

УДК 621.9.08, 621.83.06

СПОСОБЫ УСТРАНЕНИЯ ШУМОВЫХ ПОМЕХ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕДУЦИРУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ

А. В. Капитонов¹, О. А. Капитонов², В. С. Дроздов³

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: kavbru@gmail.com

² Старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь, e-mail: kapitonov1987@gmail.com

³ Студент машиностроительного факультета МОУВО «Белорусско-Российский университет», Могилев, Беларусь

Реферат

В статье рассматриваются вопросы, относящиеся к проблеме устранения шумовых помех при получении сигнала с датчика частоты вращения во время измерений и контроля кинематических параметров редуцирующих механизмов на испытательном специализированном стенде. Показаны недостатки испытательных стендов при их использовании для измерений кинематической погрешности и ее гармонических составляющих с понижением частоты вращения ведущего вала редуктора. Показано, что преобразователь частоты, подключенный к электродвигателю на испытательном стенде и используемый для понижения частоты вращения электродвигателя, является источником шумовых помех, искажающих полезный сигнал, поступающий с датчика частоты вращения. Отмечено, что известные методы фильтрации сигнала на основе математических зависимостей не обеспечивают полное устранение шума и не могут быть использованы при контроле показателей точности передач после их изготовления. С целью полного устранения шумовых помех разработаны три способа фильтрации на основе численных методов, которые могут эффективно использоваться на испытательных стендах при измерениях и контроле кинематических параметров, представляющих показатели точности редуцирующих механизмов. Представлены графики кинематической погрешности редуктора и ее численные значения до и после фильтрации сигнала с помощью разработанных способов. Показана зашумленность сигнала, полученная с разной частотой вращения ведущего вала редуктора. Даны рекомендации по использованию разработанных способов фильтрации сигнала при измерениях в зависимости от частоты вращения ведущего вала. Разработанные способы фильтрации сигнала позволяют получить достоверные измеряемые значения и обеспечить высокую точность контроля испытательных стендов.

Ключевые слова: способы фильтрации, шумовые помехи, измерения кинематических параметров, редуцирующие механизмы, показатели точности.

WAYS TO ELIMINATE NOISE INTERFERENCE FROM A FREQUENCY CONVERTER WHEN MEASURING KINEMATIC PARAMETERS OF REDUCING MECHANISMS

A. V. Kapitonov, O. A. Kapitonov, V. S. Drozdov

Abstract

The article discusses issues related to the problem of eliminating noise interference when receiving a signal from a speed sensor during measurements and monitoring of kinematic parameters of reducing mechanisms on a specialized test bench. The disadvantages of the test benches are shown when they are used to measure the kinematic error and its harmonic components with a decrease in the speed of rotation of the drive shaft of the gearbox. It is shown that a frequency converter connected to an electric motor on a test bench and used to lower the speed of the electric motor is a source of noise interference that distorts the useful signal coming from the speed sensor. It is noted that the known signal filtering methods based on mathematical dependencies do not provide complete noise elimination and cannot be used to control the accuracy of transmissions after their manufacture. In order to completely eliminate noise interference, three filtration methods based on numerical methods have been developed that can be effectively used on test benches for measuring and controlling kinematic parameters representing the accuracy of reducing mechanisms. Graphs of the kinematic error of the gearbox and its numerical values before and after filtering the signal using the developed methods are presented. The noise level of the signal obtained with different rotational speeds of the drive shaft of the gearbox is shown. Recommendations are given on the use of the developed signal filtering methods for measurements depending on the speed of rotation of the drive shaft. The developed signal filtering methods make it possible to obtain reliable measured values and ensure high accuracy of control of test benches.

Keywords: filtering methods, noise interference, measurements of kinematic parameters, reduction mechanisms, accuracy indicators.

Введение

Контроль качества изготовления редуцирующих механизмов выполняется на универсальных и специализированных стендах. В настоящее время известны испытательные стенды [1] для силовых установок, трансмиссионных компонентов, оснащенные датчиками крутящего момента и скорости, гистерезисными и магнитными порошковыми тормозными устройствами, преобразователями частоты и другим оборудованием. Известны также стенды Atestman [2] для испытания редукторов и трансмиссий, оснащенные различным оборудованием, включая динамометры с малой инерцией нагрузки, высокоскоростные приводные двигатели, преобразователи частоты, климатические камеры, системы охлаждения, высокоточные датчики, системы мониторинга и оповещения о вибрации, системы управления и другие устройства. Испытательные стенды этих производителей являются универсальными и многофункциональными и используются для контроля, диагностики и мони-

торинга различных механизмов (редукторов, трансмиссий, двигателей) по большому количеству кинематических, динамических параметров, температурных и других характеристик. В этих стендах используются дорогостоящие аппаратные и программные системы для устранения шумовых помех при получении и обработке сигналов с датчиков на основе известных математических методов фильтрации, которые могут не полностью устранять случайные сигналы с энкодеров (датчиков частоты вращения) [3]. Кроме того, использование универсальных многофункциональных испытательных стендов только в области контроля точности представляется неэффективным. Для этого применяются конструкции специализированных стендов и устройств. Авторами статьи разработаны стенды и устройства контроля показателей точности в соответствии со стандартами ГОСТ после изготовления зубчатых и других типов передач и редукторов [4–8]. Для большей информативности испытания механизмов на стендах проводятся с разной частотой вращения электродвигателя, соединенного с ведущим валом редуктора.

