

УДК 622.673.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-25-29

## Алгоритм обработки сигналов инкрементного датчика для расчета углов поворота крутильного маятника\*

В. В. Тарасов, доктор технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

А. В. Чуркин, кандидат технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В. Н. Новиков, аспирант, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Е. А. Калентьев, кандидат технических наук, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В. Ф. Лыс, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

Ю. В. Ганзий, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В статье приведен алгоритм обработки сигналов инкрементного датчика для оценки свободных колебаний крутильного маятника при исследовании фрикционных характеристик смазочных материалов применительно к стальным канатам с использованием возможности ПО «PowerGraph». Стальной канат является сложной и гибкой стержневой системой, в которой проволоки имеют форму пространственной спирали (винтовой линии) или двойной спирали. При этом внутренние проволоки стальных канатов находятся внутри и недоступны для прямого исследования, измерения и контроля. Анализ фрикционных характеристик смазочных материалов, используемых в стальных канатах, усугубляется многокомпонентностью и сложной структурой объекта исследования. Экспериментальные методы исследования в этом случае представляют один из наиболее эффективных и достоверных способов оценки эксплуатационных свойств изделия в целом. В основу эксперимента положен процесс затухания вращательных колебаний тяжелого груза, висящего на исследуемом стальном канате. Используемый смазочный материал влияет на такой колебательный процесс, и характеристикой такого влияния является декремент затухания колебательного процесса. В качестве датчика угла использован инкрементный энкодер, установленный соосно исследуемому канату и обеспечивающий разрешение регистрации угла поворота до  $0,18$  градуса.

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь, энкодер, ПО «PowerGraph», смазочные материалы, фрикционные испытания.

### Введение

Анализ фрикционных характеристик смазочных материалов, используемых в стальных канатах, усугубляется многокомпонентностью и сложной структурой объекта исследования [1–3]. Экспериментальные методы исследования в этом случае представляют один из наиболее эффективных и достоверных способов оценки эксплуатационных свойств изделия в целом [4–8].

Так, вариантом оценки характеристик смазочных материалов, используемых в канатных прядях, может выступать схема вертикального крутильного маятника [9]. В этом случае верхний конец неподвижно закреплен, а на нижнем располагается груз заданной массы (твердое тело – диск), выводимый из равновесного состояния на начальном этапе эксперимента закручиванием на заданный угол  $\alpha$  (рис. 1).

Для подобной схемы испытания критерием эффективности может выступать логарифмиче-

ский декремент затухания, который будет носить интегральный характер в целом для системы свитых канатных прядей.

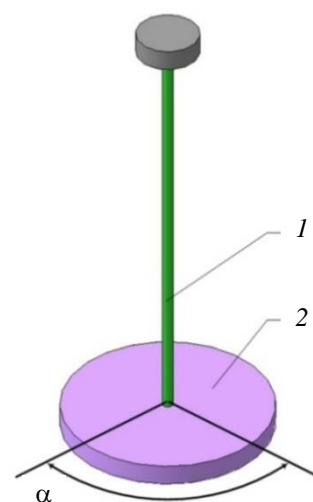


Рис. 1. Схема крутильного маятника: 1 – канат (нить), 2 – твердое тело (диск)

Предполагается, что использование подобной схемы будет оправдано при амплитуде колебаний, не превышающей 50–60 градусов.

Целью работы является разработка алгоритма обработки сигналов инкрементного энкодера для получения графика знакопеременных затухающих колебаний стального каната.

#### Экспериментальная часть

Для проверки данной гипотезы была построена экспериментальная установка, в которой использовали инкрементный датчик угла поворота, закрепленный на неподвижном основании под диском 2 и через муфту соединенный с последним соосно испытываемому канату.

Экспериментальное определение угла поворота диска 2 осуществляется при помощи инкрементного энкодера OMRON [10] с разрешением 2000 прямоугольных импульсов за один оборот вала. При этом период одного прямоугольного импульса составляет 0,18 град. Регистрацию потока данных осуществляли аналого-цифровым преобразователем LTR22 [11], имеющим четыре независимых дифференциальных канала входных сигналов и способного производить обработку с частотами до 78 кГц. Автоматизация сбора данных реализована с использованием программного обеспечения ПО «PowerGraph» версии 3.3 [12].

