Прогнозирование техногенных катастроф: применение фазохронометрического подхода // Стандарты и качество. 2013. № 10. С. 56–59.

2. Канторович Г. Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал ВШЭ. 2002. Т. 6. № 1. С. 85–106.

3. Мельников А. В., Попова Н. В., Скорнякова В. С. Математические методы финансового анализа. М.: Анкил, 2006.

4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов прогноз и управление / Под ред. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974.

5. Андреев А. В., Пытьев Ю. П. Результаты исследования методов прогнозирования и моделей данных // Сб. докладов Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов», 2011. С. 174–177.

6. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997.

7. Дружинин П. В., Шкиперова Г. Т. Эколого-экономические модели и прогнозы в системе регионального управления // Проблемы прогнозирования. 2012. № 1. С. 88–98.

8. Порфирьев Б. Н. Оценка и прогноз техногенных рисков долгосрочного экономического роста в России // Проблемы прогнозирования. 2013. № 4. С. 26–37.

9. Добровинский И. Р., Медведик Ю. Т., Медведик М. Ю. К вопросу контроля состояния режущей кромки резца виброакустическим методом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 3 (31). С. 102–116.

10. Залога В. А., Нагорный В. В. Определение стойкости инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания // Металлообработка. 2013. № 2 (74). С. 14–22.

11. Кувайсакова Ю. Е., Клячкин В. Н., Бубырь Д. С. Прогнозирование состояния технического объекта на основе мониторинга его параметров // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 2014. С. 7616–7626.

12. Валеев С. Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. М.: Наука, 1991.

13. Поляк Б. Т., Цыпкин Я. З. Псевдоградиентные алгоритмы адаптации и обучения // Автоматика и телемеханика. 1973. № 3. С. 45–68.

14. Сырицкий А. Б. Измерение износа режущего инструмента фазохронометрическим методом в процессе обработки // Измерительная техника. 2016. № 6. С. 30–32.

15. Сырицкий А. Б. Разработка метода и средств мониторинга текущего технического состояния токарного инструмента на базе фазохронометрического подхода: Автореф. дисс. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук. Москва, 2016.

Дата принятия: 10.05.2017.