

УДК 677.017.2/.7
DOI 10.47367/0021-3497_2022_4_37

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ АКТИВНОГО ЗАЖИМА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЯ РАЗРЫВА ВОЛОКНА
НА МАШИНЕ КОПРОВОГО ТИПА**

**THE IMPROVEMENT OF THE METHOD
OF THE ANGULAR ACCELERATION ACTIVE CLAMP
CALCULATION FOR THE DETERMINATION OF THE FORCE
OF FIBER BREAKING ON THE COPRA TYPE MACHINE**

А.В. ОРЛОВ, Е.Л. ПАШИН

A.V. ORLOV, E.L. PASHIN

(Костромской государственной университет,
Костромская государственная сельскохозяйственная академия)

(Kostroma State University,
Kostroma State Agricultural Academy)

E-mail: aorlov@list.ru; evgpashin@yandex.ru

В статье обоснован алгоритм обработки "шумовых составляющих" исходных сигналов и кинематических характеристик, необходимых для расчета разрывной нагрузки волокна, испытываемого на новой машине копрОВОГО типа. Для исключения случайных искажений анализируемой полезной составляющей углового ускорения целесообразно использовать сочетание методов предварительного подавления "зашумленных" сигналов и численного дифференцирования на результатах, полученных посредством симуляции процесса разрыва волокон. Установлены рациональные варианты обработки сигналов: при дифференцировании - метод П. Голобородько при размере окна дифференцирования $N = 7$; при сглаживании - метод простого скользящего среднего с размером окна $M = 3$. При таких вариантах ошибка в определении экстремума ускорения не превышает 3,5%, а уровень разброса его значений, характеризующих "зашумление" - не более 0,5%.

The article substantiates the algorithm for processing the "noise components" of the original signals and kinematic characteristics necessary to calculate the breaking load of the fiber tested on a new pile type machine. To eliminate random distortions of the analyzed useful component of the angular acceleration, it is advisable to use a combination of methods for preliminary suppression of "noisy" signals

and numerical differentiation on the results obtained by simulating the process of breaking fibers. The following rational options for signal processing are established: while differentiating - the method of P. Goloborodko with a differentiation window size $N = 7$; while smoothing - the simple moving average method with a window size of $M=3$. With such options, the error in determining the acceleration extremum does not exceed 3.5%, and the level of spread of its values characterizing "noise" is not more than 0.5%.

Ключевые слова: волокно, разрыв, машина копрового типа, разрывное усилие, сигнал, случайные изменения сигналов, метод дифференцирования, метод сглаживания.

Keywords: fiber, breaking, punching machine, breaking force, signal, random signal changes, differentiation method, smoothing method.

Для функционирования разрывной машины копрового типа при определении разрывной нагрузки $P_{\text{разр}}$ требуется знание угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}(t)$ зажима, установленного на перемещающемся маятнике [1].

Расчет этих кинематических характеристик производят на основе анализа изменяющихся во времени угловых координат, фиксируемых специальным датчиком (энкодером). Однако их значения могут быть "зашумлены" случайными влияниями факторов, обусловленными особенностями конструкции машины, податливостью ее рабочих органов и, особенно, в узлах подвеса и самого маятника [2]. Причиной таких влияний могут быть также неравномерно действующие силы трения разной природы и изменяющиеся по величине потери энергии маятника через станину машины, погрешности, вносимые энкодером [3], а также методикой регистрации угловых координат с использованием ЭВМ (аппаратные ошибки).

Полностью исключить влияние указанных факторов практически невозможно. Поэтому требуется минимизация проявления случайных факторов путем разработки и использования алгоритма расчета указанных выше кинематических характеристик перемещения активного зажима разрывной машины.

Как известно [1], величина разрывного усилия определяется значением максимального отрицательного углового ускорения $\ddot{\varphi}(t)$, получаемого, как производная при двойном дифференцировании значений угловой координаты маятника $\varphi(t)$ и угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$. Поэтому точность определения разрывного усилия будет определяться снижением погрешности углового ускорения $\ddot{\varphi}(t)$.

