

## ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА К-1 НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО РАБОТЫ

### THE USE OF SIMULATION MODEL TO DIAGNOSE HARDWARE AND SOFTWARE FAILURES IN K-1 TENSILE STRENGTH MEASUREMENT DEVICE

*А.В. ОРЛОВ, Е.Л. ПАШИН*

*A.V. ORLOV, E.L. PASHIN*

(Костромской государственный университет,  
Костромская государственная сельскохозяйственная академия)

(Kostroma State University,  
Kostroma State Agricultural Academy)

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

*В статье рассмотрены вопросы диагностики работы нового программно-аппаратного комплекса К-1 на базе разрывной машины копрового типа, предназначенного для определения разрывного усилия волокна и используемого по ГОСТ Р53484-2022 "Лен трепаный. Технические условия". Указаны причины невозможности применения систем тестирования существующих разрывных машин с использованием образцовых динамометров, а также копров на основе контроля затрат энергии для разрушения испытываемых образцов. Предложен оригинальный вариант тестирования комплекса К-1 на основе численного моделирования его работы как механической системы, кинематические характеристики которой формируются на основе сигналов от датчика углов поворота (энкодера). Конечной целью моделирования является синтез входного сигнала, эквивалентного реальному сигналу, формируемому при испытании на разрыв образца с известными свойствами. Для тестирования программного обеспечения предложен вариант искусственного генерирования последовательности сигналов энкодера, соответствующей ходу маятника, с последующим сравнением полученных оценок свойств образца со значениями, изначально заложенными в параметры симуляции. Отмечено, что предложенные на основе моделирования варианты контроля правильности функционирования комплекса К-1 можно применять для его тестирования в условиях практики его эксплуатации.*

*The article considers the problems of performing diagnostics on the new tensile strength measurement device (mk. K-1). It's based on the pendulum principle and is intended to be used to determine tensile strength of flax fiber according to GOST R53484-2022 "Scutched flax fibre. Technical specifications". The authors point out why a more typical approach, based on specifically prepared samples with known properties, is not recommended here. Instead they suggest a new approach, based on creating a software model, simulating mechanical operations of the device, including its sensor component – an incremental rotary encoder. Such a model could produce a set of data nearly equivalent to data, produced by an actual device. The model can simulate a dry run in order to provide a baseline, against which mechanical failures in the real system can be detected. Alternatively, the model can simulate performing a test on a sample with known properties, which would allow testing the*

*software component of the system as well. Authors note that it should be possible to implement this software model as a portable testing device, useful for performing diagnostics and maintenance of K-1 units in the field.*

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, испытание, разрывное усилие, волокно, тестирование, моделирование, элементы конструкции, энкодер, программное обеспечение.

**Keywords:** hardware and software system, testing, tensile strength, fiber, simulation, rotary encoder, pendulum.

Использование инструментальных методов контроля параметров качества текстильного сырья и полуфабрикатов, обеспечивающих прогнозирование результатов их переработки, способствует повышению конкурентоспособности конечной продукции. Поэтому для квалиметрии лубоволокнистого сырья, а именно для определения разрывных характеристик волокна разработан и предложен для использования измерительный программно-аппаратный комплекс К-1 на основе разрывной машины копрового типа [1], [2]. Особенностью его работы является проведение испытаний при повышенной скорости одноосного растяжения, что соответствует реальным скоростям нагружения, имеющим место при переработке и эксплуатации текстильного сырья и материалов [3...8].

Важным условием при использовании комплекса К-1, как испытательного оборудования, является обеспечение достоверности и воспроизводимости результатов, получаемых при испытании. Поэтому необходима эффективная диагностика (тестирование) его основных систем с учетом существующего регламента [9]. Для этого приняты во внимание существующие методики метрологической поверки, применяемые для разрывных машин [10], а также для копров [11]. Однако их применение по ряду причин оказывается нецелесообразным. В основном это касается проведения испытания при повышенных скоростях деформации, при которых использование средств поверки с использованием образцовых динамометров, исключающих применение динамических нагрузок, будет приводить к формированию погрешностей контролиру-

емых параметров. Использование методики поверки копров также проблематично из-за особенностей определения на комплексе К-1 разрывного усилия волокна и его деформационных характеристик [12]. Это объясняется тем, что согласно [11] при тестировании копров основным параметром является энергия, затрачиваемая на разрушение образца. Контроля же разрывного усилия не производится.

Такое положение дел требует разработки иных технических основ для тестирования основных систем нового измерительного комплекса К-1.