При оценке медленно протекающих процессов, а в нашем случае углов поворота инкрементного энкодера, возникает необходимость регистрировать большой объем данных. Так, при скорости поворота вала 1 оборот в секунду частота следования импульсов составит 2 кГц. Поэтому для адекватного сбора данных использовали скорость обработки информации на частоте 50 кГц.

Основной задачей обработки информации является реализация счетчика импульсов с учетом возможной смены направления движения и дальнейшего преобразования импульсов в угловые единицы с использованием величины одного прямоугольного импульса 0,18 град, характерной для выбранного энкодера E6B2-CWZ6C.

Алгоритм расчета углов поворота крутильного маятника реализован на программном обеспечении «PowerGraph» с использованием набора функций, приведенных в таблице.

Расчет разбит на два этапа: первый реализуется в реальном времени в процессе эксперимента (RT), а второй как постобработка – реализуемый по результатам вычисления первого этапа, после завершения процесса колебаний (Off-line).

#### Набор каналов и функций для расчета угла поворота крутильного маятника

Канал «PowerGraph»	Способ расчета	Категория функции	Функция	Аргумент	Значения		Примечание
<b>Первый этап расчета</b>							
Канал 1	RT (Real-Time)				Сигнал Фаза А		С АЦП 50 кГц
Канал 2	RT				Сигнал Фаза В		С АЦП 50 кГц
Канал 3	RT				Сигнал Фаза Z		С АЦП 50 кГц
Канал 4	RT				Напряжение питания датчика		С АЦП 50 кГц
Канал 5	RT	Comparizon	RangeIn	Канал 1	3В	6В	Нормализация в чистый сигнал уровня 1 В
Канал 6	RT	Comparizon	RangeIn	Канал 2	3В	6В	Нормализация в чистый сигнал уровня 1 В
Канал 7	RT	Arithmetics	Phaze		Канал 5	Канал 6	Вычисление фазового сдвига сигналов
Канал 8	RT	Differential	Diff1Pt	Канал 7			Дифференцируем фазовый сдвиг сигналов
Канал 9	RT	Comparizon	RangeIn	Канал 8	1В	2В	Условно положительные импульсы
Канал 10	RT	Filters	RangeFilter	Канал 8	-1В	-2В	Фильтрация отрицательных импульсов
Канал 11	RT	Comparizon	RangeIn	Канал 10	-1,2В	-2В	Нормализация в чистый положительный сигнал уровня 1В
Канал 12	RT	Data	Invert	Канал 11			Условно отрицательные импульсы

Окончание таблицы

Канал «PowerGraph»	Способ расчета	Категория функции	Функция	Аргумент	Значения	Примечание
<b>Второй этап расчета</b>						
Канал 13	Off-line	Integral	Integral1Pt	Канал 9		Интегрирование условно положительных импульсов
Канал 14	Off-line	Integral	Integral1Pt	Канал 12		Интегрирование условно отрицательных импульсов
Канал 15	Off-line	Arithmetics	+ (сумма)		Канал 13 Канал 14	Суммирование положительных и отрицательных импульсов
Канал 16	Off-line	Arithmetics	Scale	Канал 15		Преобразование шкалы импульсов к градусам

Первые четыре канала 1–4 собирают «сырые» данные сигналов инкрементного энкодера – фаза *A*, фаза *B*, фаза *Z* и наличие питания, регистрируемые АЦП с частотой 50 кГц, отображаемые, соответственно, в каналах 1–4 с уровнями сигналов примерно 5–5,5 В. Фактически для методики используются только два сигнала: фаза *A*, фаза *B* (позиция 1, рис. 2).

Канал 5 и канал 6 отображают данные канала 1 и канала 2, обработанные функцией RangeIn из категории Comparison, преобразуя сигналы к формату импульсов заданного размера ноль и единица. В результате выполнения этих процедур «зашумленные» сигналы амплитудой примерно 5,2 В преобразуются в «чистый» сигнал амплитудой 1 В. При этом период следования фаз остается неизменным.