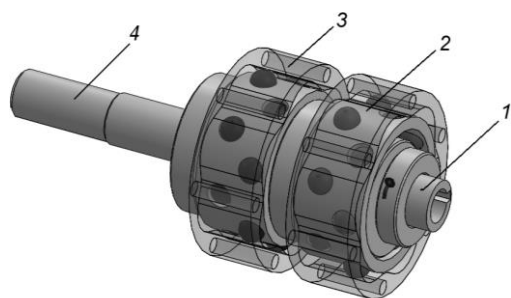
В этом случае к электродвигателю подключают преобразователь частоты. Если не использовать фильтры по устранению шума, источником которого является преобразователь частоты, то полученный сигнал с энкодеров искажается и зашумляется, при этом получают недостоверные значения показателей точности передач. Поэтому одной из основных проблем при измерениях кинематических параметров редуцирующих механизмов на специализированных стендах является устранение шумовых помех, идущих от преобразователей частоты при изменении скорости вращения электродвигателя.

Целью исследования является разработка более эффективных и менее затратных способов устранения шумовых помех при получении сигнала с энкодера специализированного стенда по сравнению с известными методами фильтрации и дорогостоящими средствами универсальных стендов.

Известны способы фильтрации и фильтры низких частот, основанные на математических методах расчета, Баттерворта, Чебышева, инверсный Чебышева, Кауэра, Бесселя, отличие которых друг от друга обусловлено различным подходом к выбору коэффициентов полиномов, которые обеспечивают наилучшее приближение к желаемой амплитудно-частотной или фазо-частотной характеристике фильтра [9]. Однако эти способы фильтрации обладают одним общим недостатком – малой эффективностью при подавлении импульсных помех. К тому же применяемые при подавлении шумов фильтры низких частот смазывают крутые перепады сигнала. Известен способ медианной фильтрации, основанный на методике сглаживания зашумленных сигналов, обеспечивающей подавление импульсных помех и в то же время сохранение крутых перепадов [10]. Этот способ фильтрации основан на вычислениях медианы отсчетов сигнала. Однако он, уменьшая искажения формы сигнала, полностью их не устраняет, сохраняя зашумление сигналов. Известные математические методы фильтрации сигналов не устраняют полностью шумовые помехи, поэтому поставлена задача разработать способы фильтрации на основе численных методов.

Разработка способов устранения шумовых помех при измерениях кинематических параметров редуцирующих механизмов

Для устранения шумов из полезного сигнала энкодера разработано три уровня фильтрации, которые представляют собой три способа обработки импульсных сигналов. Для исследований использовался двухступенчатый планетарный редуктор [11–14] (рисунок 1) с передаточным отношением $i = 49$.



1 – ведущий вал; 2 – первая ступень; 3 – вторая ступень;
4 – ведомый вал

Рисунок 1 – Планетарный редуктор

На рисунке 2 показано окно разработанного программного обеспечения измерительной системы специализированного стенда [15, 16], выполненного на основе патента [7] с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера стенда на ПЭВМ без фильтрации шумов сигналов. График получен при измерениях кинематических характеристик планетарного редуктора с передаточным отношением $i = 49$, с пониженной регулятором скорости частотой вращения ведущего вала 100 об/мин, без нагрузки. При такой небольшой частоте вращения регулятор скорости создает наибольшее количество шумов. При этой частоте вращения ведущего вала редуктора за время одного оборота его выходного вала число импульсных сигналов, исходящих из энкодера, составляет 792 934. На графике без фильтрации сигналов и на последующих графиках с отфильтрованными сигналами показано только 256 импульсных сигналов за время их следования.

Машиностроение

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-137-2-62-67>

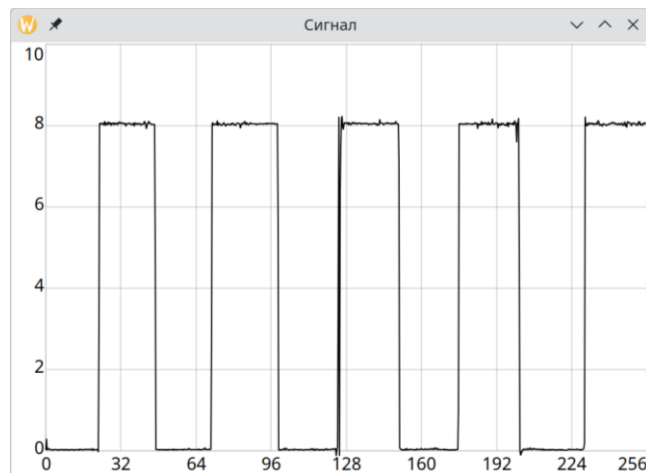


Рисунок 2 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени без фильтрации шумов

На графике (рисунок 2) по вертикальной оси показано напряжение в вольтах (В), а по горизонтальной оси – число импульсных сигналов. Напряжение наименьшего и наибольшего сигналов 0 В и 8,1 В соответственно. На графике видны случайные сигналы в виде больших и малых скачков, являющиеся шумами, искажающих форму прямоугольных импульсов.

