

## КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ-ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Ковалев А.А. \*, Зинова В.В. \*\*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия*

*\* e-mail: kovalevarta@gmail.com*

*\*\* e-mail: zinova.vasilissa@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 22.03.2019

Исследуются возможности контроля процесса резания с применением акустико-эмиссионного метода посредством обработки входного сигнала с помощью фильтра Калмана. В частности, проводятся измерения колебаний системы станок-приспособление-инструмент-заготовка в процессе обработки заготовки резанием. Предлагается фиксировать момент начала процесса резания в процессе измерения колебаний с помощью нескольких алгоритмов фильтрации. Выбран наиболее подходящий из них с возможностью применения его для более сложной задачи – контроля зоны резания, в частности фиксации скола режущей кромки инструмента.

*Ключевые слова:* линейный фильтр Калмана, акустическая эмиссия, «альфа-бета» фильтр, непрерывный контроль, процесс резания.

### Введение

В настоящее время остро стоит проблема повышения эффективности работы предприятий авиационной промышленности и их конкурентоспособности. Одним из путей решения проблемы является рациональная автоматизация технологических процессов и минимизация процента брака готовой продукции [4].

Важной составляющей производственного процесса является технологический процесс обработки заготовок [12]. В ходе его автоматизации сталкиваются с рядом трудностей, одна из которых заключается в том, что резание представляет собой случайный процесс, сопряженный с рядом возникающих факторов: износ режущей кромки инструмента, ее скол, износ приспособления и составляющих станка, коррозия элементов станка, образование трещин и сколов на них, термическое нагружение и т.д. Многие процессы (например, коррозия, усталостный износ элементов станка) не являются быстропротекающими и представляют собой при задачах автоматизации менее важную проблему, чем, например, скол режущей кромки инструмента. Данное событие можно предсказать только с некоторой долей вероятности. Безусловно, с учетом стойкости инст-

румента закладывается время его замены с гарантированным запасом, что в большинстве случаев обеспечит требуемое качество обработанной поверхности. Однако всегда присутствует вероятность того, что скол режущей кромки или неконтролируемый износ инструмента произойдет до того, как он будет заменен, в частности, из-за отсутствия гарантированной наработки режущего инструмента.

В авиастроении часто используются трудно обрабатываемые сплавы (например, титановые). В связи с вышесказанным для обеспечения и повышения выпуска годной продукции при автоматизации технологических процессов, кроме периодической замены инструмента, целесообразно применять непрерывный контроль процесса резания, особенно при обработке труднообрабатываемых сложнопрофильных заготовок.

### Алгоритм фильтрации

Для регистрации изменений в системе станок-приспособление-инструмент-заготовка (далее — система) используются различные системы контроля (СК). Многие из них основаны на анализе гармонических колебаний, которые фиксируются специальными датчиками. Для анализа колеба-

ний используются различные алгоритмы фильтрации. Они основаны на том, что в каждый момент времени, когда поступает информация о состоянии рассматриваемой системы, происходит [1]:

- 1) предсказание ее состояния на шаг вперед;
- 2) сравнение информации с предсказанием, сделанным шаг назад на текущий момент времени.

В случае если прогноз существенно отличается от полученной на текущем шаге информации, работа системы прекращается.

Датчик СК фиксирует колебания, происходящие в системе, вне зависимости от того, являются они полезными с точки зрения контроля за состоянием системы или нет, т.е. на вход устройства, обрабатывающего сигналы, поступает смесь полезных сигналов и шумов. Ставится задача отсеять шумы и выделить полезные сигналы.

### **Фильтр Калмана как объект исследования**

В теории автоматического управления, изучающей данные процессы, существует множество алгоритмов, применяемых для решения подобных задач. Их называют алгоритмами фильтрации или электрическими фильтрами [16]. Предлагается оценить возможности фильтрации квазистационарных многочастотных колебаний, возникающих в процессе резания, посредством фильтра Калмана, который часто используется в теории автоматического управления для формирования вектора управления, в частности в радиолокации при слежении за воздушными объектами. Однако в машиностроении данный фильтр пока мало распространен. Сравнение фильтра Калмана с другими фильтрами приведено далее в статье.

Фильтр Калмана использует динамическую модель системы, управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оценки состояния [16]. Алгоритм состоит из двух повторяющихся фаз: предсказание и корректировка. На первом этапе рассчитывается предсказание состояния в последующий момент времени (с учетом погрешности их измерения). На втором – новая информация с датчика корректирует предсказанное значение (с учетом зашумленности сигнала).

Для упрощения задачи решено исследовать два состояния системы: при воздействии инструмента на заготовку и при отсутствии процесса резания. При помощи фильтра Калмана было необходимо отделить два этих состояния, сообщив системе управления момент их смены.

Как прописать в алгоритме фильтра момент начала процесса резания? Какой из вариантов алгоритмов фильтра Калмана целесообразно использовать в данном случае? Возможно ли результаты данного исследования (при условии, что задача несколько упрощена) применить для контроля процесса резания, в частности для фиксации скола режущей кромки инструмента и контроля ее износа? Если да, то какие условия следует внести в алгоритм фильтрации? Данная статья последовательно отвечает на поставленные вопросы.

### **Критерии оптимальности электрических фильтров**

При обработке данных, как правило, используют три основных критерия построения фильтров: минимум среднего квадрата ошибки, максимум отношения сигнал/шум и максимум энергетического отношения сигнал/шум на выходе фильтра.

Фильтр Калмана, по определению, оптимален по минимуму среднего квадрата ошибки [3].

### **Цели и задачи**

Цель данной работы – найти алгоритм, фиксирующий момент начала процесса резания рассмотрев для этого вариации алгоритмов фильтра Калмана. Для достижения поставленной цели, ставятся следующие задачи:

- 1) описать алгоритмы фильтрации, которые могут применяться;
- 2) описать установку для получения экспериментальных данных, которые подвергнутся фильтрации;
- 3) провести измерения;
- 4) обработать полученные результаты измерений с помощью вышеописанных алгоритмов фильтрации;
- 5) графически представить результаты измерений и расчетов;
- 6) выявить фильтр, фиксирующий достоверный момент начала процесса резания;
- 7) сделать выводы о проделанной работе.

### **Критерии выбора фильтра**

Критерием, на основании которого выбирается алгоритм фильтрации, является установленный порог, по достижении которого можно считать, что процесс резания начался. Решение данной задачи будет проводиться графическим методом: оценочные методы, основанные на построении и анализе графиков. В качестве модели принимается среднее значение амплитуды при отсутствии силы резания.

## Основные подходы к решению задач фильтрации в качестве альтернативных вариантов фильтру Калмана

В работе [9] выделяется два основных подхода к решению задач фильтрации случайных процессов: на основе фильтра Винера и фильтра Калмана. Теория калмановской фильтрации была разработана позднее винеровской и является существенным ее развитием [8].

Критерием оптимальности фильтра Винера служит минимум среднего квадрата ошибки  $\min E(e_i^2)$ . Уравнением наблюдения служит аддитивная смесь сигнала  $s(t)$  и шума  $n(t)$  [7]:

$$z(t) = s(t) + n(t). \quad (1)$$

Сигнал считается случайным с заданной корреляционной функцией, причем рассматривается как непрерывная версия уравнения, так и дискретная [14].

