

# Математические методы исследования

## Mathematical methods of investigation

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-7-64-72>

### ВЫБОР ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ РАССМОТРЕНИЯ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

© Ирина Викторовна Гадолина<sup>1\*</sup>, Наталья Геннадиевна Лисаченко<sup>2</sup>, Юрий Анатольевич Свирский<sup>3</sup>, Дмитрий Андреевич Дубин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А. А. Благодина РАН, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4; \*e-mail: gadolina@mail.ru

<sup>2</sup> АО «ОНИИ «Технология» им. А. Г. Ромашина», Россия, 249031, г. Обнинск, Калужская область, Киевское шоссе, 15; e-mail: lisachenko@technologiya.ru

<sup>3</sup> Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Россия, 140180, г. Жуковский, Московская область, улица Жуковского, 1; e-mail: yury.svirsky@tsagi.ru

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; e-mail: dubin.connect@mail.ru

*Статья поступила 20 марта 2019 г. Поступила после доработки 22 апреля 2019 г. Принята к публикации 22 апреля 2019 г.*

Рассмотрены теоретические и практические вопросы цифровой обработки информации в задачах оценки долговечности в процессе нагружения. В связи со спецификой задачи, в которой первостепенное значение имеет точное определение величин экстремумов и их последовательности, ряд общепринятых рекомендаций оказывается неприемлемым. Так, например, теорема Котельникова, которая первоначально была предложена применительно к задачам оценки частотного состава процесса, может привести к значительным погрешностям. Показано, что требования, предъявляемые к анализу случайных процессов нагружения для дальнейшей оценки долговечности, в силу своей специфики находятся в противоречии с указанными требованиями, а именно, при выборе частоты согласно этому правилу можно допустить ошибку, причем не в запас оценки прочности. Рассмотрен вопрос цифровой фильтрации аппаратных выбросов. Проанализированы альтернативные подходы к выделению экстремумов случайного процесса: 1) непосредственное аппаратное выделение экстремумов; 2) дискретизация по методу пересечений уровней. Последний подход обладает оптимальным алгоритмом для выделения экстремумов и дает возможность с меньшими затратами и большей точностью выделить экстремумы случайного процесса. Естественный переход к целочисленной арифметике позволяет провести дальнейшую оптимизацию данного алгоритма. На модельных и реальных примерах продемонстрирован выигрыш в терминах быстродействия и оперативной памяти, что в конечном счете будет способствовать увеличению достоверности информации, необходимой для оценки долговечности. Экономия на памяти и быстродействии позволит обрабатывать более длительные реализации, что в результате даст возможность уточнения долговечности на стадии промышленной эксплуатации и для оценки остаточного ресурса.

**Ключевые слова:** случайный процесс нагружения; частота дискретизации; целочисленная арифметика; дискретизация по пересечению уровней; экстремумы; метод дождя; усталость материалов; долговечность.

### THE CHOICE OF THE SAMPLING FREQUENCY AND OPTIMAL METHOD OF SIGNAL DIGITAL PROCESSING IN THE PROBLEMS CONSIDERING RANDOM LOADING PROCESS FOR ASSESSING DURABILITY

© Irina V. Gadolina<sup>1\*</sup>, Natalia G. Lisachenko<sup>2</sup>, Yuriy A. Svirskiy<sup>3</sup>, Dmitry A. Dubin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Maly Kharitonievsky per. 4, Moscow, 101000, Russia; \*e-mail: gadolina@mail.ru

- <sup>2</sup> A. G. Romashin ORPE Technologiya, Kievskoe sh., 15, Obninsk, Kalyga oblast, 249031, Russia; e-mail: lisachenkong@technologiya.ru
- <sup>3</sup> N. E. Zhukovsky The Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovskogo ul. 1, Zhukovsky, Moscow oblast, 140180, Russia; e-mail: yury.svirsky@tsagi.ru
- <sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University, 2 Baumanskaya ul. 5-1, Moscow, 105005, Russia; e-mail: dubin.connect@mail.ru

*Received March 20, 2019. Revised April 22, 2019. Accepted April 22, 2019.*

Theoretical and practical issues of processing digital information in the problems related to durability assessment in conditions of loading are considered. Due to the specifics of the problem, in which the precise determination of the extreme values and their sequence is of primary importance, a number of generally accepted recommendations appeared invalid. For example, the Kotelnikov theorem, which was originally proposed in relation to the problems of estimating the frequency composition of the process, can lead to significant errors. It is shown that the requirements to the analysis of random loading processes with a goal of further assessment of the durability, due to their specificity, contradict with the specified requirements, namely, when choosing a frequency according to this rule, an error can be made, and not to the margin of the strength assessment. We considered the issue regarding digital filtering of hardware overshoots. Alternative approaches to the selection of extrema of the random process are analyzed: 1) direct hardware selection of extrema and 2) discretization by the method of level crossings. The latter approach has an optimal algorithm for isolating extremes and makes it possible to isolate extremes of a random process with lower costs and greater accuracy. The natural transition to integer arithmetic provides further optimization of the algorithm. The model and real examples demonstrate gains in terms of speed and memory, which ultimately promote an increase in the reliability of the information required for assessing the durability. The savings in memory and performance will allow processing of long-term implementations and result in a more accurate estimating of the remaining life and durability at the stage of production.