Первый способ фильтрации сигнала. От датчика частоты вращения (энкодера) на два канала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) стенда поступают импульсные сигналы в виде групп прямоугольных импульсов «напряжение – время» в противофазе. Сигналы проходят через черные и прозрачные сектора оптического диска датчика. Сигнал u_{ni} , проходящий через прозрачный сектор (номинальный 8,1 В) на один канал АЦП, совпадает с сигналом u_{ci} , проходящим через черный сектор (номинальный 0 В) на второй канал. Рассчитывается разность этих сигналов, которая дает отфильтрованный сигнал:

$$u_{fi} = u_{ni} - u_{ci}, \quad (1)$$

Первый фильтр уменьшает влияние шума при измерениях, однако он не устраняет его полностью. Эффективность первого фильтра зависит от степени зашумленности (количества импульсов, числовые значения которых не соответствуют значениям импульсов без влияния шума). Чем больше степень зашумленности получаемого сигнала, тем менее эффективен этот способ фильтрации.

На рисунке 3 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после первой фильтрации шумов.

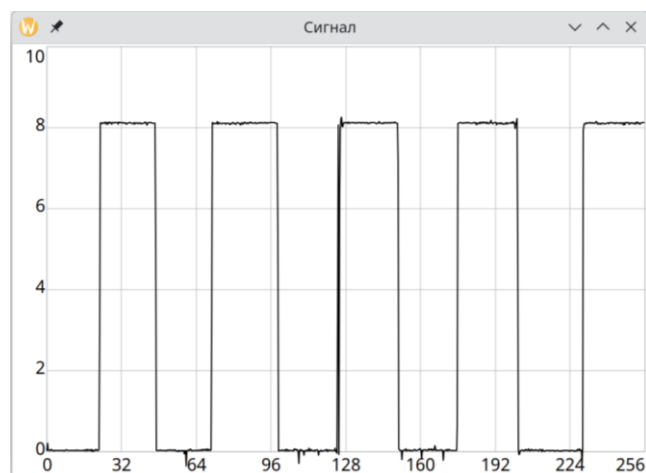


Рисунок 3 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после первой фильтрации шумов

График (рисунок 3) после первой фильтрации шумов показывает незначительные уменьшения случайных сигналов и мало отличается от графика без фильтрации на рисунке 2. Первый способ фильтрации для данной степени зашумленности оказался недостаточно эффективным и незначительно уменьшил влияние шумов на полезный сигнал.

Второй способ фильтрации сигнала. Устанавливаются верхняя и нижняя границы (горизонтальные линии) числовых значений импульсных сигналов ($u_{\text{вг}} = 7,5$ В и $u_{\text{нг}} = 0,5$ В) близкие к наибольшему и наименьшему номинальным значениям, определяемым датчиком частоты вращения. Если величина поступившего сигнала u_i с датчика на АЦП больше значения верхней границы $u_{\text{вг}}$, то числовое значение этого сигнала u_i приравнивается к числовому номинальному значению верхней границы ($u_{\text{вг}}^{\text{н}}$ = 8,1 В). Если величина поступившего сигнала u_i с датчика на АЦП меньше значения нижней границы $u_{\text{нг}}$, то числовое значение этого сигнала u_i приравнивается к числовому номинальному значению нижней границы ($u_{\text{нг}}^{\text{н}}$ = 0 В). Если сигнал находится между верхней и нижней границей, то его числовое значение u_i принимается равным числовому значению предыдущего сигнала u_{i-1} , равного $u_{\text{вг}}^{\text{н}}$ или $u_{\text{нг}}^{\text{н}}$:

$$\begin{cases} \text{если } u_i > u_{\text{вг}}, \text{ то } u_i = u_{\text{вг}}^{\text{н}}; \\ \text{если } u_i < u_{\text{нг}}, \text{ то } u_i = u_{\text{нг}}^{\text{н}}; \\ \text{если } u_{\text{вг}} < u_i < u_{\text{нг}}, \text{ то } u_i = u_{i-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Второй фильтр устанавливает для всех сигналов, поступающих с датчика частоты вращения, либо номинальное максимальное (8,1 В), либо номинальное минимальное (0 В) значение. Все сигналы принимают одно из двух значений, при этом выстраивается и многократно чередуется последовательность групп из номинальных максимальных и номинальных минимальных значений. Среди группы максимальных значений могут появляться случайные минимальные значения и наоборот, при этом остается зашумленность сигналов случайными максимальными и минимальными значениями «ложными сигналами», которые нужно отфильтровать.

На рисунке 4 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после второй фильтрации шумов.