Критерием оптимальности фильтра Калмана является, как и в случае фильтра Винера, минимум среднего квадрата ошибки [18]. В отличие от процедуры синтеза фильтра Винера здесь оцениваемый случайный процесс задается в виде стохастического дифференциального уравнения, а уравнение наблюдения имеет вид [9, 19]:

$$z(t) = H(t)x(t) + n(t), \quad (2)$$

где  $H(t)$  — известная функция;  $x(t)$  — некоторый случайный процесс, который задается упомянутым дифференциальным уравнением.

Согласно [20] существует три типа линейных фильтров, применяемых для обработки случайных процессов. Кроме описанных выше фильтров Винера и Калмана, выделяется фильтр, сигнал для которого считается детерминированным [10]. Фильтр оптимален по критерию максимума отношения сигнал/шум на выходе, и сигнал на выходе считается детерминированным [17]:

$$z(t) = \frac{s_0^2}{\sigma_{n0}^2}, \quad (3)$$

где  $s_0 = s_0(t)$  — сигнал на выходе фильтра;  $\sigma_{n0}^2$  — мощность шума на выходе фильтра.

Для подобных задач (фильтрации сигналов в процессе резания) ранее применялся фильтр Калмана [5, 13].

## Алгоритм работы классического фильтра Калмана

В настоящей статье рассматривается фильтр Калмана. С помощью калмановского подхода, в отличие от винеровского, можно решать нестационарные задачи на конечном интервале наблюдения [6]. Сигнал на входе фильтра считается детерминированным, т.е. данный фильтр подходит для осуществления фильтрации случайного процесса в конечном промежутке времени [2, 3, 15].

Алгоритм работы классического фильтра Калмана состоит из пяти основных этапов [9, 11]:  
Уравнение измерения:

$$Z_k = HX_k + n. \quad (4)$$

Уравнения предсказания:

1) предсказание состояния системы (экстраполяция):

$$\hat{X}_k^- = F\hat{X}_{k-1} + Bu_{k-1}; \quad (5)$$

2) предсказание ошибки ковариации (ковариация экстраполяции):

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q. \quad (6)$$

Уравнения экстраполяции:

3) вычисление усиления Калмана (коэффициент Калмана):

$$K_k = P_k H^T [HP_k^- H^T + R]^{-1}; \quad (7)$$

4) обновление оценки с учетом  $Z_k$ :

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k [Z_k - H\hat{X}_k^-]; \quad (8)$$

5) обновление ошибки ковариации:

$$P_k = [I - K_k H] P_k^-, \quad (9)$$

где  $X$  — уравнение состояния динамической системы;  $F$  — матрица экстраполяции при измерениях в трехмерном пространстве;  $B$  — матрица, характеризующая влияние случайных возмущений;  $P_k$  — ковариационная матрица оценки состояния системы;  $H$  — матрица пересчета пространства состояния динамической системы в пространство отсчетов;  $R$ ,  $Q$  — ковариационные матрицы ошибок оценивания параметров, измеряемых на этапе первичной обработки;  $Z$  — матрица измерений;  $I$  — единичная матрица.

По изменению коэффициента Калмана можно отследить, насколько фильтр в процессе изме-

рения «доверяет» полученным измерениям. Такое поведение коэффициента Калмана напрямую связано с ошибками измерений (см. формулу (7)).

Коэффициенты  $k$  у некоторых матриц опущены, так как переменной данных матриц является интервал времени  $\tau$ , в случае равнодискретных и равноточных значений данные матрицы являются постоянными во времени. Коэффициент фильтра Калмана зависит от ковариационных матриц и матриц перехода. Данные матрицы задаются до начала работы с фильтром. Если они постоянны, то коэффициент Калмана также будет постоянным. В процессе фильтрации из матриц, задаваемых в начале алгоритма, изменяются значения ковариационной матрицы состояния системы  $P_k$ . Причем они зависят от коэффициента Калмана. Таким образом, можно предположить, что значение коэффициента Калмана станет постоянным спустя некоторый промежуток времени.

#### Алгоритм работы упрощенного фильтра Калмана – «Альфа-бета» фильтра

В случае равнодискретных и равноточных измерений возможно использование упрощенного алгоритма Калмана, называемого «альфа-бета» фильтром. По [9] алгоритм фильтрации упрощается.

Предсказание:

1. Предсказание состояния системы (совпадает с уравнением (5)).

Экстраполяция:

2. Вычисление усиления Калмана (коэффициент Калмана):

$$K = [\alpha \quad \beta /]^T, \quad (10)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные коэффициенты, задаваемые до начала работы с фильтром.

3. Обновление оценки с учетом  $Z_k$  (совпадает с уравнением (8)).

#### Проведение измерений

Фиксирование сигналов проводят посредством акустико-эмиссионной системы Малахит АС-15А/2, предназначенной для обнаружения, локализации и регистрации источников акустической эмиссии.

При проведении измерений принимались следующие допущения:

– установка для проведения эксперимента считается полностью исправной, не искажающей результаты измерений;

– станок находится в работоспособном состоянии;

– окружающая среда соответствует нормальным условиям.

Для обработки использовался фрезерный станок с ЧПУ, станочные тиски с прямыми губками, заготовка прямоугольного сечения (материал Д16Т), инструмент – цельная концевая фреза (материал – быстрорежущая сталь Р18). На стол станка (рис. 1, выделен и подписан цифрой «1» или рис. 2) устанавливались пьезоэлектрические датчики с двух сторон от тисков (рис. 1, подписаны цифрой «2» или рис. 2).

Сигналы с датчиков оцифровываются посредством программного обеспечения Малахит АС-15А. Замер производится в момент врезания инструмента в заготовку. Измерения проводятся десять раз с интервалом в 2 мин. В программном обеспечении устанавливается порог 20 дБ. Результат оцифровки сигналов программным обеспечением представлен на рис. 3.

График изменения амплитуд при отсутствии и при наличии процесса резания представлен на рис. 4.

#### Обработка результатов измерения

Полученные результаты обрабатываются тремя фильтрами:

– «альфа-бета» фильтром с  $\alpha = 0,3$  (в процессе фильтрации используется только один коэффициент, так как в данном случае задача одномерная);

– «альфа-бета» фильтром с  $\alpha = 0,15$ ;

– фильтром Калмана.

Значения коэффициентов приняты по рекомендации [8].

Результаты представлены на рис. 5–7.

Изменение коэффициента Калмана представлено на рис. 8.

Сопоставить полученный график можно с изменением квадрата ошибки измерений (рис. 9).

Графики на рис. 8 и 9 между собой связаны прямо пропорционально. В одних случаях удобнее руководствоваться изменением коэффициента Калмана, а в других – квадратом ошибки измерения. Кроме того, квадрат ошибки измерения показывает, в каких числовых диапазонах происходит ошибка. Например, можно рассчитать процент вероятности измерения датчиком сигнала без ошибки.