**Keywords:** random process of loading; sampling frequency; integer arithmetic; discretization by the level crossing; extrema; rain-flow method; fatigue of materials; durability.

## Введение

На стадии эксплуатации изделий машиностроения часто встает задача оценки остаточного ресурса [1], а также продления расчетного ресурса. С проблемами оценки нагруженности и ресурса сталкиваются специалисты в авиации [2], энергетике [3]. В задачах транспортного машиностроения актуальным является сопоставление расчетной и эксплуатационной надежности в связи с уточнением расчетных методов оценки нагруженности и долговечности [4, 5]. Специфика обработки случайных процессов в задачах оценки долговечности заключается в необходимости получения распределения параметров циклов, определяющих долговечность рассматриваемой конструкции. Дополнительным фактором является частотный состав процесса, который часто не требуется учитывать, так как влияние частоты на долговечность нагружения сказывается только при значительном ее изменении. Для оценки влияния последовательности нагружения в большинстве случаев достаточно хорошие результаты дает схематизация процесса нагружения с помощью выделения «полных циклов» методами дождя или методом трех экстремумов [6]. Данные методы учитывают физическую особенность поведения материала при случайном нагружении, а именно, эффекты «памяти материала». В этом случае при схематизации используют только экстремумы, а форма цикла и временные характеристики остаются за кадром. Результат

оценки нагруженности в целях последующей оценки долговечности представляют в виде таблицы полных циклов, содержащей распределения средних напряжений цикла  $\sigma_m$  и амплитуд напряжений  $\sigma_a$ .

Использование методов оценки с применением спектральных методов не обосновано на стадии постпроцессинга, т.е. когда уже по крайней мере существует опытный образец и имеется возможность провести регистрацию процесса. Спектральные методы не имеют понятного физического смысла (см. например, [7]) и в настоящей работе не рассматриваются, хотя многие подходы, изложенные ниже, применимы и к ним.

Оптимальным с точки зрения расхода ресурсов аналого-цифровой техники являлся способ обработки сигнала с непосредственным аппаратным выделением локальных экстремумов, обеспечиваемый аналоговым устройством, подобным описанному в [8]. Оно позволяло непосредственно фиксировать экстремумы случайного процесса, минуя промежуточную стадию дискретизации. Подобные устройства могли обеспечить измерение экстремумов электрического сигнала, в который преобразуется сигнал с тензометрического датчика деформаций деталей. Формирование моментов регистрации локальных экстремумов осуществлялось при индикации изменения знака разности между текущим и предыдущим кодированными значениями исследуемого сигнала. Устройство KLA-2 [9], спроектированное на

основе метода пересечений уровней и использованное для анализа нагруженности деталей машин, обеспечивало компактную и оперативную регистрацию экстремумов.

В настоящее время подобные устройства почти забыты и не применяются в задачах обработки электрического сигнала, пропорционального измеряемым напряжениям (нагрузкам). Это связано с большими достижениями в области производительности аппаратуры и вычислительных устройств. Увеличение быстродействия доступной памяти привело к замене специализированных устройств с оптимальными алгоритмами обработки сигналов унифицированными измерительными системами.

В практике современных исследований широко применяется цифровая обработка сигналов (ЦОС), при которой непрерывный процесс заменяется набором дискретных значений, взятых через равные промежутки времени. Процедура предполагает две операции: квантование по уровням, осуществляемое аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) разной разрядности, и дискретизацию по времени [6]. В данной работе рассматриваются особенности ЦОС, учитывающие специфику указанной задачи, а именно, необходимость максимально корректного построения таблицы полных циклов напряжений, выделенных в реализации. Альтернативным способом цифровой обработки является метод дискретизации по пересечению уровней, преимущества которого рассматриваются в данной статье.

Вопрос экономии вычислительных ресурсов, включающих память и количество операций, тесно связан с возможностью осуществлять обработку более продолжительных реализаций, что позволит повысить состоятельность оценки нагружения [10].

## Методы

Как отмечено во введении, в настоящее время нам не известны случаи применения аппаратных методов выделения экстремумов. Поэтому далее обсуждаются только цифровые методы обработки с различными алгоритмами дискретизации случайного процесса, в которых исходными данными служит набор дискретных значений, взятых через равные промежутки времени. Рассмотрим сначала задачу определения оптимального интервала времени при равномерной дискретизации процесса по времени.