Принципиальной особенностью функционирования комплекса К-1 является использование специализированной программной составляющей для оценки механических характеристик испытываемого волокна на основе анализа характера движения основного рабочего органа разрывной машины – маятника с активным зажимом. Исходные сигналы, определяющие характер маятника, формируются относительно инкрементальным энкодером ЛИР-158Б [13] и регистрируются для последующей обработки согласно схеме, указанной на рис. 1 (диаграмма потоков данных при работе измерительного комплекса К-1).

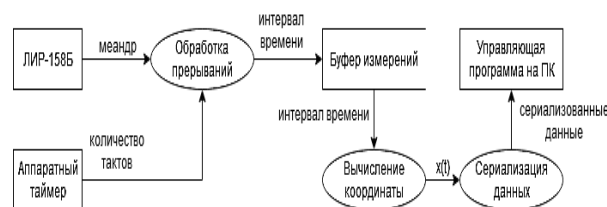


Рис. 1

Очевидно, что движение маятника в процессе одноосного разрыва волокна зависит от свойств испытываемого волокна. Однако эти свойства невозможно точно задать заранее или измерить независимо без разрушения образца. Поэтому становится необходимой имитация работы энкодера и механической системы с целью синтеза входного сигнала, соответствующего реальному сигналу, формируемому при испытании на разрыв образца с заранее известными свойствами.

Такой подход возможен на использовании численного моделирования рассматриваемой системы с последующим формированием на его основе ожидаемого сигнала.

$$\ddot{\varphi}_i = \frac{F_{\text{обр}}(\varphi_{i-1}, \dot{\varphi}_{i-1})r_{\text{обр}} - mgr_T \sin\varphi_{i-1} - \text{sign}(\dot{\varphi}_{i-1})M_{\text{тр}}}{I}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса маятника;  $I$  – момент инерции маятника;  $r_T$  – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника;  $r_{\text{обр}}$  – расстояние от точки подвеса до точки крепления образца;  $M_{\text{тр}}$  – момент силы трения;  $F_{\text{обр}}$  – сила сопротивления образца;  $\varphi, \dot{\varphi}$  – угловая координата и скорость маятника, а функция  $\text{sign}()$  принимает значение  $+1$  или  $-1$  в зависимости от знака аргумента.

Задавая различные зависимости  $F_{\text{обр}}$ , появляется возможность моделировать угловое движение маятника. Однако при этом следует учитывать особенности выходного сигнала. Дело в том, что, вследствие особенностей своей конструкции инкрементальные энкодеры генерируют выходной импульс при повороте их вала на определенный минимальный угол  $\Delta\varphi$ . Как следствие, при переменной скорости вращения сигналы идут неравномерно по времени, что требуется учесть в симуляции. Угол  $\Delta\varphi$  зависит от конструкции энкодера, но при достаточно малом его значении можно считать, что движение маятника между двумя сигналами является равноускоренным. Это позволяет применить (1) для определения интервала времени  $\Delta t_i$ , за который вал энкодера повернется на минимальный угол  $\Delta\varphi$ . Этот временной шаг симуляции будет также являться ее выходным результатом.

В этом случае можно обеспечить формирование входных сигналов для разных режимов работы управляемой системы, а также исследовать наличие, интенсивность и природу "шумовых" составляющих, снижающих точность измерения.

Для реализации такого подхода была предложена модель движения физического маятника, включающая в себя силу тяжести, силу трения и силу сопротивления образца разрыву. На основании этой модели была получена итеративная формула для определения мгновенных значений углового ускорения  $\ddot{\varphi}$  маятника копра:

Он может быть определен с использованием выражения:

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

Вычисление корней уравнения (2) может дать несколько возможных исходов. Если уравнение имеет два корня, то наименьший положительный из них будет искомым значением. Если же уравнение не имеет корней, это означает, что маятник дошел до крайней точки своей траектории и не сможет подняться выше. В этом случае можно остановить расчеты, так как дальнейшая деформация образца уже не произойдет. Если же потребуется моделировать процесс далее, следует изменить знак перед  $\Delta\varphi$  на противоположный, чтобы отобразить смену направления движения маятника.

Таким образом, становится возможным смоделировать сигнал, генерируемый энкодером, соединенным посредством оси с закрепленным на ней маятником, обладающим заданными параметрами. Такой подход при моделировании сигнала предложен использовать для контроля правильности функционирования трех составляющих конструкции и алгоритмов расчета

комплекса К-1: узла крепления маятника, энкодера и программного обеспечения.