#### Выявление фильтра, наиболее точно фиксирующего момент начала процесса резания

С целью выявления алгоритма, который наиболее достоверно фиксирует момент начала про-

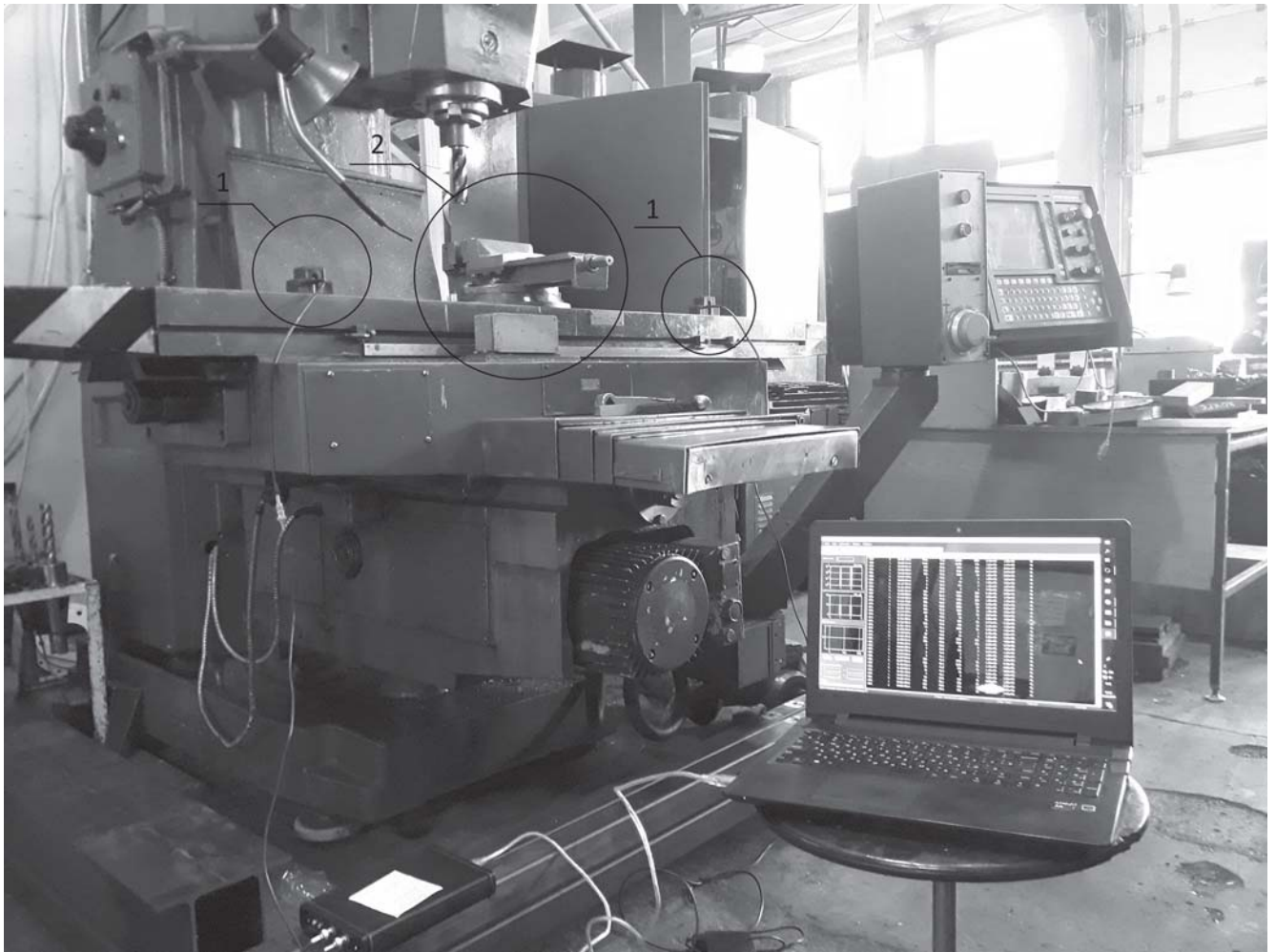


Рис. 1. Фрезерный станок с ЧПУ (общий вид, защитный кожух снят): 1 — стол станка; 2 — тиски