Из теории случайных процессов известна формула Котельникова [11], согласно которой любую функцию  $F(t)$ , состоящую из частот от 0 до  $f_1$ , можно непрерывно передавать с любой точ-

ностью при помощи чисел, следующих друг за другом через интервал дискретизации

$$\Delta t = 1/(2f_1) \text{ [c]}. \quad (1)$$

В более общем виде формула (1) может быть представлена как

$$\Delta t = 1/(Kf_1) \text{ [c]}, \quad (2)$$

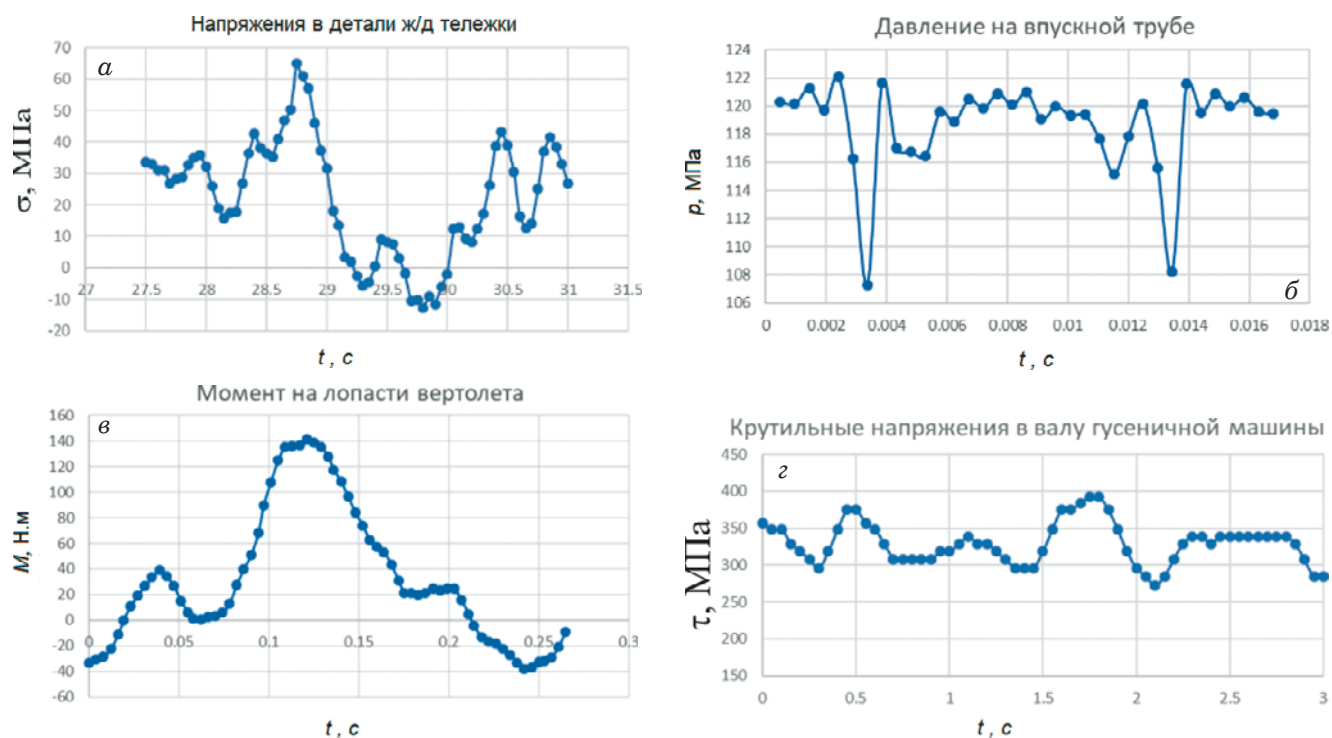
где  $K \geq 2$ . Согласно теореме Котельникова  $K = 2$ . Формулировка (2) будет использована в ходе дальнейших рассуждений.

В работе [12] содержится указание на необходимость обеспечить высокую частоту опроса для более точного определения пиковых значений аналогового сигнала. В [12] рекомендуется взять частоту опроса по меньшей мере в 10 раз больше максимальной частоты процесса.

Далее покажем, что даже если формула (1) успешно применяется в задачах оценки частотного состава случайных процессов, то она может привести к ошибкам в определении экстремумов при применении метода равномерной дискретизации, поскольку интервал  $\Delta t$ , определенный по (1), слишком велик для надежной регистрации экстремумов в проблемах оценки усталостной долговечности.

На рис. 1 приведены примеры осуществления дискретизации случайного процесса нагружения по методу равномерной циклической дискретизации [13] (точками обозначены зарегистрированные дискретные отсчеты). Показан эффект маскировки истинной максимальной амплитуды  $\sigma_{a \max}$  из-за ошибочного определения экстремальных значений реализации  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  за счет отсутствия цифрового отсчета в этих точках. На рис. 1, б и отчасти на рис. 1, а фактические экстремальные значения процессов не были зафиксированы из-за недостаточной частоты дискретизации. Например, для участка реализации, показанного на рис. 1, б, на временных отрезках  $t = 0,003 - 0,0035$  с и  $t = 0,013 - 0,0135$  с весьма вероятно наличие минимумов, меньших, чем те, что зафиксированы при дискретизации, а именно,  $\sigma_{\min 1} = 107$  МПа и  $\sigma_{\min 2} = 108$  МПа. В примерах, показанных на рис. 1, в и г, частота дискретизации достаточна и экстремальные значения надежно определены.

