

Научная статья
УДК 677.02.002.56

EDN NXUTTY

doi 10.34216/2587-6147-2022-2-56-24-28

Александр Валерьевич Орлов¹

Евгений Львович Пашин²

¹Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кострома, Россия

¹aorlov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4995-3393>

²evgpashin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5871-874X>

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ КОПРОВОГО ТИПА

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы совершенствования процесса работы разрывной машины К-1 на основе моделирования хода маятника с активным зажимом образца. Исследованы особенности регистрации координат движения маятника с помощью инкрементального энкодера, а также ограничения на обработку исходных данных, необходимых для расчетов при моделировании процесса движения. Обоснованы рекомендации по корректной оценке угловых координат путем периодического отслеживания текущего положения оси маятника. Предложен вариант, основанный на фиксации интервалов времени, прошедших между сигналами энкодера. На данной основе разработан методика моделирования движения маятника, позволяющая максимально приблизить расчетные результаты к экспериментальным данным. В итоге спроектирована и создана программная система для моделирования. Установлена высокая степень соответствия между моделью и фактическим поведением маятника. Полученные результаты предлагается использовать при создании расчетного метода поверки метрологических параметров, связанных с маятником машины К-1.

Ключевые слова: разрыв волокон, разрывное усилие, машина копрового типа, маятник, энкодер, угловые координаты, моделирование

Для цитирования: Орлов А. В., Пашин Е. Л. Совершенствование алгоритма моделирования работы разрывной машины копрового типа // Технологии и качество. 2022. № 2(56). С. 24–28. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-24-28>.

Original article

Alexander V. Orlov¹,

Evgeniy L. Pashin²

¹Kostroma State University, Kostroma, Russia

²Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

IMPROVING THE SIMULATION ALGORITHM FOR THE WORK PROCESS OF PENDULUM-BASED TENSILE STRENGTH TESTING MACHINE

Abstract. Article considers approaches to improve the functioning of tensile strength testing machine K-1, based on modelling the mechanical and informational processes of its operation. The pendulum movement registration process is analysed in detail, resulting in a set of restrictions imposed on data processing methods used during simulation. Based on this, a set of recommendations is developed, regarding the correct way to track pendulum's motion. It is suggested to register intervals between consecutive encoder pulses, rather than independently poll encoder's current position using a timer. Based on this idea, a simulation algorithm is developed that allows for a close reproduction of the properties of the data gathered during experiment. This algorithm is implemented in a software system. The data produced by this system closely resembles the data gathered during experiments with a real device. As such, the model and the algorithm can be used to develop a quality control system for the K-1 machine.

Keywords: fibre split, tensile strength, pendulum-base testing machine, pendulum, incremental encoder, angular coordinates, simulation

For citation: Orlov A. V., Pashin E. L. Improving the simulation algorithm for the work process of pendulum-based tensile strength testing machine. *Technologies & Quality*. 2022. Nr 2(56). P. 24–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-2-56-24-28>.

Для обеспечения сходства условий испытания на разрыв лубяных волокон при их стандартизации с реальными видами их нагружения, имеющими место в процессах переработки и эксплуатации, была создана новая разрывная машина копрового типа – К-1. Ее особенностями являются повышенная скорость деформирования волокон при одноосном разрыве, а также определение разрывного усилия волокна на основе контроля углового ускорения рабочего органа (маятника) с активным зажимом образца [1].

Контроль движения маятника предложено осуществлять на основе математической обработки угловых координат с применением датчика угловых перемещений (инкрементального энкодера).

Однако для реализации этапов математической обработки поступающих от энкодера сигналов возникла проблема зависимости применяемых алгоритмов от особенностей данных, получаемых в процессе разрушения испытываемого образца. Для разрешения указанной проблемы возникла необходимость в моделировании процесса взаимодействия маятника разрывной машины с образцом в процессе его натяжения и разрушения. Результаты моделирования будут использованы для разработки эффективного алгоритма обработки исходных данных, используемых для определения разрывной нагрузки. Это является целью исследований.