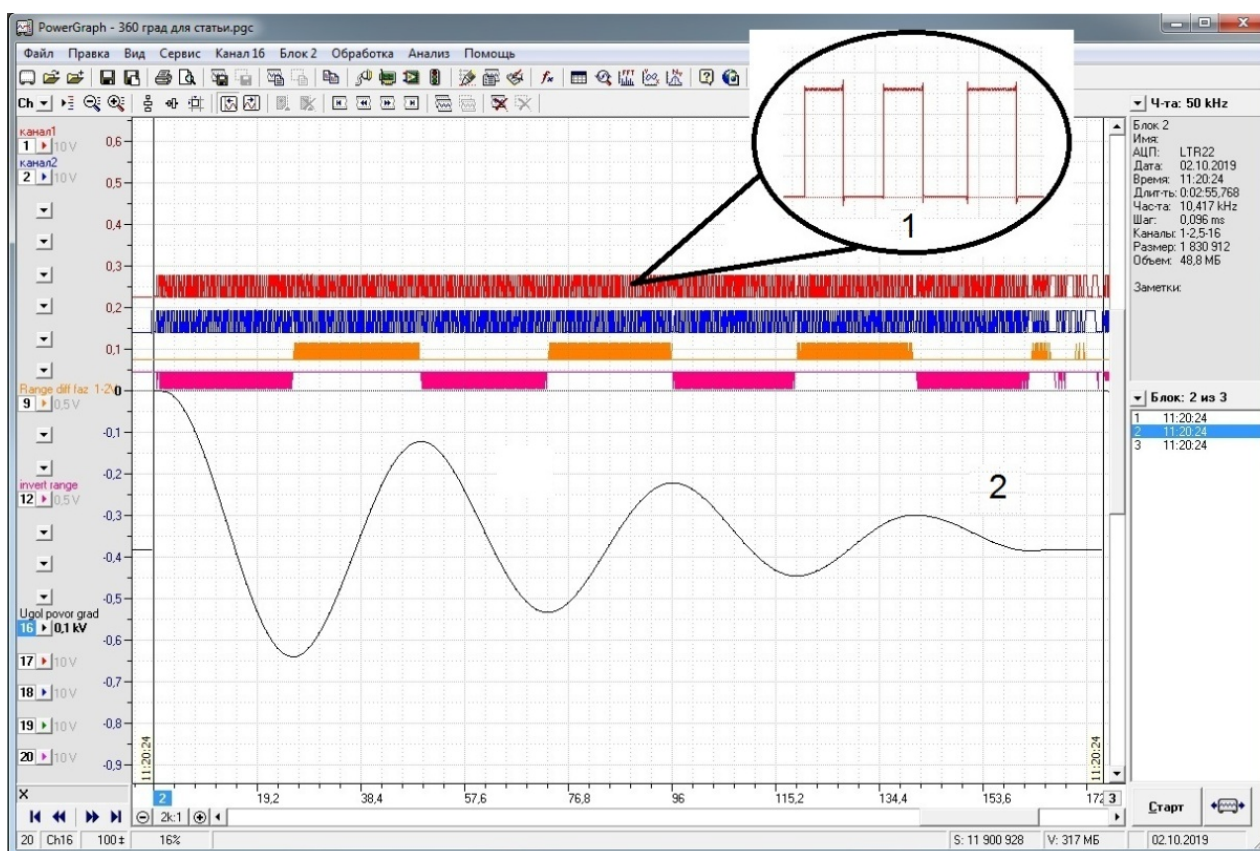


Рис. 2. Результат обработки сигналов в программе PowerGraph: 1 – исходные «сырые» сигналы, 2 – результирующая кривая колебаний

Далее в канале 7 осуществляется вычисление сдвига фаз между сигналами фаза *A* и фаза *B* с использованием функции Phaze из категории Arithmetics, после чего в канале 8 данный сигнал дифференцируется функцией Diff1Pt из категории Differential.

Таким образом, в канале 8 получаем сигнал с набором импульсов в положительной и отрицательной области графика. Для дальнейшего анализа нам потребуется выделить из него импульсы в точках, соответствующих максимумам и минимумам функции. Эти значения фактически представляют единичные импульсы энкодера, меняющие знак при смене направления вращения последнего.

В канале 9 осуществляем выборку только максимальных положительных значений канала 8, используя уже известную функцию RangeIn из категории Comparison с граничными условиями 1 В и 2 В, получим график с условно положительными импульсами, нормализованными к значениям 1 и 0.