В табл. 1 на модельном примере поясняется природа возникновения погрешности определения максимальной амплитуды блока нагружения  $\sigma_{a \max}$ , которую с большой вероятностью будет давать дискретизация с недостаточной частотой. Для анализа выбран псевдонепрерывный процесс, численно моделируемый с коэффициентом нерегулярности  $I = 0,7$ . Коэффициент нерегулярности  $I$  характеризует структурную сложность процесса и определяется как  $I = N_o/N_s$  [6],



**Рис. 1.** Примеры, иллюстрирующие возможную ошибку при определении экстремальных значений при равномерной дискретизации процессов напряжений в эксплуатации

**Fig. 1.** Examples illustrating a possible error in estimating the extreme values by uniform discretization of in-service loading processes

где  $N_0$  — число пересечений процессом среднего уровня;  $N_s$  — число экстремумов, зафиксированных на представительном участке реализации. Реализация с  $I = 0,7$  и числом экстремумов  $N_s = 100$ , используемая в дальнейших рассуждениях, показана на рис. 2.

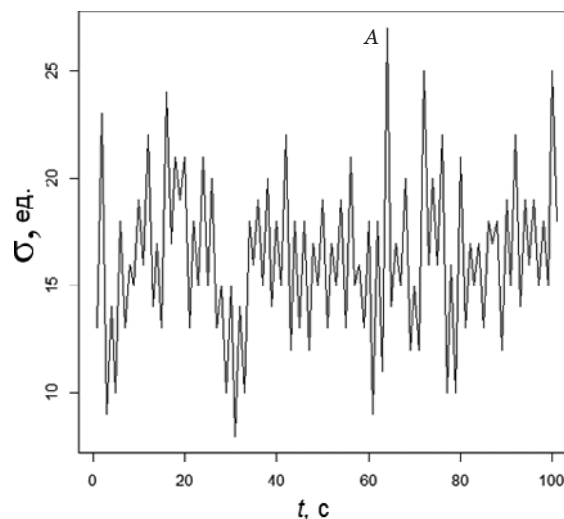
В целях проведения анализа псевдодискретный случайный процесс моделировался с избыточным числом дискретных точек. При дальнейшем проведении анализа избыточные точки отбрасывались в соответствии с задачей исследования.

При анализе влияния частоты дискретизации на точность интерес представляет точка максимума реализации  $\sigma_{\max} = 27$  ед. (точка А на рис. 2), которая должна быть надежно определена. Это связано с тем, что важнейшая характеристика спектра нагружения  $\sigma_{a \max}$  в соответствии с методом полных циклов (дождя) определяется как

$$\sigma_{a \max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2,$$

где  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  максимальное и минимальное значения напряжений в реализации.

При уменьшении частоты дискретизации увеличивается интервал квантования и точное определение координаты А становится невозможным. Из табл. 1 видно, что из-за недостаточной частоты дискретизации уменьшалось зафик-



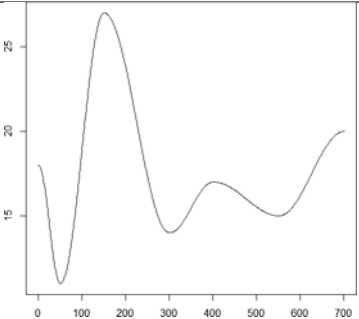
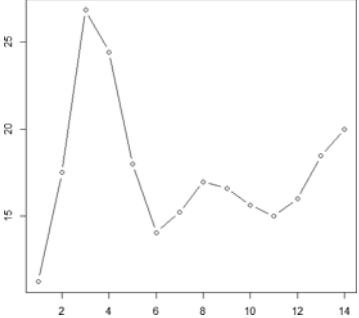
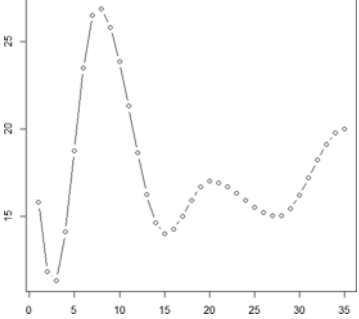
**Рис. 2.** Реализация с  $I = 0,7$  и числом экстремумов  $N_s = 100$

**Fig. 2.** Loading realization with  $I = 0.7$  ( $N_e = 100$ )

сированное значение максимума в точке А — с 27 до 26,86 и до 26,01 ед., в зависимости от интервала дискретизации. Такое уменьшение неизбежно приведет к неконсервативной ошибке при оценке долговечности. При этом также часть циклов может быть потеряна.