Рис. 2. Стол станка

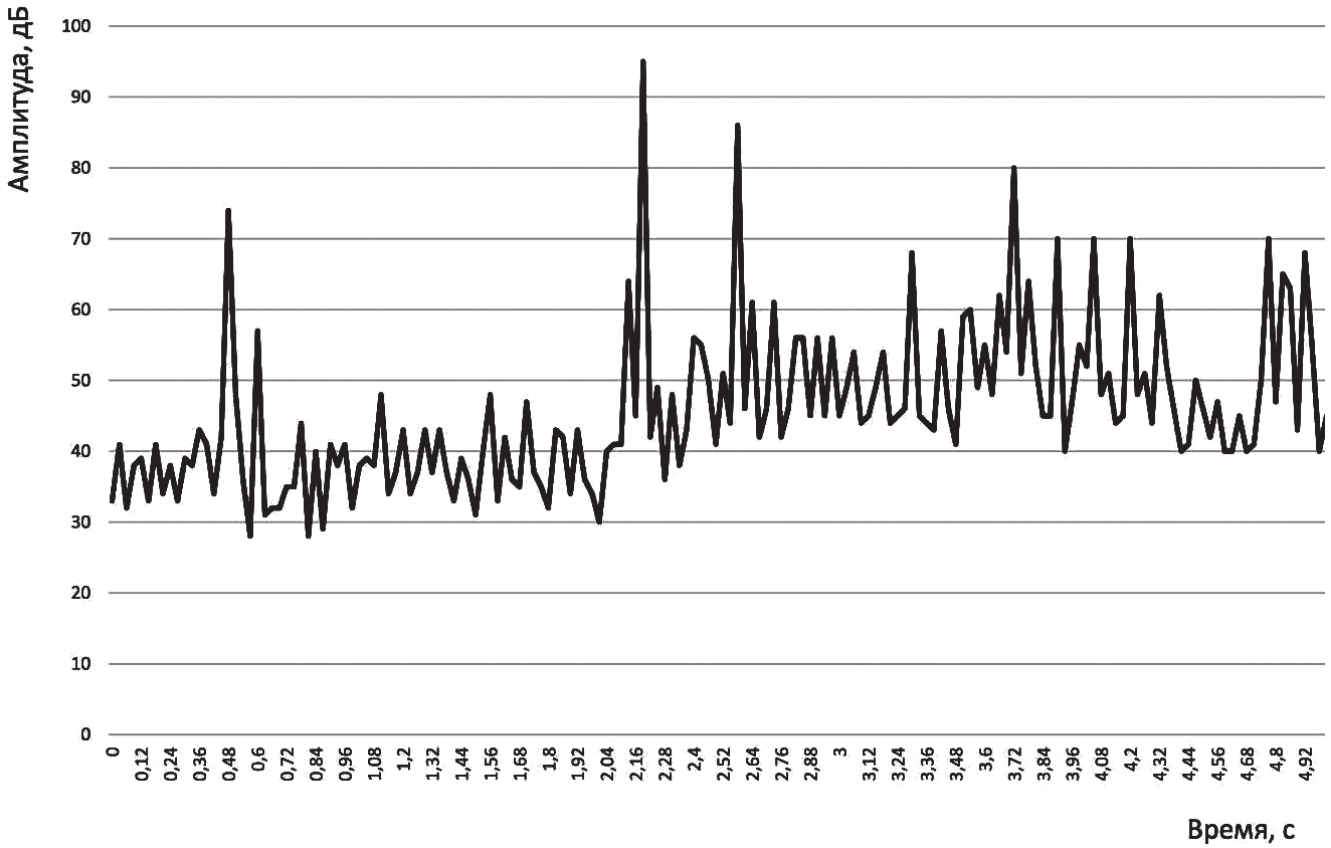


Рис. 3. Результат оцифровки сигналов с датчиков

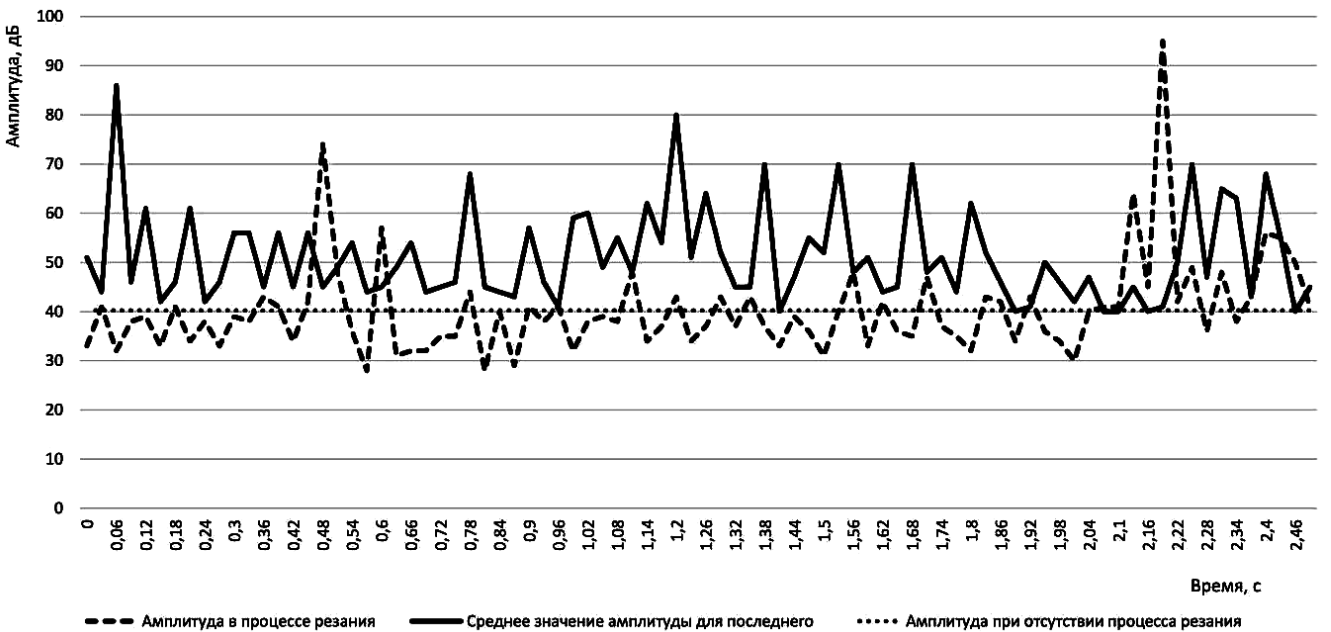
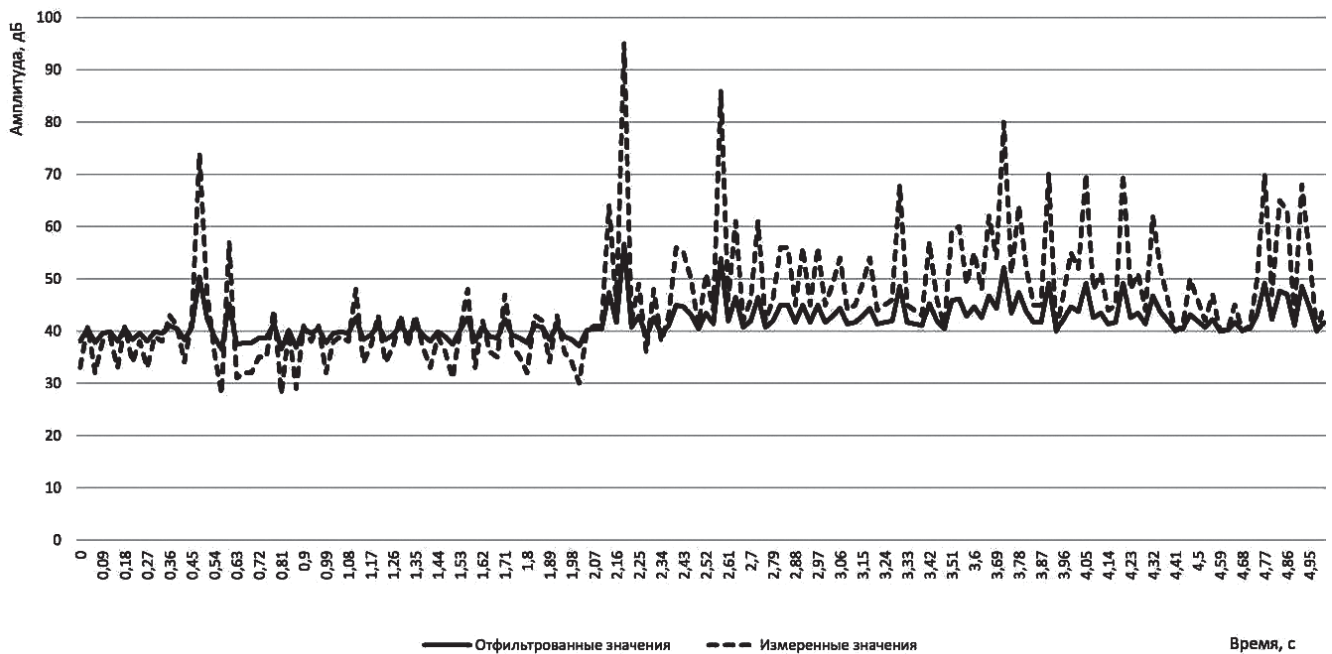
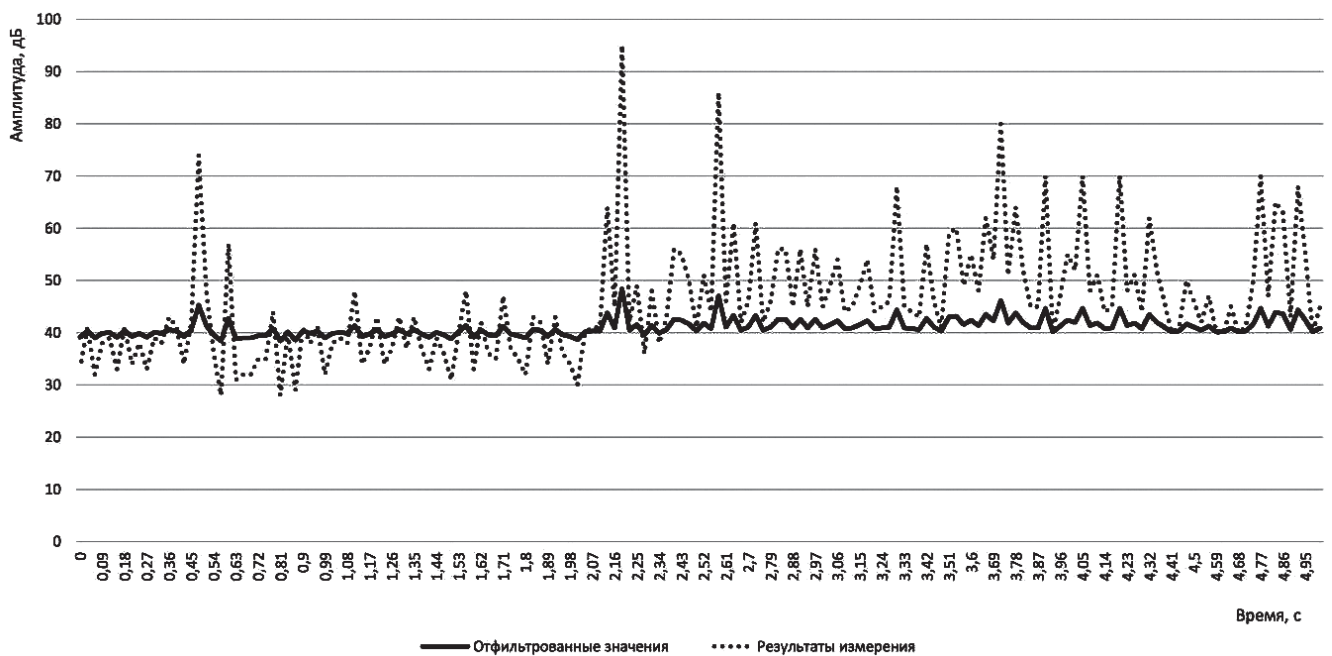