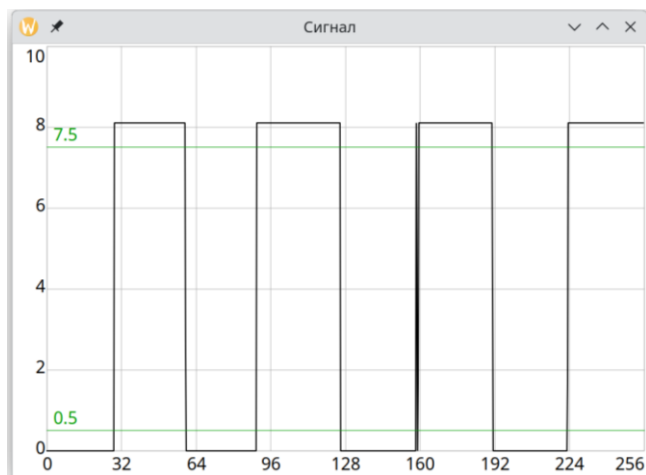


Рисунок 4 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после второй фильтрации шумов

Из графика (рисунок 4) видно значительное уменьшение случайных сигналов и соответственно уменьшение влияния шумов по сравнению с графиками на рисунках 2 и 3. Форма графика практически идеальная (рисунок 4), но на графике виден ложный сигнал в окрестности 160-го импульса из 256 показанных. Такие же случайные ложные сигналы проявляются за время следования всех импульсов за оборот выходного вала редуктора.

Третий способ фильтрации сигнала. Выбираются последовательно группы значений из трех, четырех, пяти, шести и семи им-

пульсных сигналов от начала следования импульсов со смещением на один импульс. Если крайние числовые значения группы u_1 и u_m оба минимальные (0 В) и равны u_0 или оба максимальные (8,1 В) и равны $u_{8,1}$, то числовые значения внутри группы u_i принимаются равными крайним значениям группы u_0 или $u_{8,1}$. Фильтрация группы из семи импульсных сигналов принята завершающей, т. к. после нее все случайные сигналы исключаются.

$$\begin{cases} u_1, u_2, u_3 \dots u_n, n = 7; \\ \text{если } u_1 = u_m = u_0, \text{ то } u_i < u_i < u_m, u_i = u_0; \\ \text{если } u_1 = u_m = u_{8,1}, \text{ то } u_i < u_i < u_m, u_i = u_{8,1}. \end{cases} \quad (3)$$

Оценка импульсных сигналов и кинематической погрешности редуктора после фильтрации шумов. На рисунке 5 показано окно разработанной программы с графиком импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда после третьей фильтрации шумов.

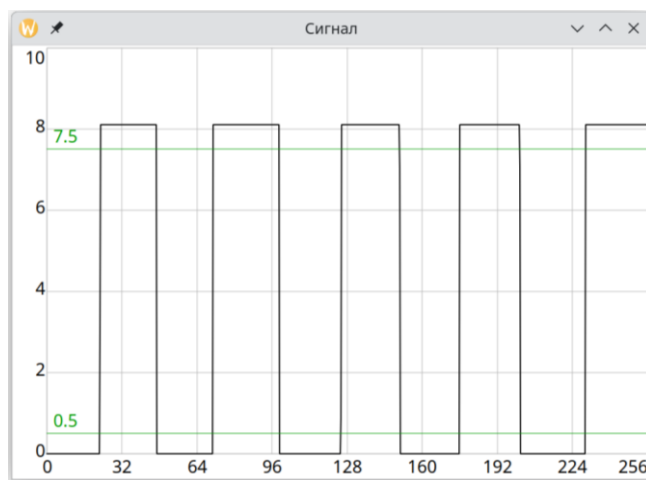


Рисунок 5 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после третьей фильтрации шумов

Из графика (рисунок 5) видно, что после третьего способа фильтрации шумов устранены, на графике нет случайных сигналов.

По численным значениям сигналов, полученных с энкодера и представленных на графике (рисунки 2–5), разработаны компьютерные программы для расчета кинематических параметров в виде угловых перемещений, угловых скоростей, передаточных отношений и кинематической погрешности редукторов. Кинематическая погрешность и ее гармонические составляющие характеризуют показатели точности передачи (редуктора), значения которых определяют при измерениях и контроле качества изготовления передачи и сравнивают со значениями ГОСТов [17–20].

На рисунке 6 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора, представленного на рисунке 1 без фильтрации шумов. Кинематическая погрешность и ее гармонические составляющие характеризуют показатели точности передачи (редуктора).

На графике (рисунок 6) кинематическая погрешность имеет высокочастотные шумы и график от нулевого значения уходит вверх и не возвращается в ноль, что объясняется накоплением импульсного шума. Наибольшая кинематическая погрешность (разность между наибольшим и наименьшим значением на графике) в данном случае составила 8,95 градуса. Она значительно превышает действительную кинематическую погрешность из-за наличия шумов. На амплитудно-частотном спектре кинематической погрешности редуктора видно большое количество гармоник небольшой амплитуды и большие значения амплитуд первых гармоник, что характеризует наличие импульсных шумов, которые создают ложные гармоники и увеличивают амплитуды действительных гармоник.