Для получения надежной оценки экстремальных напряжений при дискретизации по методу

**Таблица 1.** Погрешность определения  $\sigma_{\max}$  из-за недостаточной частоты дискретизации**Table 1.** The nature of  $\sigma_{\max}$  estimation error attributed to insufficient sampling frequency

| Дискретизированный процесс                                                                 | Поясняющий рисунок                                                                 | $\sigma_{\max}$ зафиксированное, ед. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Условно непрерывный                                                                        |   | 27                                   |
| С частотой дискретизации $f_{\text{Котельн}}$ , $K = 2$ в (2) (точки — дискретные отсчеты) |   | 26,01                                |
| С частотой дискретизации $2f_{\text{Котельн}}$ , $K = 4$ в (2)                             |  | 26,86                                |

равномерных координат разработана формула [16], позволяющая назначить  $\Delta t$  для того, чтобы надежно фиксировать экстремальные значения процесса и локальные экстремумы. В [17] содержится формула для оценки  $\Delta t$  с учетом скорости изменения процесса  $\sigma(t)$  и количества уровней квантования  $N$ :

$$\Delta t = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{N(d\sigma / dt)_{\max}}, \quad (3)$$

где  $(d\sigma/dt)_{\max}$  — максимальный градиент функции изменения напряжений.

На основе (3) и с применением теории ошибок, а также с использованием законов накопления усталостных повреждений в области многоциклового нагружения [17] получена формула для  $K$  в соотношении (2), позволяющая выбрать такое максимально допустимое  $\Delta t$ , чтобы не внести дополнительную ошибку в оценку ресурса за счет недостаточно подробной дискретизации.

При выводе формулы были сделаны предположения: 1) пик синусоиды может быть расположен ровно посередине между двумя отсчетами функции при дискретизации с интервалом  $\Delta t$ ; 2) колебание с максимальной частотой  $f_{\max}$  осуществляется с максимальной амплитудой  $\sigma_{a \max}$ . С этими допущениями соотношение для оценки  $K$  в формуле (2) для максимально допустимой частоты дискретизации выразим в виде

$$K \geq \frac{\pi}{\arccos[1 - \delta(\text{Re}) / m]}, \quad (4)$$

где  $\delta(\text{Re})$  — допустимая ошибка оценки ресурса (обычно принимается равной 10 – 20 %);  $m$  — коэффициент угла наклона кривой усталости [18].

Графически формула (4) представлена на рис. 3.

Необходимо отметить, что в силу предположений 1 и 2, принятых при выводе формулы (4), значение  $K$  может оказаться избыточным, так как не во всех случаях колебание с максимальной

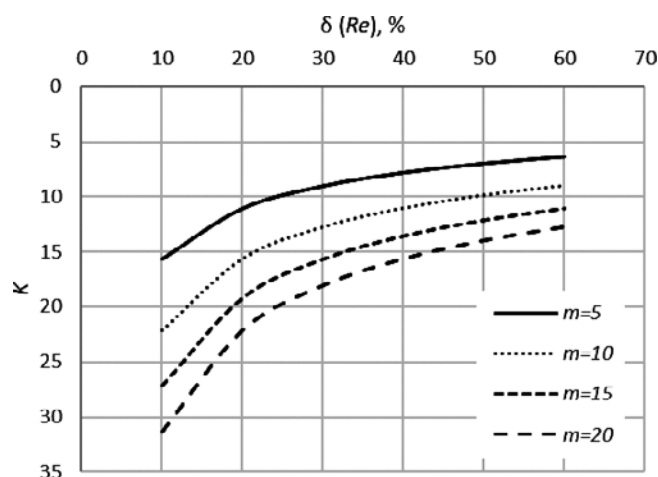


Рис. 3. График для определения необходимого  $K$  в формуле (2)

Fig. 3. Graph for determination of the sufficient  $K$  value in Eq. (2)

амплитудой происходит на максимальной частоте и не всегда локальный максимум находится ровно посередине между отсчетами. Тем не менее поскольку ошибка при определении  $\sigma_{a \max}$  только из-за недостаточной дискретизации не желательна, при обработке следует придерживаться соотношения (4).

Предполагая справедливость линейной гипотезы накопления повреждений Майнера, на модельном примере случайного процесса с  $I = 0,7$  провели анализ погрешности оценки ресурса по результатам схематизации по методу дождя. Результаты анализа представлены на рис. 4, где  $K$  — число отчетов на цикл по формуле (2);  $R$  — расчетная долговечность при условно бесконечной дискретизации (для целей анализа принято  $K = 100$ , избыточно). По результатам модельного примера видно, что  $K = 2$ , т.е. значение, которое соответствует теореме Котельникова, не является достаточным.

Для вышеописанной современной процедуры ЦОС минимальную частоту опроса возможно определять, задавая требуемую относительную точность оценки напряжений  $\sigma$ . Предполагая синусоидальную форму сигнала и учитывая то, что экстремум достигается не при максимальных скоростях изменения сигнала, а в экстремальных точках синусоиды, нетрудно определить минимальное количество точек на полупериод

$$n = \frac{\pi}{\sqrt{2}\sigma}. \quad (5)$$

Например, для  $\sigma = 0,005$  значение  $n = 32$  (округление ведется до целого числа, превышающего