Основной задачей инкрементального энкодера, как основного измерительного элемента машины К-1, является регистрация угла поворота вала, на котором закреплен маятник с активным зажимом. Для реализации процесса измерения требуется отследить движение маятника,

в частности его угловую скорость $\dot{\varphi}$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}$. Это позволяет оценить величину нагрузок, вносимых испытываемым образцом при его растяжении и зависящих от его механических свойств.

Однако поступающие с энкодера сигналы позволяют лишь фиксировать угол поворота вала относительно начального положения с заданным шагом $\Delta\varphi$, а также момент, когда вал повернется на угол $\Delta\varphi$ относительно предыдущего зафиксированного положения. Это является следствием принципа действия инкрементальных энкодеров [2]. При таких условиях становится возможным отслеживать положение вала, контролируя напряжение на выходах энкодера с помощью микроконтроллера с поддержкой прерываний, например семейства AVR [3]. Связав вызов прерывания с перепадом напряжения на выходах энкодера, можно изменять значение переменной-счетчика параллельно движению вала. Важно заметить, что такой метод будет работоспособен до тех пор, пока временной интервал между сигналами энкодера превышает время реакции на прерывание. Например, в качестве грубой верхней оценки допустимой частоты сигналов энкодера можно принять 1 % от тактовой частоты используемого микроконтроллера.

Следует отметить, что в таких условиях для определения закономерностей движения вала требуется организовывать индивидуальные измерения в серию. При этом серия измерений может быть синхронизирована по времени (рис. 1а) или по сигналам энкодера (рис. 1б).

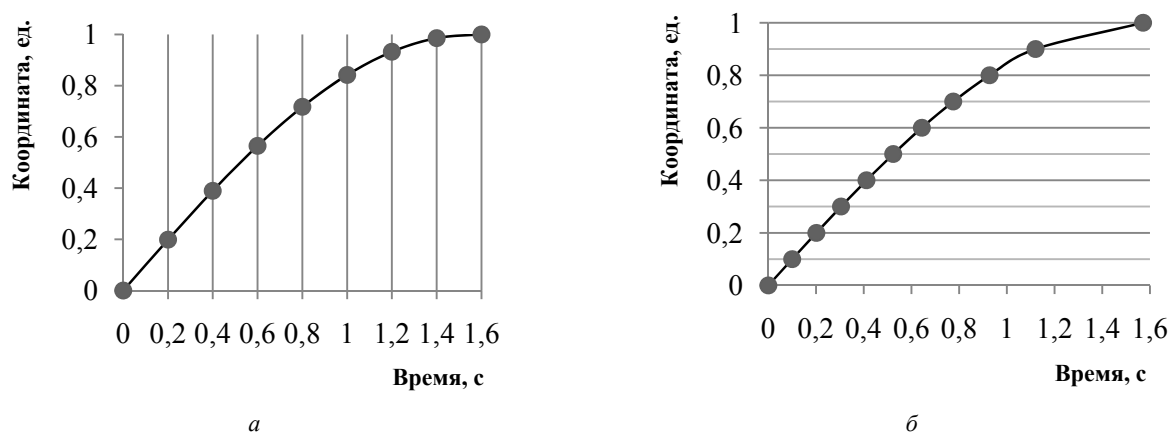


Рис. 1. Схематичное представление значений угловых координат, полученных при синхронизации по времени (а) и по сигналам (б)

Тем не менее построение серии измерений, синхронизированных по времени, сопряжено с рядом рисков, значительно повышающих требования к параметрам считывающего устройства, например микроконтроллера. Алгоритм отслеживания положения вала энкодера может конфликтовать с алгоритмом регистрации движения вала во времени. Такого рода ошибки трудно предсказуемы, а их корректное предотвращение повышает требования к частоте работы используемого микроконтроллера.