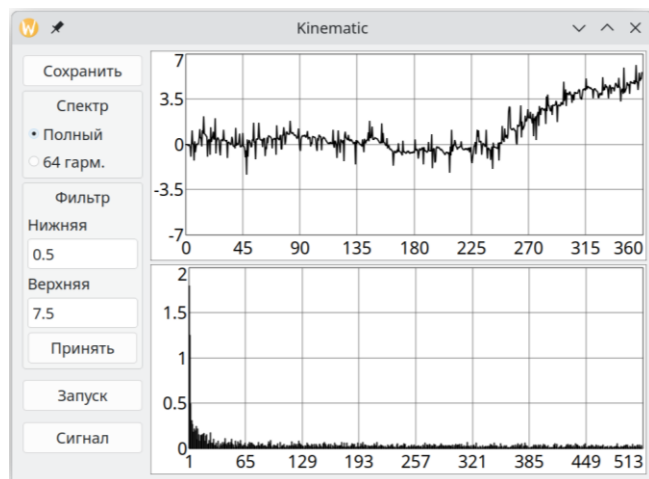


Рисунок 6 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора без фильтрации шумов

После применения первого способа фильтрации форма графика и его наибольшее значение мало изменились, наибольшая кинематическая погрешность при этом составила 8,39 градуса. На рисунке 7 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора после применения второго способа фильтрации шумов.

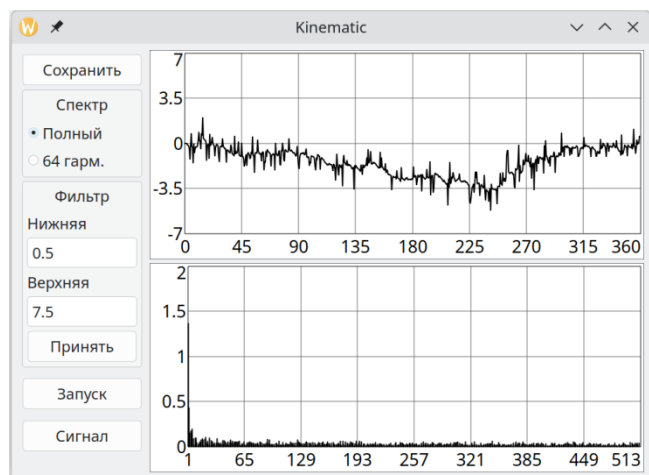


Рисунок 7 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после второй фильтрации шумов

График кинематической погрешности (рисунок 7) начинается и заканчивается нулевым значением, что характеризует отсутствие накопления и уменьшение импульсных шумов, при этом после второй фильтрации шумов уменьшилась наибольшая кинематическая погрешность редуктора, она составила 7,26 градусов. На амплитудно-частотном спектре заметно уменьшились амплитуды первых гармоник.

На рисунке 8 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и ее амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора после применения третьего способа фильтрации шумов, который после предыдущих двух способов окончательно устраняет шумы. На рисунке 8 представлены отфильтрованные графики кинематической погрешности и амплитудно-частотного спектра с действительными гармониками без влияния шума. Наибольшая кинематическая погрешность после применения третьего способа фильтрации составила 0,93 градуса.

Исследования показали, что при фильтрации шумов передач с понижением частоты вращения ведущего вала преобразователем частоты третий способ фильтрации является наиболее эффективным, однако первый и второй способы фильтрации подготавливают данные

для фильтрации сигналов третьим способом и поэтому необходимо использовать последовательно три способа фильтрации.

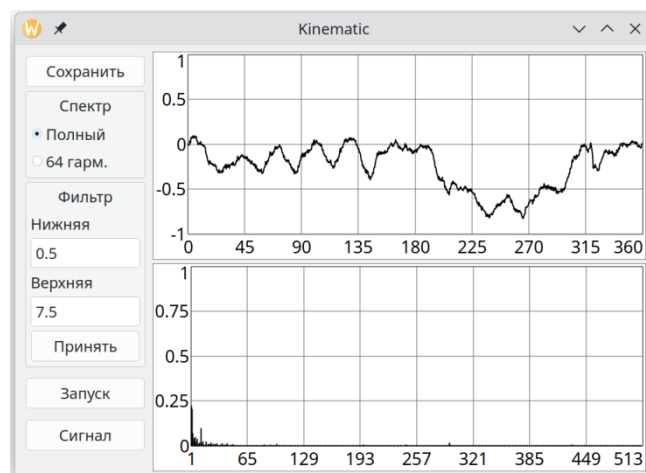


Рисунок 8 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после третьей фильтрации шумов

Форма графика, амплитудно-частотный спектр с гармоническими составляющими, значение наибольшей кинематической погрешности, изображенные на рисунке 8, представляют собой действительную кинематическую погрешность исследуемого планетарного редуктора с $i = 49$.