Контроль работы узла крепления маятника предложено осуществлять следующим образом. После замера таких параметров, как масса маятника  $m$ , момент инерции  $I$  и расстояние от точки подвеса до центра масс маятника  $r_T$ , а также величину момента силы трения  $M_{Tr}$  и угол зарядки маятника  $\varphi_0$ , становится возможным промоделировать холостой ход маятника, и сравнить результат моделирования с результатом регистрации холостого хода маятника на реальном тестируемом комплексе К-1. Расхождения между смоделированной и реальной траекторией будут указывать либо на ошибки измерения параметров маятника, либо на механические дефекты узла подвеса.

При наличии ошибок измерения будут характерны расхождения в таких характеристиках, как положение высшей точки траектории или полупериод колебаний маятника.



Рис. 2

Для дефектов узла подвеса будут характерны в основном локализованные отклонения реальной траектории от смоделированной. Иными словами, будут существовать интервалы времени, когда разница в реальном и модельном мгновенном значении углового ускорения будет превышать заданный порог. При этом длительность таких интервалов должна находиться в допустимом диапазоне. Более короткие интервалы расхождения могут быть следствием наличия незначительных дефектов, а более длинные (с характерной длиной порядка 50% времени одного хода маятника) будут

являться признаком наличия ошибок в оценке параметров маятника в целом.

Схематично процесс оценки расхождений таких траекторий представлен на рис. 2.

При достаточной точности определения параметров маятника и при достаточном качестве изготовления узла подвеса полученные результаты моделирования можно использовать для контроля качества применяемого в конструкции комплекса К-1 энкодера ЛИР-167Б. Такая возможность вытекает из принципа работы энкодера, схематично представленной на рис. 3 (схема работы энкодера (а) и получаемые данные (б)). Каналы А и В генерируют сигнал в виде прямоугольного меандра, на основании которого можно вычислить координату  $\varphi$ . Моменты смены уровня на канале А и В считаются моментами прихода сигнала с энкодера  $t_i$ . На вход вычислительной системы К-1 поступает набор интервалов  $\Delta t_i$ .

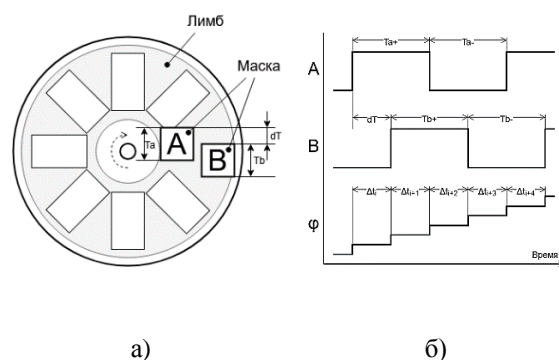


Рис. 3

Таким образом, существуют два связанных с энкодером источника ошибок измерения – это дефекты изготовления лимба энкодера, и дефекты изготовления маски, разделяющей сигнал лимба на каналы А/В и обеспечивающей смещение этих каналов на четверть периода.

Дефекты маски будут выражаться в нарушении скважности сигналов на выходах А и Б энкодера, а также в отклонении разницы их фаз  $dT$ . При отсутствии дефектов скважности и при равномерном вращении вала соотношение длительности высокого логического уровня  $T_{a+}(T_{b+})$  на выходе энкодера к длительности низкого уровня  $T_{a-}(T_{b-})$  на этом же выходе должно быть равно

единице. Аналогично при отклонении величины  $dT$  от среднего уровня  $(T_{a+} + T_{a-})/4$  будет наблюдаться неравномерность поступления сигналов энкодера, имеющая период 4 такта. Пример неравномерности, зафиксированной в ходе анализа сигналов, поступающих с реального энкодера, представлен на рис. 4.