При построении серии измерений, синхронизированных по сигналу, регистрация положения вала энкодера происходит в тот момент, когда приходит очередной сигнал о его изменении. Такой подход позволяет регистрировать время прихода сигнала со значительно большей точностью. Еще одной полезной особенностью такого подхода является то, что при большей скорости вращения вала регистрация будет автоматически происходить с большей частотой. Это позволит достигнуть большего уровня детализации скоростных участков траектории маятника без увеличения объема памяти, необходимого для хранения данных, полученных на более медленных участках перемещения.

Указанные подходы позволяют получить табличное представление некоторой функции $\varphi(t)$, описывающей изменение угловой координаты маятника. Для получения сведений об угловой скорости потребуется произвести численное дифференцирование этой функции. Однако большинство методов численного дифференцирования построены на основе допущения о равномерности временных отсчетов дифференцируемой функции. Очевидно, что попытка применить эти методы к аperiодическим сериям, получаемым при синхронизации по сигналу, приведет к увеличению погрешности вычислений. Таким образом, появляется необходимость в учете неравномерности этих временных отсчетов.

В связи с этим возникает ряд сложностей при численном моделировании вышеописанных операций. Классический подход при математическом описании физических процессов подразумевает использование фиксированного временного шага, продолжительность которого значительно меньше продолжительности рассматриваемых процессов [4]. В нашем случае такой вариант неприменим. Вместо этого временной шаг при моделировании исследуемой системы следует определять динамически, в зависимости от скорости изменения ее состояния.

Примем в качестве состояния системы следующий набор величин: угловую координату

φ , угловую скорость $\dot{\varphi}$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}$. Если шаг Δt энкодера достаточно мал, можно считать вращение вала с маятником на этом интервале равноускоренным. Из этого предположения можно вывести выражение, связывающее состояние системы с временным шагом Δt :

$$\frac{\ddot{\varphi}\Delta t^2}{2} + \dot{\varphi}\Delta t - \Delta\varphi = 0. \quad (1)$$

Если выражение (1) имеет два корня, то наименьший положительный из них будет искомым значением Δt . При отсутствии таких корней маятник находится в высшей точке своей траектории и не достигнет следующего деления энкодера. В этом случае необходимо рассчитывать движение в обратном направлении, что достигается сменой знака перед $\Delta\varphi$.

Помимо Δt , также требуется определить величину $\dot{\varphi}$ на следующей итерации. Ее возможно вычислить, используя основное уравнение динамики вращательного движения. Для нашей задачи это уравнение будет иметь следующий вид:

$$\ddot{\varphi}I = -mg \sin \varphi \cdot r_g + F_s(\varphi)r_s, \quad (2)$$

где I – момент инерции маятника;

m – его масса;

r_g – расстояние от оси вращения до центра масс маятника;

r_s – расстояние от оси подвеса до точки приложения силы F_s .

Величина силы F_s определяется в зависимости от величины деформации образца $dx = \varphi r_s$.

Используя (2), итоговый алгоритм расчета движения маятника можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 2. Моменты действующих сил, таких как сила тяжести или воздействие образца, обозначены как M_i . Определение шага Δt выполняется с помощью отдельного программного блока, который может существовать в двух реализациях. Будем считать вариант, обеспечивающий постоянство Δt , в качестве *регулярной* модели, а вариант, рассчитывающий Δt согласно формуле (1), – *нерегулярной*.

Для упрощения дальнейшего усовершенствования модели можно представить момент каждой силы, действующей на маятник, как функцию вида $M_i(\dot{\varphi}, \varphi, t)$. Такие функции могут быть реализованы в виде набора однотипных подпрограмм, что позволит расширять набор действующих сил, учитываемых в (2), а также изменять условия их действия, не затрагивая остальные части системы.

В качестве примера реализации алгоритма проведем симуляцию холостого хода маятника, при котором отсутствует воздействие со стороны образца. Остальные параметры симуляции примем равными и используемыми для разрывной машины К-1, а именно: масса маятника – 2,78 кг; расстояние от центра масс до оси вращения – 175 мм; момент инерции маятника – 0,1026 кг·м²; расстояние от точки крепления нити до оси вращения маятника – 58 мм; начальный угол отклонения – 1,11 рад. Симуляция проводилась с использованием регулярной и нерегулярной модели.