Значение искомого ускорения в момент времени t_1 , определяется суммой детерминированной функции ξt и случайной компоненты ε_t . Допустим, что ε_t подчиняется закону нормального распределения и соответствует условию гомоскедастичности и отсутствия автокорреляции [4]. Заметим, что приемы обработки сигналов, способные уменьшить случайные отклонения, могут исказить величину ξt и поэтому выбор этих приемов должен быть рациональным и оцениваться с использованием специальных критериев.

В нашем случае важнейшим критерием при обосновании алгоритма расчета $P_{\text{разр}}$ является минимизация занижения ее значения, например, вследствие сглаживания функций указанных кинематических величин. Сутью этого критерия может быть абсолютное или относительное расхождение между найденной и ожидаемой величиной максимального (по модулю) углового ускорения.

Очевидно, что величина погрешности при вычислении углового ускорения маятника будет зависеть от уровня исходного

шума, усиленного процедурой дифференцирования. Степень такого усиления будет зависеть от приема дифференцирования. Применительно к нашему случаю, когда функция угловых координат $\varphi(t)$ изначально задается табличным способом, то для нахождения $\dot{\varphi}(t)$ и $\ddot{\varphi}(t)$ рекомендуется использовать методы численного дифференцирования [5]. В этом случае общая погрешность вычисления производной может рассматриваться как сумма погрешностей округления и усечения, определяемой величиной отбрасываемого остаточного члена интерполяционной формулы. Погрешность округления у формул численного дифференцирования обратно пропорциональна h^m , где h – шаг численного дифференцирования (m – порядок производной). Она увеличивается с ростом порядка производной функции и с уменьшением шага h численного дифференцирования. Погрешность же усечения при таких условиях – убывает. Поэтому при численном дифференцировании стараются выбрать оптимальный шаг расчета в окрестностях точки (для которой определяется значение производной) – окна дифференцирования N . Как правило, N должно быть нечетным числом, большим или равным 3. Чрезмерно большие значения N увеличивают время работы алгоритма, а также увеличивают потери данных в начале и конце дифференцируемого участка. В то же время слишком малые значения N увеличивают чувствительность алгоритма к шумам иной природы. Из этого следует желательность сглаживания кратковременных (порядка 2...3 отсчетов) выбросов анализируемых величин. С учетом сказанного для исследования были выбраны значения окон $N=5, 7, 9, 11, 13$.

Были рассмотрены два метода численного дифференцирования: классический метод конечных разностей (далее КР) [6] и метод, предложенный П. Голобородько (далее Г) [7], [8]. Оба метода основаны на аппроксимации участка дифференцируемой функции полиномом, но используют разные алгоритмы расчета коэффициентов этого полинома.

Для минимизации шума, присутствующего

в массиве значений угловой скорости, в ходе расчета углового ускорения предложено использовать приемы сглаживания сигнала при условии, что относительное расхождение между фактической и ожидаемой (расчетной) величиной экстремума ускорения не будет превышать 3...5%.

Анализ приемов обработки данных путем сглаживания для решения подобных задач выявил методы "скользящих средних" [9]. Наиболее распространенными из них являются метод "простой скользящей средней" (SMA) и "экспоненциально взвешенной скользящей средней" (EWMA) [10].

При использовании SMA в условиях нестационарности исследуемого процесса целесообразно использовать усреднение более низких порядков, как способное быстро реагировать на изменения составляющей ξt . В случае применения метода EWMA величину, необходимую для расчетов, постоянной сглаживания рекомендовано выбирать на основе условия минимального влияния при сглаживании на изменение ξt , согласно общепринятым рекомендациям [10].

Таким образом, при выборе условий, связанных с расчетом $P_{\text{разр}}$, использовали два параметра: для процедуры дифференцирования – размер окна дифференцирования N (5, 7, 9, 11, 13); для процедуры сглаживания по методу SMA – число наблюдений M , по которому считается скользящая средняя (1(без сглаживания), 3, 5, 7, 9, 11, 13), а для метода EWMA – величина постоянной сглаживания α (0,5...0,9). В итоге для оценки приемов дифференцирования приняли следующие варианты: метод конечных разностей (КР) при величине окна $N = 3 - \text{КР3}; N = 5 - \text{КР5}; N = 7 - \text{КР7}; N = 9 - \text{КР9}; N = 11 - \text{КР11}; N = 13 - \text{КР13}$; метод Голобородько (Г) при величине окна $N = 5 - \text{Г5}; \text{при } N = 7 - \text{Г7}; N = 9 - \text{Г9}; N = 11 - \text{Г11}; K=13 - \text{Г13}$. Для сглаживания данных: метод SMA по 3 точкам – SMA3, по 5 точкам – SMA5; по 7 точкам – SMA7; по 9 точкам – SMA9; по 11 точкам – SMA11; метод EWMA при постоянной сглаживания $\alpha = 0,5 - \text{EWMA0,5}; \text{при } \alpha = 0,6 - \text{EWMA0,6}; \text{при } \alpha = 0,7 - \text{EWMA0,7}; \alpha = 0,8 - \text{EWMA0,8}; \alpha = 0,9 - \text{EWMA0,9}$.