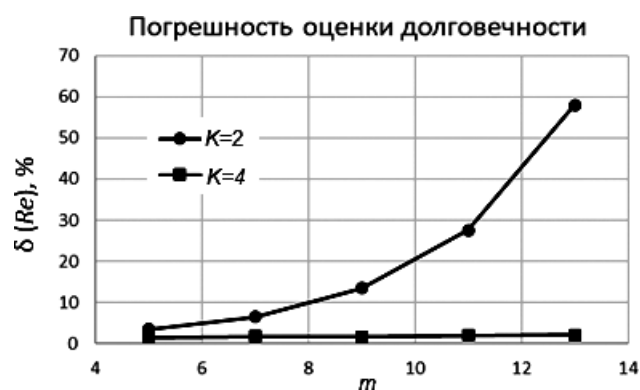


Рис. 4. Погрешность оценки долговечности из-за недостаточной частоты дискретизации ( $K$  — коэффициент в формуле (2),  $m$  — коэффициент угла наклона кривой усталости)

Fig. 4. The error of calculated durability due to insufficient discretization frequency ( $K$  — coefficient in Eq. (2),  $m$  — fatigue exponent)

$n$ ). Из этой формулы следует, что для частоты сигнала  $f$  максимальный интервал  $\Delta t$  равен:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{2}\sigma}{\pi f}. \quad (6)$$

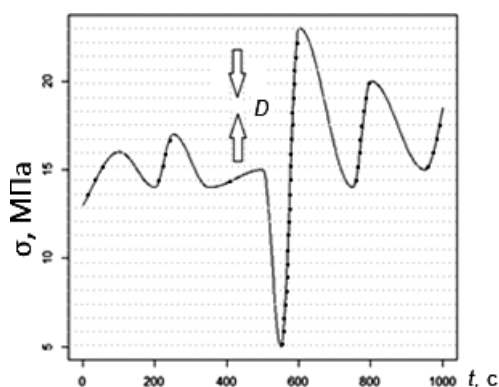
Обычно требуемую точность по напряжениям выбирают исходя из точности измерительной системы. Формулу (6) можно использовать и для решения обратной задачи: оценки максимальной ошибки при определении долговечности в тех случаях, когда известна амплитудно-частотная характеристика нагружения, но возможности аппаратуры не позволяют обеспечить требуемые интервалы по времени. Например, этот случай характерен для определения нагруженности по показаниям штатного бортового самописца на самолете, частота опроса у которого порядка 10 Гц.

Перед проведением схематизации по методу дождя из дискретного набора значений выделяются экстремумы. Так как эти результаты предназначены для последующей оценки долговечности, то используемая процедура не сводится к простому выделению максимумов и минимумов — из нее исключаются циклы с малым размахом. Величина этого размаха  $\Delta_{\text{noise}}$  выбирается как наибольшая из трех значений:

- уровня помех в измерительной системе;
- абсолютной точности измерительной системы;

- размаха напряжений, лежащих ниже предела выносливости или вносящих пренебрежимо малый вклад в общую усталостную повреждаемость.

Поясним алгоритм этого отбрасывания на примере максимума. Если после возрастания сигнала он уменьшился на значение, превышающее



**Рис. 5.** Дискретизация по пересечению уровней. Точки — это дискретные отсчеты в момент пересечения уровнем восходящей ветвью

**Fig. 5.** Sampling by level crossing. The points in the figure are discrete counts at the moment of level crossing with the ascending branch

$\Delta_{\text{noise}}$  — то точка, после которой началось уменьшение сигнала, считается максимумом и процедура переходит к определению минимума. В противоположном случае, если уменьшение сигнала сменилось его возрастанием до того как было достигнуто уменьшение на  $\Delta_{\text{noise}}$ , эта точка игнорируется и продолжается определение максимума.

Использование целочисленной арифметики в операции по выделению экстремумов позволяет ее существенно ускорить. Без потери точности ее можно осуществлять путем использования кодов, получаемых с АЦП и преобразованных в случае необходимости в целые числа. Использование целочисленной арифметики может быть применено и при схематизации по методу «дождя», но при этом алгоритм должен учитывать, что при нахождении амплитуды необходимо вычислять размах, который может выходить за пределы разрядной сетки целого числа.

Следует подчеркнуть, что в целях экономии памяти для таблицы полных циклов целесообразно использовать алгоритм, приведенный в [2], позволяющий в ряде случаев на порядки сократить требования к памяти. Кроме этого, сокращения требуемой памяти можно достичь, сохраняя исходные данные в двоичном виде. Например, при использовании 16-битного АЦП без потери

точности исходные данные и/или экстремумы в двоичном виде можно запоминать в виде двухбайтовых целых чисел. В символьном виде эти же данные требуют 6 байт на точку, так как двухбайтовые целые числа лежат в диапазоне  $(-32768, 32767)$ , т.е. требуют для своего запоминания минимум шесть однобайтовых символов.

Для узкополосных случайных процессов может быть использована также схематизация по методу экстремумов [6]. Для случайных процессов этого типа справедливо условие

$$x_{\max, i} > x_0 \cap x_{\min, i} < x_0, \quad i = 1, 2, \dots, N_3, \quad (7)$$

где  $x_0$  — средний уровень реализации;  $N_3$  — число экстремумов в реализации.

Условие (7) означает, что локальные максимумы процесса расположены выше среднего уровня нагрузки  $x_0$ , а локальные минимумы — ниже среднего уровня нагрузки  $x_0$ .