При исследованиях кинематических параметров редукторов с частотой вращения электродвигателя 1500 об/мин, соединенного с ведущим валом редуктора, без снижения частоты вращения ведущего вала редуктора и поэтому без применения преобразователя частоты, достаточно использовать только второй способ фильтрации, который полностью устраняет случайные сигналы.

На рисунках 9 и 10 показаны окна разработанной программы с графиками импульсных сигналов, полученных с энкодера специализированного стенда без фильтрации и после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин.

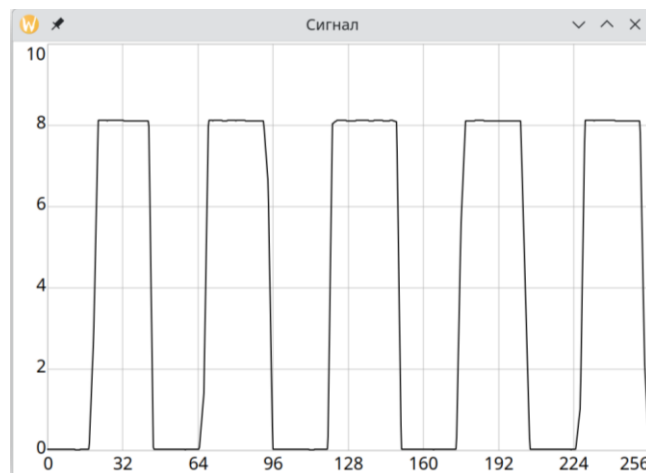


Рисунок 9 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимости напряжения от времени без фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

На графике (рисунок 9) видно, что без фильтрации сигнала, снимаемого с энкодера без регулятора скорости с частотой вращения электродвигателя и ведущего вала редуктора 1500 об/мин, есть случайные импульсы, искажающие прямолинейность трапецеидальных сигналов. При этом видна значительно меньшая зашумленность сигнала по сравнению с результатами, полученными при пониженной частоте вращения электродвигателя до 100 об/мин (рисунок 2).

На рисунке 10 представлено окно программы с отфильтрованным сигналом, с его прямолинейной формой, после использования второго способа фильтрации. Исследования показали, что без использования преобразователя частоты, создающего зашумление сигнала, первый и третий способы фильтрации не требуются, так как сигнал с энкодера в данном случае практически идет без шума и поэтому для устранения небольших шумов достаточно использовать только второй способ их фильтрации.

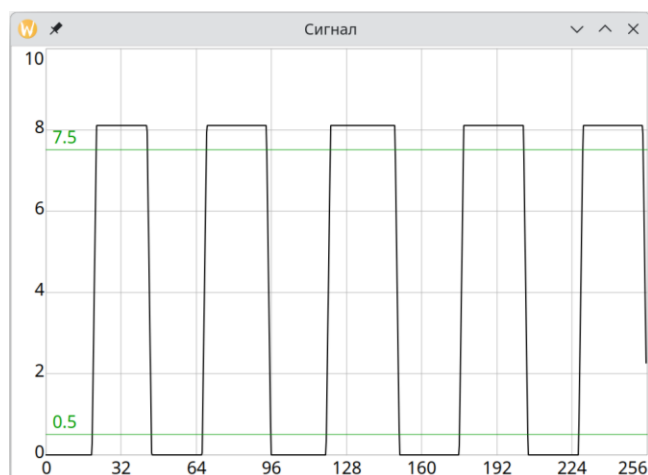


Рисунок 10 – Окно программы с графиком импульсных сигналов с зависимостью напряжения от времени после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

На рисунке 11 показано окно разработанной программы с графиками кинематической погрешности и амплитудно-частотного спектра исследуемого планетарного редуктора с частотой вращения ведущего вала 1500 об/мин без использования регулятора скорости после применения второго способа фильтрации шумов.

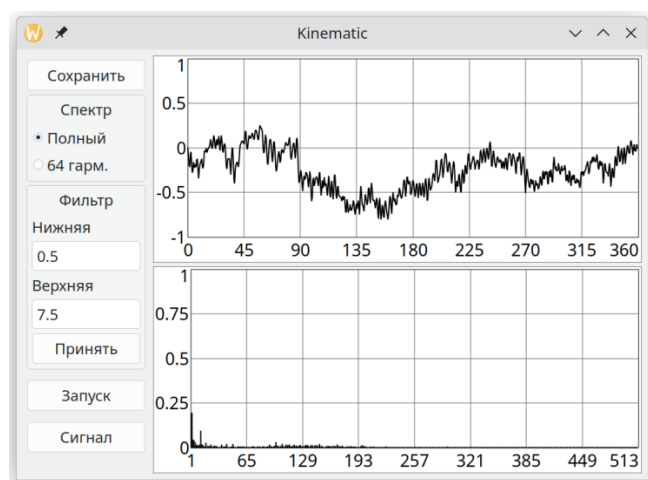


Рисунок 11 – Окно программы с графиком кинематической погрешности редуктора после второй фильтрации шумов при частоте вращения электродвигателя 1500 об/мин

Наибольшая кинематическая погрешность на графике (рисунок 11) составила 1,064 градуса и практически не учитывает влияние шумов. На графике, полученном с частотой вращения электродвигателя 1500 об/мин (рисунок 11), значения кинематической погрешности и местных кинематических погрешностей превышают значения, представленные на графике, полученном с частотой вращения электродвигателя 100 об/мин (рисунок 8), из-за увеличения частоты вращения валов редуктора.