Результаты симуляции сравнивали с данными эксперимента, полученными при холостом ходе машины К-1 (рис. 3). Оказалось, что нерегулярная модель обеспечивает значительно большую степень сходства с опытными данными. Средняя относительная погрешность составляет 1,91 %, а на наиболее важном участке траектории (в зоне действия силы растяжения образца) она не превышает 6 %. При использовании регулярной модели выявлен недостаток в виде повышенной средней погрешности ($\approx 37\%$, с максимумом $\approx 65\%$) на участке траектории, где наблюдается взаимодействие с образцом.

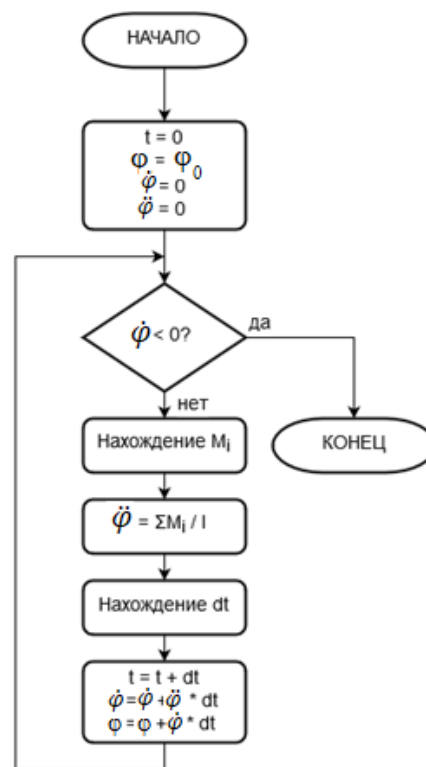


Рис. 2. Обобщенный алгоритм моделирования одного хода маятника

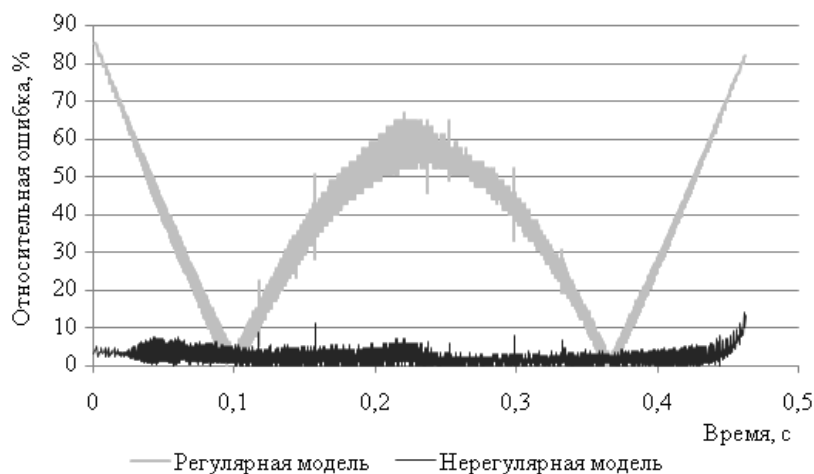


Рис. 3. Сравнение относительных ошибок двух методов расчета Δt по отношению к фактическим данным

Поскольку конечным результатом для сравниваемых результатов (при опытном испытании и моделировании) является получение зависимости $\varphi(t)$, был проведен сравнительный анализ этих зависимостей. Однако при сравнении временные отсчеты совпадали не полностью, что потребовало интерполяции модельных данных на сетку отсчетов экспериментальных данных. В качестве критерия сравнения было выбрано относительное отклонение расчетной величины $\varphi(t)$ от фактического ее значения.

Результаты представлены на рис. 4. Из него следует преимущество нерегулярной модели, основанной на выражении (1). В этом случае ошибка моделирования оказывается примерно в 5...6 раз меньше, чем при использовании регулярной модели.