Наряду с дискретизацией по времени можно проводить дискретизацию по уровням [6]. При этом также появляется возможность перехода к целочисленной арифметике. Уровни, по сути, это коды, назначаемые непрерывному сигналу при операции квантования, которая наряду с дискретизацией входит в состав аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Квантование по уровню предполагает число уровней  $2n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Ранее при обработке применяли 8-разрядные и 16-разрядные АЦП ( $n = 4, 5$ ). В настоящее время степень  $n$  существенно увеличена и число уровней квантования достигает 1024 ( $n = 10$ ) и более. Согласно данному методу дискретизации, значения случайного процесса фиксируются в моменты пересечения процессом значений  $\sigma = \text{const}$ , соответствующих границам уровней квантования. Рис. 5 схематически поясняет процедуру дискретизации по уровням.

Здесь  $D$  — ширина квантования; точками обозначены пересечения верхних границ уровней восходящими ветвями процесса. Данный пример (см. рис. 5) показывает, что способ дискретизации по методу пересечений уровней позволяет надежно определить  $\sigma_{\min} = 5$  в данном модельном примере. Для гарантированного определения величины  $\sigma_{\min} = 5$  по методу дискретизации

**Таблица 2.** Время вычислений при разных методах дискретизации

**Table 2.** Computing time for two modes of discretization

| Коэффициент нерегулярности случайного процесса $I$ [15] | Время вычислений, потраченное на выделение 1000 экстремумов, с |                                          | Выигрыш, разы |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|
|                                                         | при дискретизации по методу случайных ординат                  | при дискретизации по пересечению уровней |               |
| 0,3                                                     | 18,79                                                          | 0,526                                    | 35,7          |
| 0,7                                                     | 23,34                                                          | 0,540                                    | 43,3          |
| 0,99                                                    | 26,07                                                          | 0,56                                     | 46,3          |

зации по времени потребовалось бы большее число цифровых отсчетов. Подсчет количества пересечений позволяет зафиксировать экстремумы с точностью, соответствующей разбиению на классы, а также сохранить их последовательность для последующей обработки.

## Обсуждение результатов

На примере модельных процессов показан выигрыш (до 40 раз) в быстродействии алгоритма дискретизации по пересечению уровней и применения целочисленной арифметики (табл. 2). Основным критерием оценки оптимальности методов является сходимость оценки долговечности при увеличенном быстродействии при оценке по линейной гипотезе накопления повреждений, поскольку конечной целью обработки случайных процессов нагружения является именно оценка долговечности.

Необходимо отметить еще одно преимущество метода пересечений. При его применении исследователи имеют дело с целочисленной арифметикой. Поскольку номера классов соответствуют целым числам, то значения дискретизированного процесса тоже целые:  $i_{cl} \in \mathbb{Z}$ . В связи с этим операция по выделению экстремумов существенно ускоряется. В табл. 2 для трех модельных псевдонепрерывных процессов, для каждого из которых число экстремумов в реализации  $N_s = 1000$ , показано время выделения экстремумов с применением двух методов дискретизации. Вычисления с применением целочисленной арифметики дают существенный выигрыш. Значения и последовательность выделенных экстремумов при обоих методах дискретизации совпадают, отличается лишь время вычислений.

Хотя погрешности регистрации электрического сигнала имеют аппаратную природу, предложенный в статье подход к фильтрации основывается на анализе цифровых отсчетов.

Расчеты и моделирование процессов осуществляли в свободно распространяемой программной среде вычислений *R* [19].

## Выводы

1. Получены формулы для оценки интервала дискретизации для обеспечения требуемой точности оценки максимальной амплитуды в блоке напряжений.

2. При выделении экстремумов по методу пересечений уровней и использовании при этом целочисленной арифметики достигается существенный выигрыш в быстродействии (до 40 раз для некоторых процессов) при сохранении точности определения локальных максимумов и их последовательности.

3. При наличии соответствующих технических решений в области цифровой обработки сигналов представляется возможным увеличить точность оценки долговечности не в последнюю очередь за счет увеличения длительности обрабатываемой реализации нагружения.

4. Цифровые методы обработки сигналов могут быть успешно применены к задаче отсеивания выбросов случайного сигнала.