Важным условием использования указанных вариантов обработки данных при оценке их эффективности является обеспечение идентичности условий работы вычислительных алгоритмов. Такое возможно только при использовании истинных характеристик испытуемых образцов. Однако обеспечить эти условия путем использования реальных экспериментальных данных, имеющих варьирование вследствие неоднородности свойств, характерных для волокнистых материалов, представляется сложной и трудно реализуемой задачей.

Поэтому предложили использовать исходные данные, полученные как результаты симуляции процесса разрыва волокнистого образца, используя метод [11]. Такой подход исключает указанные недостатки и позволяет получить эталонные законы изменения угловой координаты $\varphi(t)$ и угловой скорости $\dot{\varphi}(t)$.

Для осуществления симуляции процесса разрыва волокон были выбраны следующие их свойства и параметры разрывной машины: угол зарядки маятника ($\varphi_0 = 62^\circ$; масса маятника $m = 2,78$ кг; момент инерции маятника $I = 0,104$ Н·м²; расстояние от оси подвеса до центра масс $r = 175$ мм; расстояние от оси подвеса до зажима с образцом $R = 58$ мм; число элементарных волокон в образце $n = 300$; упругость элементарных волокон Y с математическим ожиданием $\mu_y = 300$ Н/м и средним квадратическим отклонением $\sigma_y = 80$ Н/м; вязкость волокон B с $\mu_B = 0,1$ Н/м² и $\sigma_B = 0,01$ Н/м²; слабина волокон СЛ с $\mu_{сл} = 3$ мм и $\sigma_{сл} = 1$ мм; предельная деформация волокон ϵ с $\mu_\epsilon = 3$ мм и $\sigma_\epsilon = 1$ мм. При этом полагали, что Y , B , СЛ и ϵ подчиняются закону нормального распределения.

Для получения исходного зашумленного сигнала использовали следующий прием. Был зарегистрирован холостой ход реальной разрывной машины, в частности, интервалы времени Δt_{i1} между последовательными сигналами датчика угловых координат. Затем для каждого Δt_{i1} было вычислено значение $\Delta t'_{i1} = \Delta t_{i1} - 0,5(\Delta t_{i-1} + \Delta t_{i+1})$. Это значение было принято за величину исходной шумовой составляющей, суммируе-

мой с временным шагом, вычисленным в ходе симуляции.

Обработку полученных при симуляции данных производили с использованием двух критериев, связанных с точностью определения углового ускорения. Один из них (критерий А) определял относительное изменение максимально отрицательного значения углового ускорения, фиксируемого в момент разрыва пучка волокон. Второй критерий (Б) характеризовал средний уровень разброса (уровень шума) значения углового ускорения.

Применительно ко всем сочетаниям указанных выше вариантов дифференцирования и сглаживания (всего 110 вариантов) были рассчитаны значения угловых ускорений на основе указанной методики симуляции движения маятника и разрыва волокон. После этого для каждого варианта рассчитали значения критериев А и Б. Для обеспечения их сравнимости провели процедуру нормализации их величин. Полученные данные представлены графически на рис. 1.