Рис. 4. График изменения амплитуд

процесса резания, необходимо установить порог, т.е. провести линии, проходящие через точки начала резания, установленные фильтрами на графиках результатов работ фильтра (рис. 10–12), и сравнить их с моментом реального начала резания. Из

рис. 10 видно, что фильтр Калмана определяет начало процесса резания раньше, чем это происходит в реальном времени (на 0,51 с), а у «альфа-бета» фильтра в обоих случаях фиксация момента начала резания происходит вовремя (рис. 11 и 12).

Рис. 5. Результат работы «альфа-бета» фильтра с  $\alpha = 0,3$ Рис. 6. Результат работы «альфа-бета» фильтра с  $\alpha = 0,15$ 

Следовательно, классический фильтр Калмана менее достоверен в рамках решаемой задачи.

Для фильтра «альфа-бета» с  $\alpha = 0,3$  разница между порогом начала процесса резания (2,07 с) и максимальным значением колебаний вне процесса резания (0,45 с) больше, чем для фильтра «альфа-бета» с  $\alpha = 0,15$  (рис. 11 и 12). В первом случае разница составляет около 7 дБ, во втором

около 3 дБ. В связи с тем, что в первом случае амплитуда выше установленного порога, вероятность возникновения также увеличивается. Следовательно, фильтр «альфа-бета» с  $\alpha = 0,3$  из всех наиболее подходящий.