В канале 10 делаем выборку минимумов отрицательных значений, используя функцию RangeFilter из категории Filters с граничными условиями  $-1В$  и  $-2В$ . После чего в канале 11 осуществляем нормализацию сигнала к значениям 1 и 0 с применением функции RangeIn из категории Comparison с граничными условиями  $-1,2 В$  и  $-2 В$ .

В канале 12 с использованием функции Invert из категории Data позволяет сформировать график условно отрицательных импульсов.

Дальнейшая обработка реализована в режиме Off-line, т. к. применение функций интегрирования с накоплением имеет аппаратные ограничения по количеству вычислений в реальном времени.

Получив в каналах 9 и 12 наборы импульсов, соответствующие условно положительным и условно отрицательным значениям углов вращения энкодера, необходимо каждый из них проинтегрировать с накоплением суммы (каналы 13 и 14) и затем сложить вместе для отображения результирующего процесса колебания крутильного маятника в единицах количества импульсов (канал 15). Для преобразования последних к углам вращения в градусы применили функцию Scale из категории Arithmetics с параметром 0.18.

В качестве примера приведем кривую затухающих колебаний маятника (позиция 2, рис. 2) при испытании несмазанного (сухого) стального каната диаметром 2,5 мм, длиной 1 м на установке при использовании груза весом 5 кг. Канат закручивался на угол  $\alpha = 360$  градусов.

## Выводы

В работе рассмотрен вариант аппаратного и программного решения задачи регистрации знакопеременного угла поворота крутильного маятника в приложении к задаче исследования фрикционных характеристик смазочных материалов в стальных канатах.

В качестве датчика угла использовали инкрементный энкодер, установленный соосно исследуемому канату и обеспечивающий разрешение регистрации угла поворота до 0,18 градуса. Регистрацию двух сигналов энкодера (фаз *A* и *B*) реализовали на АЦП LTR22 (Lcard) с частотой 50 кГц, а полуавтоматическая обработка результатов измерения реализована на основе возможностей программного обеспечения PowerGraph.

## Библиографические ссылки

1. Патент № 2408869 Российская Федерация. Способ определения силы трения и коэффициента трения / Исмаилов Г. М., Мусалимов В. М., Саркисов Д. Ю., Лутовинов С. В., Окунев С. А. 2011.
2. Исмаилов Г. М. Контактные напряжения в кабелях // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. Т. 5, № 107. С. 35–38.
3. Оценка силового взаимодействия элементов конструкции кабеля при деформации изгиба / Г. М. Исмаилов, В. М. Мусалимов, В. Д. Шиянов, С. В. Лутовинов // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 2. С. 44–48.
4. Патент № 2420727 Российская Федерация. Способ и устройство для определения коэффициента трения гибких тел / Тарасов В. В. и др. 2010.
5. Андреев А. В. Передача трением. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1978. 176 с.
6. Патент № 2135982 Российская Федерация. Способ определения фрикционных свойств волокна и устройство для его осуществления / Рачковская Е. В., Мурадханов В. А., Кухарь А. В. 1999.
7. Мур Д. Ф. Основы и применение трибоники / пер. с англ. С.А. Харламова. М. : Мир, 1978. 487 с.
8. Патент № 2486493 Российская Федерация. Трибометр для определения характеристик трения гибких тел / Побежалко В. И. 2013.
9. Tarasov V., Churkin A., Kalentyev E. To develop an installation to assess the tribological properties of lubricants based on the torsion pendulum // Him. Fiz. i mezoskopija. 2019. Vol. 21, № 3. DOI 10.15350/17270529.2019.3.46.
10. Угловые энкодеры // E6B2-CWZ6C 2000P/R 0.5M. 2021. URL: <https://industrial.omron.ru/r/products/E6B2-CWZ6C-2000P-R-0-5M>.
11. Установки измерительные LTR, Модуль LTR 22 // LTR22 Сигма-дельта АЦП для виброакустических измерений. 2021. URL: <https://www.lcard.ru/products/ltr/ltr22>.
12. Системы сбора данных на базе персонального компьютера // Программное обеспечение "PowerGraph". 2021. URL: <http://www.powergraph.ru>.