Заключение

В результате исследований рассмотрены существующие средства испытаний и контроля редуцирующих механизмов. Описаны проблемы при разработке испытательных специализированных стендов и устройств, заключающиеся в зашумленности сигналов, поступающих с энкодеров, используемых в стендах для измерений и контроля кинематических параметров, представляющих показатели точности редукторов в сборе, с разной частотой вращения валов редуктора.

Разработаны и экспериментально апробированы способы устранения шумовых помех, идущих от преобразователя частоты. Эти способы заключаются в последовательной ступенчатой фильтрации сигнала от шума при измерениях с понижением преобразователем частоты скорости вращения электродвигателя испытательного стенда. Разработанные способы фильтрации сигнала на основе численных методов полностью устраняют шумовые помехи и позволяют рассчитать достоверные значения кинематических параметров редуцирующих механизмов на специализированных стендах. При этом разработанные программные способы фильтрации более эффективны и менее затратны, чем применяемые аппаратные средства многофункциональных стендов.

Проведенные исследования позволяют эффективно использовать разработанные способы фильтрации при контроле и испытаниях с разной частотой вращения валов после проектирования и изготовления любых типов редуцирующих механизмов для получения достоверных значений и высокоточных средств контроля.

Список цитированных источников

1. Jiangsu Lanmec Technology Co., Ltd. [сайт]. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_lanlingjidian/company_info.html?pv_id=1itkva893aa&faw_id=1itkvabds458 (дата обращения: 13.06.2025).
2. Стенд для испытания редукторов и трансмиссий. – URL: <https://www.atestman.com/product/reducer-and-transmission-test-bench-13.html> (дата обращения: 13.06.2025).
3. Повышение точности механических передач на основе компьютерного моделирования и использования технологий искусственного интеллекта: монография / В. М. Пашкевич, М. Ф. Пашкевич, Д. А. Забелин, Ю. В. Козлов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – 139 с.
4. Патент ВУ 4858, МПК G 01M 13/02. Стенд для контроля кинематической точности передач: № 19981066: заявлено 26.11.1998: опубл. 03.12.2002 / Пашкевич М. Ф., Герасченко В. В., Пашкевич В. М., Пашкевич А. М., Капитонов А. В.; заявитель Могилев. машин. ин-т. – 5 с.
5. Патент ВУ 4341, МПК G 01M 13/02. Устройство для контроля кинематической точности зубчатых передач: № 19980949: заявлено 21.10.1998: опубл. 30.03.2002 / Пашкевич М. Ф., Герасченко В. В., Пашкевич В. М., Пашкевич А. М., Капитонов А. В.; заявитель Могилев. гос. техн. ун-т. – 4 с.
6. Патент ВУ 24475, МПК G 01M 13/02 (2019.01). Устройство для определения значений кинематических погрешностей механической передачи: № 20220272: заявлено 31.10.2022: опубл. 20.12.2024 / Капитонов А. В., Пашкевич В. М., Капитонов О. А.; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – 5 с.
7. Патент ВУ 24474, МПК G 01M 13/02 (2019.01). Стенд для испытания механической передачи: № 20220271: заявлено 31.10.2022: опубл. 20.12.2024 / Капитонов А. В., Пашкевич В. М., Капитонов О. А.; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – 5 с.
8. Пашкевич, М. Ф. Стенды для испытания редукторов / М. Ф. Пашкевич, В. В. Герасченко. – Минск: БелНИИТИ, 1991. – 44 с.
9. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
10. Ивашко, А. В. Методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие / А. В. Ивашко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 233 с.
11. Капитонов, А. В. Кинематические и массогабаритные характеристики ресурсоэффективных механических передач. Компьютерное моделирование, экспериментальная оценка: монография / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 248 с.