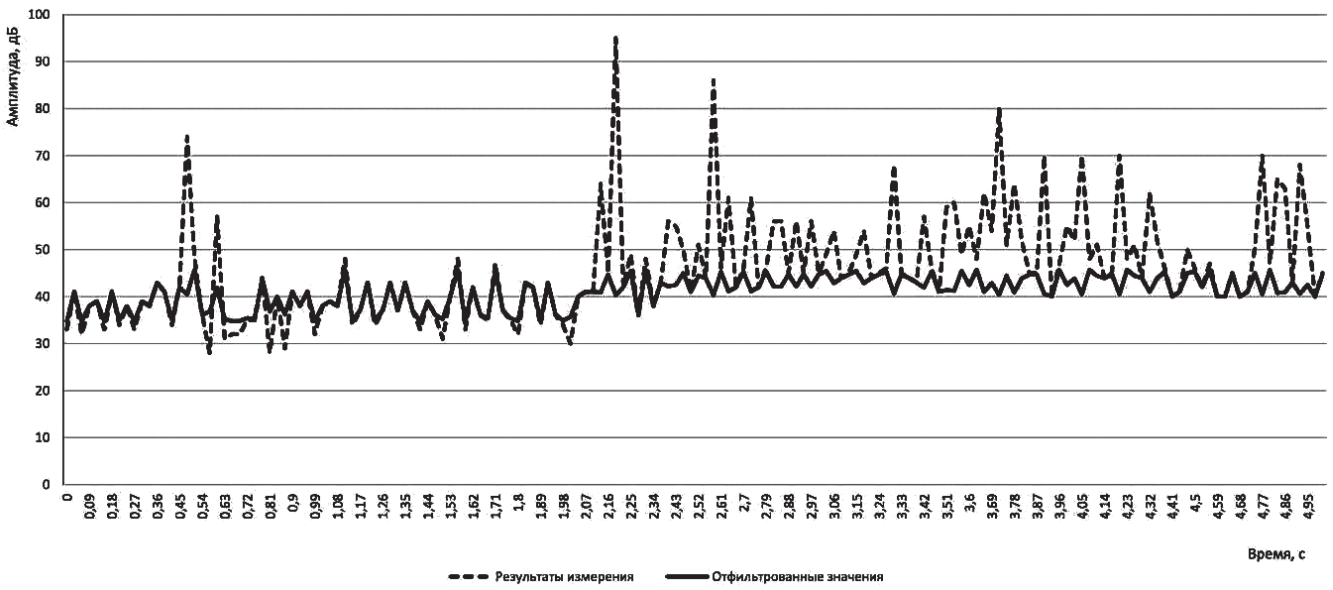


Рис. 7. Результат работы фильтра Калмана

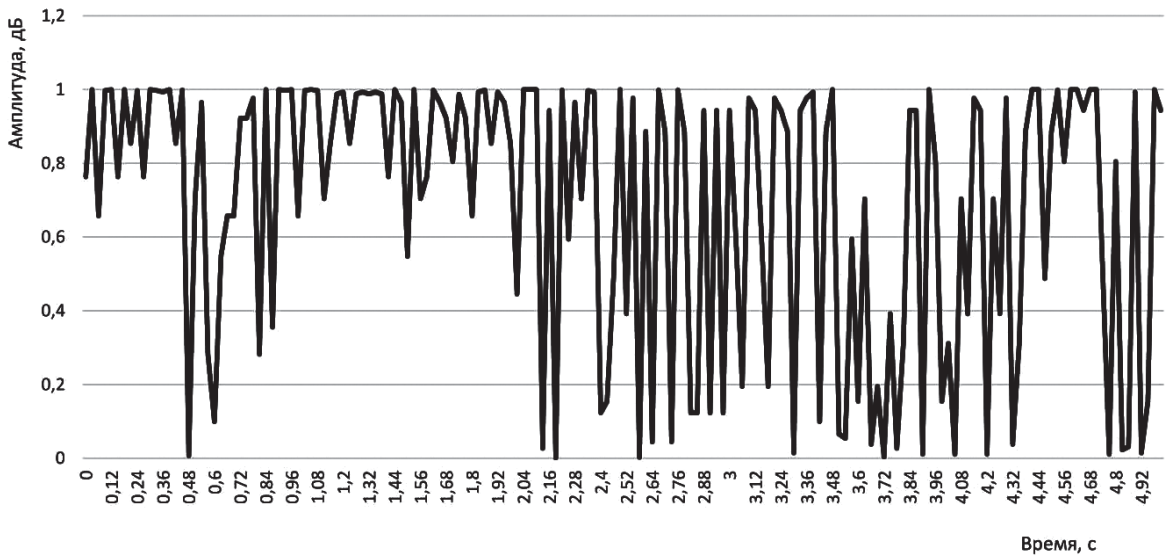


Рис. 8. Изменение коэффициента Калмана

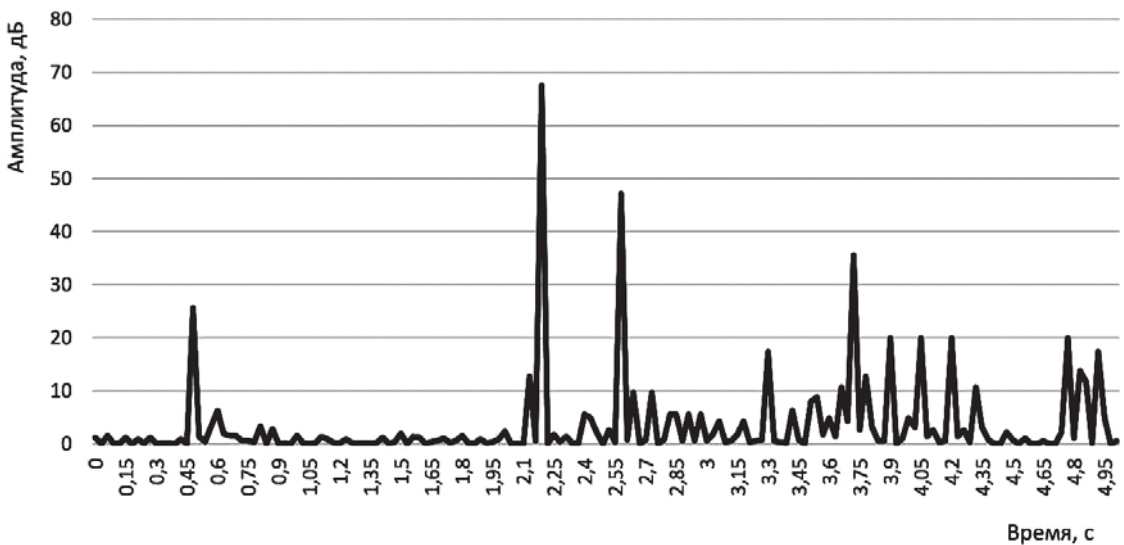


Рис. 9. Квадрат ошибки измерения



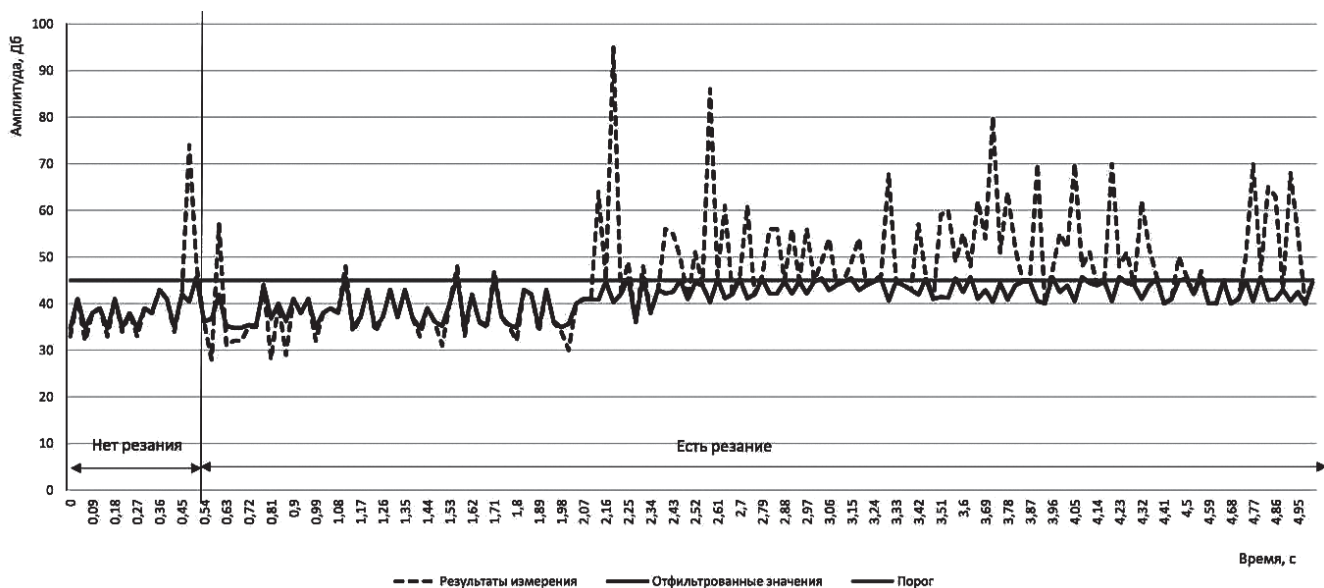


Рис. 10. Установление порога срабатывания сигнала начала процесса резания для фильтра Калмана