## Благодарности

*Авторы выраают признательность партнеру проекта корпорации «Иркут».*

## Финансирование

*Исследование финансировано Министерством образования и науки Российской Федерации по соглашению № RFMEFI62518X0044.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н. А., Гаденин М. М. Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области машиноведения с использованием критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 10. С. 41 – 52.
2. Свирский Ю. А., Стерлин А. Я. Метод компактной регистрации напряжений при ресурсных испытаниях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 4. С. 64 – 65.
3. Georgievskaja E. Justification of the hydraulic turbines lifetime from the standpoint of the fracture mechanics. Full bibliographic details / Procedia Structural Integrity. 2018. P. 971 – 975. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.181.
4. Адлер Ю. П., Гадолина И. В., Ляндрес М. Н. Бутстреп-моделирование при построении доверительных интервалов по цензурированным выборкам / Заводская лаборатория. 1987. Т. 53. № 10. С. 90 – 94.
5. Гадолина И. В., Грызлова Т. П., Дубин Д. А., Петрова И. М., Филимонова Н. И. Исследование нагруженности транспортных машин во временной и частотной области / Сборник трудов 4-й Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. Живучесть и конструкционное материаловедение ЖивКоМ. — М.: ИМАШ РАН, 2018. С. 84 – 86.
6. ГОСТ 25.101–83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — М.: Стандартинформ, 2005. — 25 с.
7. Dirlík T. Application of Computers in Fatigue Analysis. PhD thesis. — The University of Warwick, 1985.
8. Описание изобретения к авторскому свидетельству 1322161. Устройство для определения экстремумов электрического сигнала. Ин-т технической теплотехники НАН Украины. — Киев, 1986.
9. Никольский Л. Н., Коцубенко В. П., Игнатенко Ю. В. Применение классифицирующих устройств типа KLA-2 для исследования нагруженности рам вагонных тележек. — В сб.: Вопросы исследования надежности и динамики. — Брянск. Приокское книжное издательство, 1974. С. 5 – 11.
10. Gadolina I., Zaynetdinov R. The estimation of the sufficient random loading realization length in the problem of machine parts longevity / Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, “DESSERT”. 2018. P. 159 – 162. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409119.

11. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 152 с.
12. Yung-Li Lee at al. Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice). — Amsterdam: Elsevier, 2005. — 417 p.
13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 540 с.
14. Гадолина И. В., Петрова И. М., Шашкова Е. В., Беневоленская Е. М. Анализ нагруженности и составление обобщенного спектра нагружения для оценки долговечности боковой рамы тележки / Живучесть и Конструкционное материаловедение. Труды конференции. Т. 1. — Москва, 2012. С. 67 – 72.
15. Фишер Р., Хайбах Э. Моделирование функций нагружения в опытах по оценке материалов. — В кн. Поведение стали при циклических нагрузках / Под ред. В. Даля; пер. с нем. — М.: Металлургия, 1983. С. 368 – 405.
16. Гадолина И. В. Оценка погрешности дискретизации процесса нагружения и ее влияние на расчетный ресурс / Труды IX научной конференции молодых ученых ИМАШ РАН. 1982. Деп. № 4787-83 С. 150 – 154.
17. Гитис Э. И. Преобразование информации для электронных цифровых устройств. — М.: Энергия, 1975. — 240 с.
18. Кобаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. — М.: Машиностроение, 1993. — 364 с.
19. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. — Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017; <https://www.R-project.org>
6. Interstate Standard GOST 25.101–83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results. — Moscow: Standartinform, 2005. — 25 p. [in Russian].
7. Dirlik T. Application of Computers in Fatigue Analysis. PhD thesis. — The University of Warwick, 1985.
8. Description of the invention to the copyright certificate 1322161. A device for determining the extrema of the electrical signal. — Kiev: Institute of technical heat engineering of the NAS of Ukraine, 1986 [in Russian].
9. Nikolskiy L. N., Kochubenko V. P., Ignatenko Yu. V. Application of classifying devices such as KLA-2 to study the loading of the frames of carts / Questions of reliability and dynamics research. — Bryansk: Priokskoe Knizh. Izd., 1974. P. 5 – 11 [in Russian].
10. Gadolina I., Zaynetdinov R. The estimation of the sufficient random loading realization length in the problem of machine parts longevity / Proceedings of 2018 IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, “DESSERT”. 2018. P. 159 – 162. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409119.
11. Kotelnikov V. A. Theory of Potential Noise Immunity. — Moscow: Gosenergoizdat, 1956. — 152 p [in Russian].
12. Yung-Li Lee at al. Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice). — Amsterdam: Elsevier, 2005. — 417 p.
13. Bendat J., Pirsol A. Applied analysis of random data. — Moscow: Mir, 1989. — 540 p. [in Russian].
14. Gadolina I. V., Petrova I. M., Shashkova E. V., Benevolenskaya E. M. Load analysis and compilation of a generalized load spectrum to assess the durability of the trolley side frame / Proc. of the conference “Survivability and Structural material science”. Vol. 1. — Moscow, 2012. P. 67 – 72 [in Russian].
15. Fisher R., Khaibajh E. Modeling functions loading in experiments on the evaluation of materials / In: “Behavior of steel under cyclic loads” // Dahl V., ed. — Moscow: Metallurgiya. 1983. P. 368 – 405 [in Russian].
16. Gadolina I. V. Estimation of the error of discretization of the loading process and its influence on the design resource / Proc. of the IX scientific conference of young scientists IMASH RAS. 1982. Dep. N 4787-83 P. 150 – 154 [in Russian].
17. Gitis É. I. Conversion of information for electronic digital devices. — Moscow: Énergiya, 1975. — 240 p. [in Russian].
18. Kogaev V. P. Strength calculations at stresses variable in time. — Moscow: Mashinostroenie, 1993. — 364 p. [in Russian].
19. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. — Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017; <https://www.R-project.org>

## REFERENCES