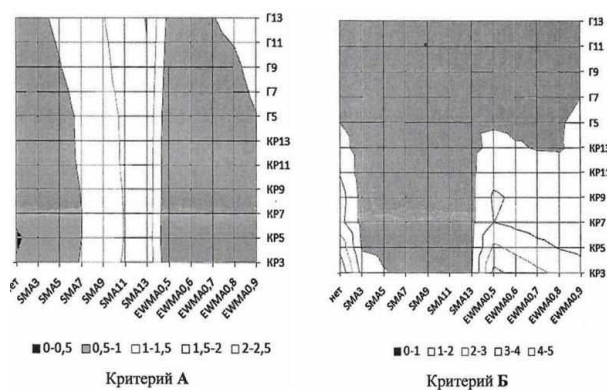


Рис. 1

Для выявления наилучших условий обработки данных с учетом одновременного изменения критериев А и Б провели произведение их полученных массивов, получив обобщенный критерий АБ (рис. 2). Анализ областей с наилучшими (минимальными) значениями результатами обобщенного критерия АБ выявил следующее. В границах этих областей существуют варианты дифференцирования и сглаживания, при которых обеспечивается относительное изменение экстремального значения ускорения не более 3,5%. При этом величина сред-

него разброса значений ускорения при определенных сочетаниях исследуемых вариантов может не превышать 0,5%. Такие результаты формируются при дифференцировании данных по методу Голобородько с величиной окна $N = 7$, а также при использовании при сглаживании данных метода "простой скользящей средней" (SMA) по трем точкам.

В табл. 1 представлено сравнение вариантов дифференцирования и сглаживания в наилучшей зоне формирования обобщенного критерия АБ.

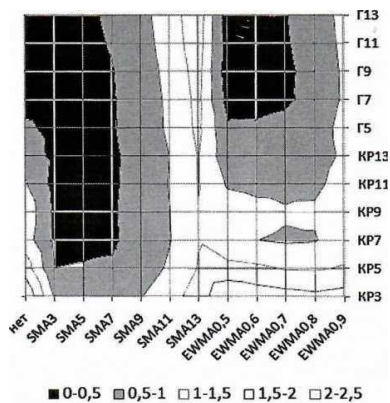


Рис. 2

Таблица 1

Абсолютные значения параметров данных при лучших вариантах дифференцирования и сглаживания			
Ошибка в определении экстремума ускорения, %		Уровень "шума", ед.	
	SMA3		SMA3
КР3	2,5	КР3	1,8
КР5	2,4	КР5	1,0
КР7	2,4	КР7	0,8
КР9	2,5	КР9	0,8
КР11	2,7	КР11	0,6
КР13	2,9	КР13	0,6
Г5	2,9	Г5	0,6
Г7	3,3	Г7	0,4
Г9	3,5	Г9	0,3
Г11	3,7	Г11	0,3
Г13	4,0	Г13	0,3

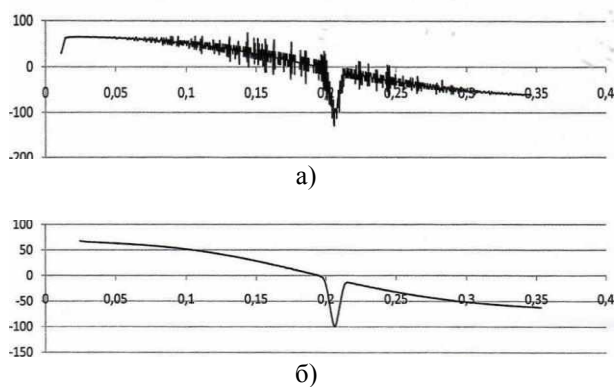


Рис. 3

Для наглядности достижения условий эффективности обработки сигналов посредством симуляции при расчете углового ускорения по выявленным вариантам на рис. 3 представлена графическая зависимость изменения $\ddot{\phi}(t)$ при минимальном исключении проявления случайных факторов (рис. 3-а – изменение $\ddot{\phi}(t)$ при использовании численного дифференцирования

при использовании метода КР3, без сглаживания) в сравнении с данными по этой же кинематической характеристике, но полученной по результатам выявленных рациональных вариантов дифференцирования и сглаживания (рис. 3-б – изменение $\ddot{\phi}(t)$ при использовании выявленных вариантов дифференцирования и сглаживания).

Как следует из графиков, использование выбранного сочетания методик дифференцирования и сглаживания обеспечивает существенное подавление шумовой составляющей ϵ_t . В то же время общая форма графика и величина пика ускорения изменяется незначительно. Достижение таких условий позволяет определять величину экстремума ξ_t , а также моменты начала и окончания формирования этого экстремума. Это позволяет обеспечить необходимый расчет таких характеристик, как разрывная нагрузка и величина деформации (с учетом ее составляющих при разрыве) испытываемого материала.