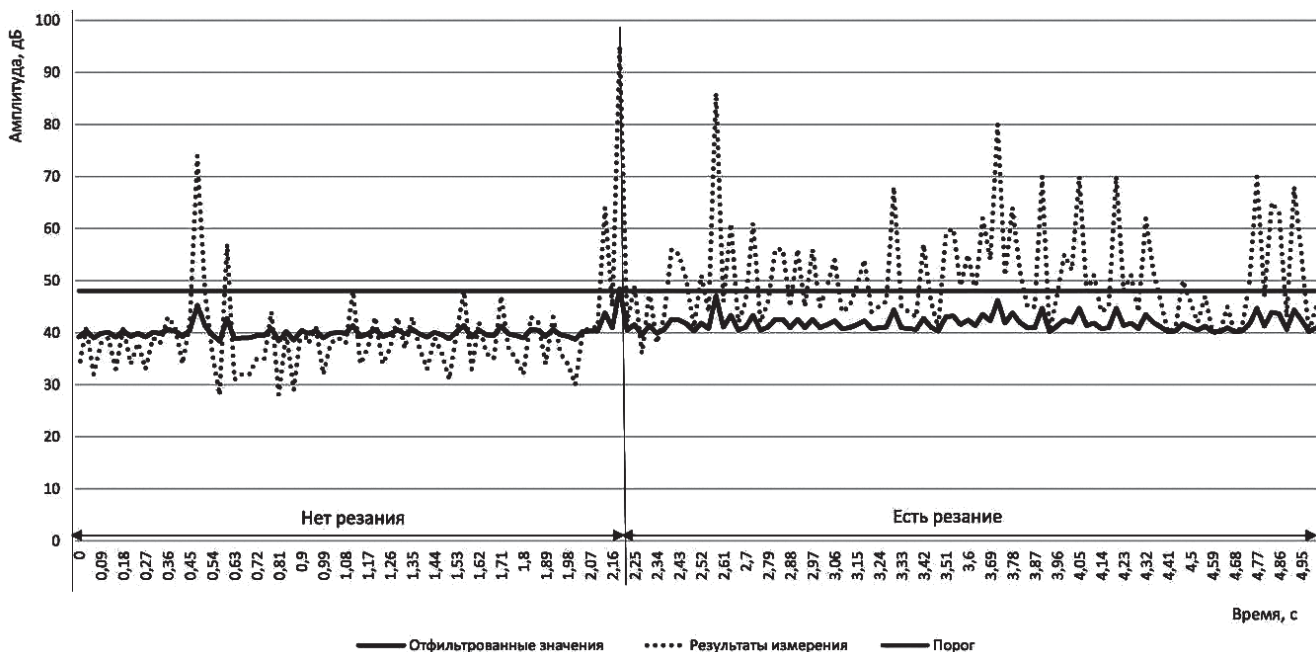


Рис. 11. Установление порога срабатывания сигнала начала процесса резания для фильтра «альфа-бета» с  $\alpha = 0,15$

## Выводы

Определить момент начала процесса резания целесообразно посредством фильтра «альфа-бета» с  $\alpha = 0,3$ . Он, при установлении на нем порога в 50 дБ, сможет наиболее достоверно фиксировать этот момент. Кроме того, фиксировать момент начала резания можно также по частоте возникновения ошибок измерения и по тому, насколько фильтр «доверяет» результатам измерений.

Использование классического фильтра Калмана в данном случае не целесообразно, так как мо-

дель является статической, а данный фильтр оптимален для динамической системы.

Коэффициент для «альфа-бета» фильтра целесообразно выбирать не максимальным, так как при установлении слишком большого его значения может существенно быть завышено пороговое значение, что приведет к невозможности фиксирования начала процесса резания, например, при сравнительно плавном врезании инструмента в заготовку.

Фильтр Калмана может быть использован при непрерывном контроле режущей кромки инстру-

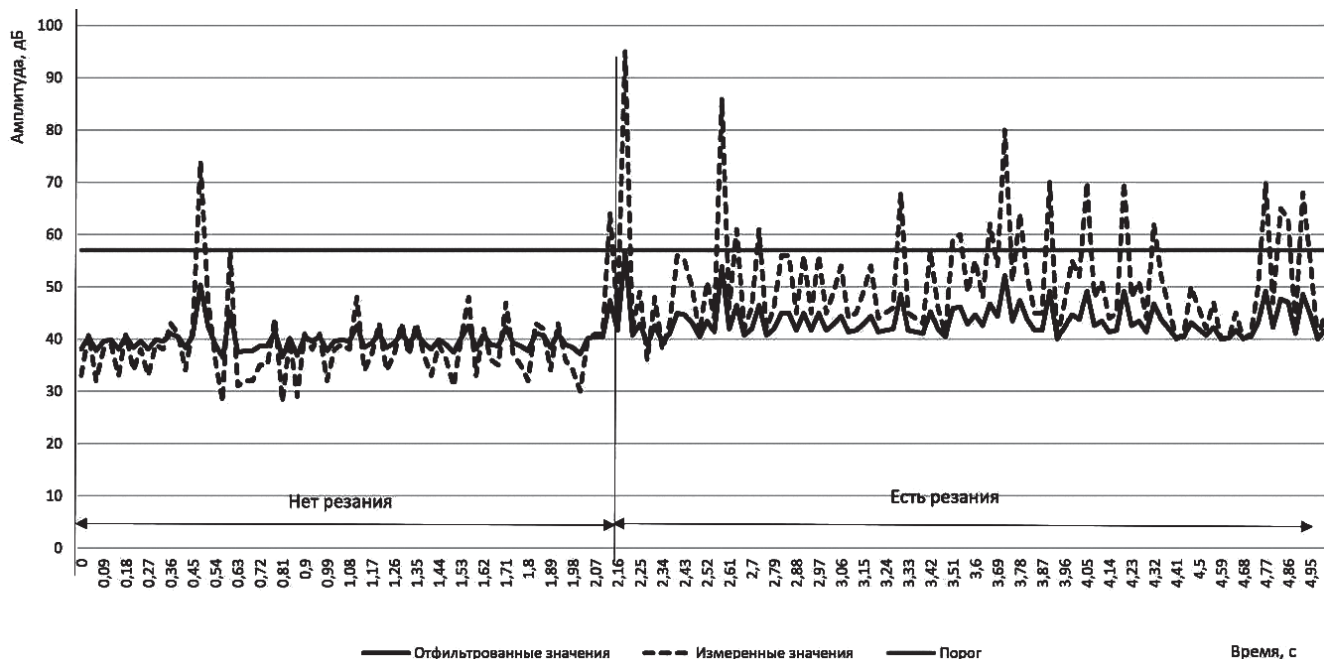


Рис. 12. Установление порога срабатывания сигнала начала процесса резания для фильтра «альфа-бета» с  $\alpha = 0,3$

мента. При увеличении износа произойдет увеличение сил резания и, как следствие, повысятся вибрации станка.

На основании роста амплитуды колебаний можно контролировать износ режущей кромки инструмента. Резкое изменение амплитуды может означать скол режущей кромки.

Непрерывный контроль зоны резания при обработке труднообрабатываемых сплавов в авиационной промышленности необходим, так как там присутствуют дорогостоящие сложнопрофильные детали из труднообрабатываемых сплавов. Необходимо минимизировать отправку в брак таких деталей.

Исследования возможностей применения фильтра Калмана для непрерывного контроля состояния системы станок-приспособление-инструмент-заготовка продолжаются.

### Библиографический список

1. Blair W.D. Fixed-gain, Two-stage Estimators for Tracking Maneuvering Targets // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1993. Vol. 29. No. 3, pp. 1004 – 1014. DOI: 10.1109/7.220947
2. Аleshin B.C., Maksimov V.H., Chernomorskiy A.I., Plekhanov V.E. Измерительная комплексная навигационная система одноосного колёсного модуля // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 120-128.
3. Баранов В.Н., Зо Л.У. Методика послеполетного анализа результатов испытаний легкого самолета // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 195-200.