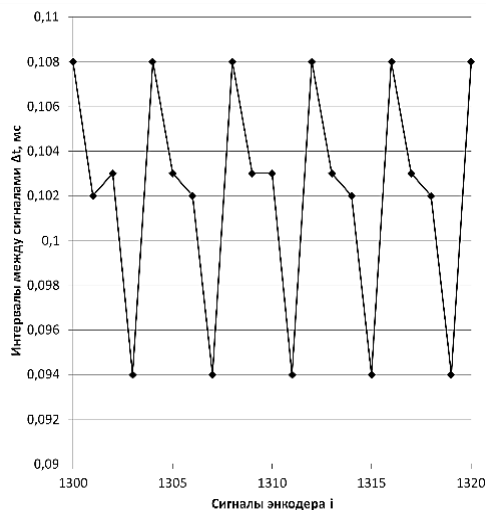


Рис. 4

Важно понимать, что характерный период колебаний маятника комплекса К-1 составляет порядка 1 секунды, что на три порядка величины превышает средний интервал между импульсами энкодера. Это позволяет предположить, что угловая скорость маятника не должна претерпевать значительных изменений от импульса к импульсу, даже вследствие наличия механических дефектов. Из этого следует, что движение маятника на коротких (единицы импульсов энкодера) участках траектории можно принимать как равномерное.

С учетом этой особенности для оценки равномерности сигналов энкодера предложено использовать критерий скользящего среднего. Для этого необходимо вычислить на всей траектории маятника величину относительного отклонения по формуле:

$$\varepsilon t_i = \left| 1 - \frac{2\Delta t_i}{\Delta t_{i-1} + \Delta t_{i+1}} \right| \cdot 100\% . \quad (3)$$

При использовании выражения (3) оказывается возможным оценить качество ра-

боты энкодера при любом значении угла поворота вала. Нулевая величина  $\varepsilon t_i$  будет означать идеальную равномерность делений на лимбе и полное отсутствие дефектов маски. Средний уровень  $\varepsilon t_i$  будет определяться в основном влиянием дефектов маски, а локальные колебания  $\varepsilon t_i$  будут вызваны либо дефектами лимба, либо явно локализованными дефектами узла крепления маятника.

Наиболее значимой составляющей системы тестирования нового измерительного комплекса К-1 является контроль правильности функционирования программной составляющей. Именно она обеспечивает корректность результатов, получаемых при проведении испытаний. Суть предлагаемого тестирования базируется на результатах моделирования движения маятника с имитируемым образцом. На базе этих результатов генерируется последовательность сигналов энкодера, которая затем подается на вход испытательного комплекса вместо сигналов с реального энкодера. Схематично указанный процесс тестирования представлен на рис. 5.

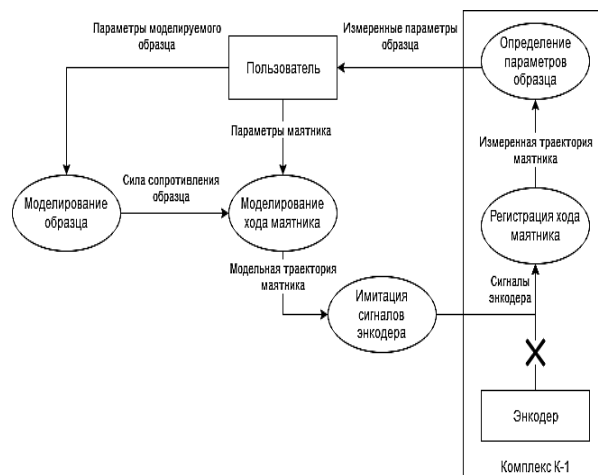


Рис. 5

Оценочные значения параметров образца, выданные программным обеспечением комплекса К-1, затем сопоставляются со значениями параметров, заложенных в модель. Расхождение между результатами может указывать на нарушение работы программного обеспечения, например, вследствие постороннего вмешательства.

Таким образом, предложенные на основе моделирования варианты контроля правильности функционирования комплекса К-1 можно применять для тестирования узла крепления маятника, энкодера и программного обеспечения. Преимуществом таких вариантов является исключение необходимости реального разрыва волокна с присущей ему вариацией свойств.

## ВЫВОДЫ

1. Применение существующих систем тестирования разрывных машин с использованием образцовых динамометров и копров, основным метрологическим параметром для которых являются затраты энергии для разрушения испытываемых образцов, является проблематичным для нового аппаратно-программного комплекса К-1 на базе разрывной машины копрового типа.

2. Предложен оригинальный вариант тестирования комплекса К-1 на основе симуляции его функционирования посредством численного моделирования работы энкодера и механической системы с целью синтеза ожидаемого входного сигнала, адекватного реальному сигналу, формируемому при испытании на разрыв образца с заранее известными свойствами.