ВЫВОДЫ

1. Анализ особенностей динамики вращательного движения маятника разрывной машины К-1 с помощью инкрементального энкодера рекомендуется производить не путем периоди-

ческого отслеживания текущего положения вала с закрепленным маятником, а путем фиксации интервалов времени, прошедших между сигналами энкодера.

2. Учитывая, что большинство методов анализа экспериментальных данных и моделирования физических процессов строятся с допущениями о равномерности решетки отсчетов, их применение к полученным данным текущего положения вала с маятником может увеличить погрешность измерений. Поэтому не целесообразно пренебрегать неоднородностью решетки отсчетов при выборе численных методов обра-

ботки данных. При расчете угловой скорости и углового ускорения маятника машины К-1 рекомендуется использовать методы численного дифференцирования, допускающие неравномерность временных интервалов между отсчетами дифференцируемой функции.

3. Созданная программная система, моделирующая поведение маятника машины К-1, обеспечивает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Ее целесообразно использовать для создания расчетного метода поверки метрологических параметров, связанных с маятником машины К-1.

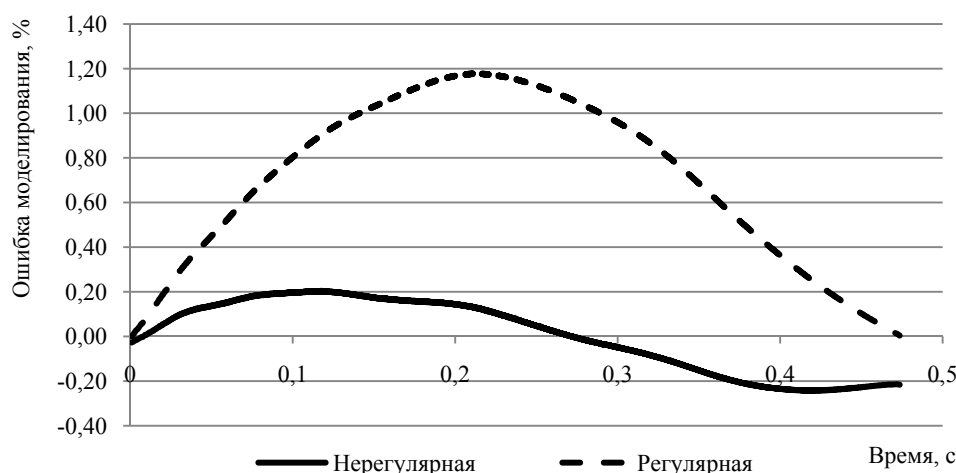


Рис. 4. Погрешности расчетов координаты при использовании разных моделей

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пашин Е. Л., Орлов А. В. Испытательная система контроля разрывных характеристик волокон и нитей при скоростном растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 2. С. 60–64.
2. ЛИР-158Б. Инкрементный угловой энкодер // Специальное конструкторское бюро измерительных систем. Каталог продукции : офиц. сайт. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158b> (дата обращения: 13.03.2022).
3. ATmega2560 // Microchip Technology Inc. The Embedded Control Solutions Company. URL: <https://www.microchip.com/en-us/products/en/ATmega2560> (дата обращения: 02.03.2022).
4. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М. : Наука, 1989. 432 с.

REFERENCES

1. Pashin E. L., Orlov A. V. Testing system for controlling tensile characteristics of fibers and threads during high-speed stretching. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Material diagnostics]. 2019;2:60–64.
2. LIR-158B. Incremental rotary encoder. URL: <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158b> (accessed: 13.03.2022).
3. ATmega2560. URL: <https://www.microchip.com/en-us/products/en/ATmega2560> (accessed: 02.03.2022).
4. Samarskij A. A., Gulin A. V. Numerical methods. Moscow, Nauka Publ., 1989. 432 p.

Статья поступила в редакцию 30.03.2022
Принята к публикации 19.05.2022