4. Горелов А.С., Лисицын С.А., Морозов В.Б., Преис В.В., Саввина Е.А. Автоматизация статистического контроля качества пищевой продукции в массовых производствах: Монография. — Тула: Тульский государственный университет, 2009. — 120 с.
5. Гришианов И.А., Брожозовский Б.М. Анализ процесса резания с использованием фильтра Калмана // Вестник СГТУ. 2015. № 2(79). С. 38-42.
6. Зинова В.В. Синтез и исследование алгоритмов фильтрации, применяемых на этапе вторичной обработки радиолокационной информации // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 8(25), 13 р. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-8-361
7. Иванов М. В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Применение фильтра Калмана и генетического алгоритма для активной системы мониторинга содержания газовой фазы во флотационном аппарате // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 11. С. 503-509.
8. Иванов Д.С., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю. Алгоритм оценки параметров ориентации малого космического аппарата с использованием фильтра Калмана. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2009. — 32 с.
9. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие / Под ред. И.Б. Федорова. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. — 846 с.
10. Комиссаров А.А., Курочкин В.В. Использование фильтра Калмана для фильтрации значений, получаемых с датчиков // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам ЛП студенческой международной заочной научно-практической конференции. — Новосибирск: Изд-во АНС «СибАК»,

2017. № 5(52). URL: [https://sibac.info/archive/technic/5\(52\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/5(52).pdf)
11. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. — Киев: Изд-во Квіц, 2000. — 428 с.
  12. Максимов Ю.В., Оленин Л.Д., Шапаровская М.А. Сопоставительный анализ методов расчета процесса резания (к разработке аналитической методики расчета процессов резания) // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1(11). С. 159-169.
  13. Моргунов А.П., Чумаков А.П., Рогачев Е.А. Оптимизация процесса токарной обработки поверхностей изделий из жаропрочных хромоникелевых сплавов // Омский научный вестник. 2014. № 3(133). С. 67-70.
  14. Неуен Чонг Лыу. Исследование алгоритмов сопровождения траекторий воздушных целей: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАИ, 2004. — 114 с.
  15. Никитин Д.П. Исследование методов оценки ориентации вектора скорости при движении навигационного приёмника // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 166-172.
  16. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. Обработка радиолокационной информации в радиотехнических системах: Учебное пособие. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2016. — 84 с.
  17. Пролетарский А.В., Чжан Лифэй, Селезнева М.С., Неусытин К.А. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в федеративном фильтре Калмана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 8. С. 9-18.
  18. Чжо Зин Хтут, Селезнева М.С., Пролетарский А.В., Неусытин К.А. Система контроля прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 7. С. 314-318.
  19. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана: Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2016. — 396 с.
  20. Шахтарин Б.И., Сучков В.Б., Губанов Д.А. Оптимальная фильтрация случайных процессов: Учебное пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2018. — 90 с.

## A TOOL-BLANK STATE MONITORING WHILE CUTTING PROCESS USING KALMAN FILTER

**Kovalev A.A. \*, Zinova V.V. \*\***

*Bauman Moscow State Technical University,  
MSTU, 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russia*

\* e-mail: [kovalevarta@gmail.com](mailto:kovalevarta@gmail.com)

\*\* e-mail: [zinova.vasilissa@mail.ru](mailto:zinova.vasilissa@mail.ru)

### Abstract

The article discusses the issue of the cutting process monitoring possibility using the acoustic emission method by processing the input signal using the Kalman filter. A filter was selected to solve the problem. The inference was drawn on the possibility of monitoring the gradual wear-out and chipping of the cutting edge by Kalman filter.

The article consists of three main parts: introduction, the main part, and conclusions.

The introduction considers the problems occurring while automating the technological process of blank parts machining. With this, a part of events is deterministic, while the other part is random. Thus, to ensure the required quality level in the process of automation the cutting zone continuous monitoring is required. It will allow making changes directly while blank parts machining technological processes executing.

The main part of the article presents operation principles of the monitoring systems, based on the

system harmonic oscillations analysis. Various filtering algorithms were considered in particular.

The Kalman filter was chosen as the object of study as one of the most common algorithms in the theory of automatic control. The goals were set and the tasks were formulated. Criteria are being set, which the desired filter should meet for continuous for the cutting area monitoring. The main approaches to solving filtering problems are being considered and compared with the Kalman filter. The inference is being drawn that this filter is the most suitable for solving the set problem. Measurements are being performed, the results, processed by the three Kalman filters versions are being analysed, and one of them, best meeting all the necessary requirements is being selected.

The conclusions formulated the possibilities for Kalman filter application for continuous monitoring of the tool blank state in the cutting process and gave recommendations to the future work, and filter coefficient selecting in particular.

**Keywords:** Kalman linear filter, acoustic emission, alpha-beta filter, continuous monitoring, cutting process.

## References

1. Blair W.D. Fixed-gain, Two-stage Estimators for Tracking Maneuvering Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, vol. 29, no. 3, pp. 1004 – 1014. DOI: 10.1109/7.220947
2. Aleshin B.S., Maximov V.N., Chernomorskii A.I., Plekhanov V.E. Integrated measurement navigation system for uniaxial wheeled module. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 120-128.
3. Baranov V.N., Zaw L.O. A post-flight analyses technique to support flight tests of light aeroplanes. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 195-200.
4. Gorelov A.S., Lisitsyn S.A., Morozov V.B., Preis V.V., Savvina E.A. *Avtomatizatsiya statisticheskogo kontrolya kachestva pishchevoi produktsii v massovykh proizvodstvakh* (Automation of food products statistical quality controls in mass production), Tula, Tul'skii gosudarstvennyi universitet, 2009, 120 p.
5. Grishanov I.A., Brozhozovskii B.M. *Vestnik SGTU*, 2015, no. 2(79), pp. 38-42.
6. Zinova V.V. *Politekhnicheskii molodezhnyi zhurnal*, 2018, no. 8(25), 13 p. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-8-361
7. Ivanov M.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2017, vol. 71, no. 11, pp. 503-509.
8. Ivanov D.S., Karpenko S.O., Ovchinnikov M.Yu. *Algoritm otsenki parametrov orientatsii malogo kosmicheskogo apparata s ispol'zovaniem fil'tra Kalmana* (Algorithm for parameters estimating of of small satellites orientation using Kalman filter), Moscow, IPM im. M.V. Keldysha, 2009, 32 p.
9. Fedorov I.B. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh* (Information technologies in radio systems), Moscow, MGTU im. Baumana, 2011, 846 p.
10. Komissarov A.A., Kurochkin V.V. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki. Elektronnyi sbornik statei po materialam LIII studencheskoi mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Novosibirsk, ANS "SibAK", 2017, no. 5(52). URL: [https://sibac.info/archive/technic/5\(52\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/5(52).pdf)
11. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* (Digital radar. Introduction to the theory), Kiev, Kvits, 2000, 428 p.
12. Maksimov Yu.V., Olenin L.D., Shaparovskaya M.A. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2011, no. 1(11), pp. 159-169.
13. Morgunov A.P., Chumakov A.P., Rogachev E.A. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2014, no. 3(133), pp. 67-70.
14. Nguen Chong Lyu. *Issledovanie algoritmov soprovozhdeniya traektorii vozdukhnykh tselei* (Studying algorithms for air targets tracking), Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2004, 114 p.
15. Nikitin D.P. Investigation of methods for estimation of the orientation of the velocity vector of the moving navigation receiver. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 166-172.
16. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P. *Obrabotka radiolokatsionnoi informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* (Radar information processing in radio-technical systems), Tambov, TGTU, 2016, 84 p.
17. Proletarskii A.V., Chzhan Lifei, Selezneva M.S., Neusypin K.A. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2018, no. 8, pp. 9-18.
18. Chzho Zin Khtut, Selezneva M.S., Proletarskii A.V., Neusypin K.A. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2017, vol. 71, no. 7, pp. 314-318.
19. Shakhtarin B.I. *Fil'try Vinera i Kalmana* (Wiener and Kalman filters), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2016, 396 p.
20. Shakhtarin B.I., Suchkov V.B., Gubanov D.A. *Optimal'naya fil'tratsiya sluchainykh protsessov* (Optimal filtering of random processes), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2018, 90 p.