## References

1. Ismailov G.M., Musalimov V.M., Sarkisov D.Yu., Lutovinov S.V., Okunev S.A. Sposob opredeleniya sily treniya i koeffitsienta treniya [Method for determining the friction force and coefficient of friction]. Patent RF, no. 2408869. 2011 (in Russ.).
2. Ismailov G.M. [Contact stress in cables]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. 2011. Vol. 5, no. 107, pp. 35-38 (in Russ.).
3. Ismailov, G. M., Musalimov V.M., Shiyarov V.D., Lutovinov S.V. [Evaluation of the force interaction of cable structural elements during bending deformation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. Vol. 318, no. 2, pp. 44-48 (in Russ.).
4. Tarasov V.V. et al. *Sposob i ustroystvo dlya opredelenie koeffitsienta treniya gibkikh tel* [Method and device for determining the coefficient of friction of flexible bodies]. Patent RF, no. 2420727, 2010 (in Russ.).
5. Andreev A.V. *Peredacha treniem* [Friction transmission]. 2nd-e izd., ed. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 176 p. (in Russ.).
6. Rachkovskaya E.V., Muradkhanov V.A., Kukhar' A.V. *Sposob opredeleniya friktsionnykh svoystv volokna i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method for determining the friction properties of a fiber and a device for its implementation]. Patent RF no. 2135982, 1999.
7. Mur D.F. *Osnovy i primeneniye triboniki* [Basics and Applications of Tribonics], Moscow: Mir Publ., 1978. 487 p. (in Russ.).
8. Pobezhalko V.I. *Tribometr dlya opredeleniya kharakteristik treniya gibkikh tel* [Tribometer for determining the friction characteristics of flexible bodies]. Patent RF, no. 2486493, 2013 (in Russ.).
9. Tarasov V., Churkin A., Kalentyev E. [To develop an installation to assess the tribological properties of lubricants based on the torsion pendulum]. *Him. Fiz. i mezoskopiâ*. 2019. Vol. 21, no. 3 (in Russ.). DOI 10.15350/17270529.2019.3.46.
10. Uglovye enkodery [Rotary encoders]: E6B2-CWZ6C 2000P/R 0.5M [Electronic resource]. 2021. Available at: <https://industrial.omron.ru/ru/products/E6B2-CWZ6C-2000P-R-0-5M> (in Russ.).
11. *Ustanovki izmeritel'nye LTR, Modul' LTR 22* [Elektronnyi resurs]. *LTR22 Cigma-del'ta ATsP dlya vibroakusticheskikh izmerenii* [Measuring units LTR, Module LTR 22. LTR22 Sigma-delta ADC for vibroacoustic measurements], 2021. Available at: <https://www.lcard.ru/products/ltr/ltr22> (in Russ.).
12. *Sistemy sbora dannykh na baze personal'nogo komp'yutera* [Elektronnyi resurs]. *Programmnoye obespechenie "PowerGraph"* [Data collection systems based on a personal computer. Software "PowerGraph"]. 2021. Available at: <http://www.powergraph.ru> (in Russ.).

\*\*\*

**Algorithm for Processing Signals of the Incremental Encoder for Calculating the Angles of Rotation of the Torsional Pendulum**

V. V. Tarasov, DSc in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

A. V. Churkin, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

V. N. Novikov, Post-graduate, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

Ju. V. Ganzij, Researcher, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

E. A. Kalentev, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

V. F. Lys, Leading Engineer, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia.

*The paper presents an algorithm for processing signals of an incremental sensor for evaluating free vibrations of a torsional pendulum when studying the frictional characteristics of lubricants as applied to steel ropes using the PowerGraph software. A steel rope is a complex and flexible rod system in which wires are in the form of a spatial spiral (helical line) or double helix. At the same time, inner wires of steel ropes are inside and are inaccessible for direct research, measurement and control. Analysis of frictional characteristics of lubricants used in steel ropes is aggravated by the multicomponent and complex structure of the research object. Experimental research methods in this case represent one of the most effective and reliable methods for assessing the operational properties of a product as a whole. The experiment is based on the damping process of rotational vibrations of a heavy load hanging on the investigated steel rope. The lubricant used influences such an oscillatory process, and the characteristic of such influence is the damping decrement of the oscillatory process. An incremental encoder is used as an angle sensor, which is installed coaxially with the investigated rope and provides a resolution of the rotation angle registration up to 0.18 degrees.*

**Keywords:** Analog-to-digital converter, encoder, PowerGraph software, lubricants, friction tests.