ВЫВОДЫ

1. Присутствие трудно устранимых случайных факторов работы разрывной машины копрового типа [1] вносит в искомые величины угловой скорости и ускорения активного зажима шумовую составляющую, что требует использования алгоритмов ее подавления.

2. Для исключения случайных искажений анализируемой полезной составляющей углового ускорения целесообразно использовать сочетание методов предварительного подавления "зашумленных" сигналов и численного дифференцирования. При этом оценку эффективности их использования осуществлять на результатах, полученных посредством симуляции процесса разрыва волокон.

3. Наилучшим сочетанием вариантов обработки сигналов является использование при дифференцировании метода П. Голлородко при размере окна дифференцирования $N = 7$, а при сглаживании – метода простого скользящего среднего с размером окна $M = 3$. При таких вариантах ошибка в определении экстремума ускорения не превышает 3,5%, а уровень разброса его значений, характеризующих "зашумление" – не более 0,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашин Е. Л., Орлов А. В. Инструментальная система контроля разрывных характеристик льняного волокна // *Материалы и технологии*. – 2018, №2. С. 18...21.
2. Голубков В. С., Пирогов К.М., Смущкович Б.Л. Испытательные машины в текстильном материаловедении. – М.: Легпромбытиздат, 1988.
3. ОАО "СКБ ИС", С-П, каталог продукции [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/iir-158a>, (дата обращения 21.05.2020 г).
4. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003.
5. Калашников А. Л., Федоткин А.М., Фокина В.Н. Методические указания к решению задач по численному дифференцированию М-54. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т, 2016.
6. Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Персова М. Г. Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2007.
7. Численное дифференцирование зашумленных данных или функций [Электронный ресурс]. Ре-

жим доступа: <http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods/numerical-derivative/smooth-low-noise-differentiators/>, (дата обращения 21.05.2020 г).

8. Savitzky, A.; Golay, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. – 36 (8). 1964. P.1627...1639.
9. Chatfield C. The Analysis of Time Series. An introduction. – Chapman & Hall/CRC, 1995. P. 13.
10. Gardner E.S. Exponential smoothing: the state of the art // *Journal of Forecasting*. – 1985. №4. P. 1...28.
11. Орлов А.В., Пашин Е.Л. Моделирование процесса одноосного разрыва совокупности волокон с учетом их свойств на машине копрового типа // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2021, №4. С. 60...65.

REFERENCES

1. Pashin E. L., Orlov A. V. Instrumental system for monitoring the discontinuous characteristics of flax fiber // *Materials and technologies*. – 2018, № 2. S.18...21.
2. Golubkov V.S., Pirogov K.M., Smushkovich B.L. Testing machines in textile materials science. – M.: Legprombytizdat, 1988.
3. JSC "SKB IS", S-P, product catalog [Electronic resource]. Access mode: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/iir-158a>, (accessed 21.05.2020 G).
4. Lukashin Yu. P. Adaptive methods of short-term forecasting of time series. - M.: Finance and statistics, 2003.
5. Kalashnikov A.L., Fedotkin A.M., Fokina V.N. Guidelines for solving problems on numerical differentiation M-54. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State. un-t, 2016.
6. Yu. G. Soloveichik, M. E. Royak, and M. G. Persova, Finite Element Method for Scalar and Vector Problems. - Novosibirsk: Novosib. state tech. un-t, 2007.
7. Numerical differentiation of noisy data or functions [Electronic resource]. Access mode: <http://www.holoborodko.com/pavel/numerical-methods/numerical-derivative/smooth-low-noise-differentiators/>, (Accessed 05/21/2020).
8. Savitzky, A.; Golay, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // *Analytical Chemistry*. – 36 (8). 1964. P.1627...1639.
9. Chatfield C. The Analysis of Time Series. Introduction. – Chapman & Hall/CRC, 1995. P. 13.
10. Gardner E.S. Exponential smoothing: the state of the art // *Journal of Forecasting*. – 1985. №. 4. P.1...28.
11. Orlov A.V., Pashin E.L. Simulation of the process of uniaxial rupture of a set of fibers, taking into account their properties on a pile-type machine // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2021, №4. P. 60...65.

Рекомендована кафедрой механических систем в АПК Костромской ГСХА. Поступила 30.03.22.