3. Для тестирования программного обеспечения предложен вариант искусственного генерирования последовательности имитируемых сигналов энкодера, соответствующей ходу маятника при разрыве образца с известными свойствами, с последующим сравнением полученных оценок свойств образца с изначально заданными параметрами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ на полезную модель № 206641 "Устройство для испытания волокон и нитей на растяжение"; авторы Орлов А.В., Пашин Е.Л. – Опубл. 20.09.2021г. Бюл. № 26.
2. ГОСТ Р 53484-2022. Лен трепаный. Технические условия. Официальное издание. – М.: ФГБУ "РСТ", 2022.
3. *Крагельский И.В.* Динамическое определение прочности текстильных материалов. – М.: Гизлегпром, 1933.

4. *Журков С.Н., Тимашевский Э.Е., Санфирова Т.П.* Механические свойства материалов при больших скоростях растяжения // Журнал технической физики. – 1953. Т. 23, вып. 6. С. 933...939.

5. *Перепелкин К.Е., Ройтих А.М.* Приборы и методы высокоскоростных испытаний материалов на растяжение. – М.: ЦНИИТЭИ, 1968. С. 3...25.

6. *Кудряшова Н.И., Кудряшов Б.А.* Высокоскоростное растяжение текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1974.

7. *Банакоева Н.В., Крутикова В.Р.* Анализ параметров технологических процессов приготительного, ткацкого и трикотажного производств по тензограммам нити // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №5. С.100...105.

8. *Цитович И.Г.* Теоретические основы стабилизации процесса вязания. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.

9. ГОСТ Р 8.568–2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытываемого оборудования. Основные положения. Официальное издание. – М.: ФГБУ "Стандартинформ", 2019.

10. [https://znaytovar.ru/gost/2/ RD\\_5048284\\_Metodicheskie\\_ukaza.html](https://znaytovar.ru/gost/2/ RD_5048284_Metodicheskie_ukaza.html). Методические указания РД 50-482-84. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки.

11. ГОСТ 34373–2017. Пластмассы. Верификация маятникового копра для испытания на удар. Испытание на ударную вязкость по Шарпи, Изоду и при ударном растяжении. Официальное издание. – М.: ФГБУ "Стандартинформ", 2018.

12. *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.

13. Преобразователи угловых перемещений ЛИР-158. Технические условия ЛИР-158.000ТУ. Санкт-Петербург, ОАО "СКБ ИС".

## REFERENCES

1. Orlov, A. Pashin, E. (2021) Device for stretch testing of fibers and threads (Russian Federation patent no. 206641).
2. GOST R 53484-2022. Scutched flax fibre. Technical specifications. – Moscow, Standartinform, 2022.
3. Kragelsky I.V. Dynamic measurement of textile materials strength. – Moscow, Gizlegprom, 1933.
4. Zhurkov S.N., Timashevsky E.E., Sanfirova T.P. Mechanical properties of materials undergoing high-speed stretching // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – vol. 23, № 6, 1953. P. 933...939.
5. Perepelkin K.E., Roitikh A.M. Devices and methods of high-speed stretching material testing. – Moscow, CNITEI, 1986. P. 3...25.
6. Kudryashova N.I., Kudryashov B.A.. High-speed stretching of textile materials. – Moscow, Legkaya industriya, 1974.

7. Banakova N.V., Krutikova V.R. Analyzis of parameters of technological processes of preprocessing, weaving and warp knitting production lines using thread tensograms // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2015, № 5. P. 100...105.

8. Citovich I.G. Theoretical basis of knitting process stabilization. – Moscow, *Legkaya i pischevaya promyshlennost*, 1984.

9. GOST R 8.568–2017. State system for ensuring the uniformity of measurements. Verification of testing equipment. General provisions. – Moscow, *Standartinform*, 2019.

10. Methodical recommendations RD-50-482-84. Tensile strength testing machines for static testing of metals and plastics. [website], [https://znaytovar.ru/gost/2/RD\\_5048284\\_Metodicheskie\\_ukaza.html](https://znaytovar.ru/gost/2/RD_5048284_Metodicheskie_ukaza.html) (accessed 19 June 2022).

11. GOST 34373-2017. “Plastics. Verification of pendulum impact-testing machines. Charpy, Izod and tensile impact-testing”. – Moscow, *Standartinform*, 2018.

12. Pashin E.L., Orlov A.V. Testing system for controlling tensile properties of fibers and threads during high-speed stretching // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. – vol. 85, no. 2, 2019. P. 60...64.

13. LIR-158 rotary encoders. Technical specifications, St. Petersburg, SKB IS inc.

Рекомендована кафедрой технических систем в АПК Костромской ГСХА. Поступила 21.09.22.

---