12. Методы экспериментальных исследований кинематической точности планетарных передач с промежуточными телами качения и контроля профиля беговых дорожек / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50. – DOI: 10.53078/20778481.
13. Капитонов, А. В. Методы оценки точности малогабаритных планетарных передач с промежуточными телами качения / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. тр. / Объедин. ин-т машиностр. НАН Беларуси. – Минск, 2020. – Вып. 9. – С. 51–54.
14. Kapitonov, A. V. Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission. / A. V. Kapitonov // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 158. – P. 165-168. – DOI: 10.2991/avent-18.2018.32.
15. Капитонов, А. В. Совершенствование стенда и методики для контроля кинематических и точностных параметров редуцирующих механизмов / А. В. Капитонов, В. М. Пашкевич, О. А. Капитонов // Актуальные вопросы машиноведения: сб. тр. / Объедин. ин-т машиностр. НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Вып. 11. – С. 53–56.
16. Капитонов, А. В. Точность и контроль малогабаритных планетарных механизмов: монография / А. В. Капитонов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 160 с.
17. Марков, А. Л. Измерение зубчатых колес (допуски, методы и средства контроля) / А. Л. Марков. – Л. : Машиностроение, 1977. – 280 с.
18. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В. Е. Антонюк, В. Е. Старжинский, Е. В. Шалобаев [и др.]. – СПб. : ЦОП Профессия, 2007. – 832 с.
19. Капитонов, А. В. Исследование кинематической точности планетарных роликовых передач методами гармонического анализа и контроля в сборе / А. В. Капитонов, С. Г. Черняков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50. – DOI: 10.53078/20778481.
20. Исследование кинематической погрешности планетарного эксцентрикового редуктора / А. В. Капитонов, Д. В. Непша, М. В. Гончаров [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24. – DOI: 10.53078/20778481.
6. Patent BY 24475, MPK G 01M 13/02 (2019.01). Ustrojstvo dlya opredeleniya znachenij kinematicheskikh pogreshnostej mekhanicheskoy peredachi: № 20220272: zayavleno 31.10.2022: opubl. 20.12.2024 / Kapitonov A. V., Pashkevich V. M., Kapitonov O. A.; zayavitel' Belarus.-Ros. un-t. – 5 s.
7. Patent BY 24474, MPK G 01M 13/02 (2019.01). Stend dlya ispytaniya mekhanicheskoy peredachi: № 20220271: zayavleno 31.10.2022: opubl. 20.12.2024 / Kapitonov A. V., Pashkevich V. M., Kapitonov O. A.; zayavitel' Belarus.-Ros. un-t. – 5 s.
8. Pashkevich, M. F. Stendy dlya ispytaniya reduktorov / M. F. Pashkevich, V. V. Gerashchenko. – Minsk : BelNIINTI, 1991. – 44 s.
9. Gutnikov, V. S. Fil'traciya izmeritel'nyh signalov / V. S. Gutnikov. – L. : Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. – 192 s.
10. Ivashko, A. V. Metody i algoritmy cifrovoy obrabotki signalov: ucheb. posobie / A. V. Ivashko. – Har'kov : NTU «HPI», 2003. – 233 s.
11. Kapitonov, A. V. Kinematicheskie i massogabaritnye harakteristiki resursoeffektivnyh mekhanicheskikh peredach. Komp'yuternoe modelirovanie, eksperimental'naya ocenka: monografiya / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2017. – 248 s.
12. Metody eksperimental'nyh issledovaniy kinematicheskoy tochnosti planetarnykh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya i kontrolya profilya begovykh dorozhek / A. V. Kapitonov, S. G. Chemyakov, K. V. Saskovec, A. I. Kas'yanov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2016. – № 2 (51). – С. 41–50. – DOI: 10.53078/20778481.
13. Kapitonov, A. V. Metody ocenki tochnosti malogabaritnykh planetarnykh peredach s promezhutochnymi telami kacheniya / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. tr. / Ob'edin. in-t mashinostr. NAN Belarusi. – Minsk, 2020. – Vyp. 9. – С. 51–54.
14. Kapitonov, A. V. Optimization of geometrical parameters and estimation of kinematic accuracy of resource effective planetary transmission. / A. V. Kapitonov // Advances in Engineering Research. – 2018. – Vol. 158. – P. 165-168. – DOI: 10.2991/avent-18.2018.32.
15. Kapitonov, A. V. Sovershenstvovanie stenda i metodiki dlya kontrolya kinematicheskikh i tochnostnykh parametrov reduciuyushchikh mekhanizmov / A. V. Kapitonov, V. M. Pashkevich, O. A. Kapitonov // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sb. tr. / Ob'edin. in-t mashinostr. NAN Belarusi. – Minsk, 2022. – Vyp. 11. – С. 53–56.
16. Kapitonov, A. V. Tochnost' i kontrol' malogabaritnykh planetarnykh mekhanizmov: monografiya / A. V. Kapitonov. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2021. – 160 s.
17. Markov, A. L. Izmerenie zubchatykh koles (dopuski, metody i sredstva kontrolya) / A. L. Markov. – L. : Mashinostroenie, 1977. – 280 s.
18. Tekhnologiya proizvodstva i metody obespecheniya kachestva zubchatykh koles i peredach: uchebnoe posobie / V. E. Antonyuk, V. E. Starzhinskij, E. V. Shalobaev [i dr.]. – SPb. : COP Professiya, 2007. – 832 s.
19. Kapitonov, A. V. Issledovanie kinematicheskoy tochnosti planetarnykh rolkovykh peredach metodami garmonicheskogo analiza i kontrolya v sbore / A. V. Kapitonov, S. G. Chemyakov // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2011. – № 4 (33). – С. 40–50. – DOI: 10.53078/20778481.
20. Issledovanie kinematicheskoy pogreshnosti planetarnogo ekscentrikovogo reduktora / A. V. Kapitonov, D. V. Nepsha, M. V. Goncharov [i dr.] // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2014. – № 3 (44). – С. 14–24. – DOI: 10.53078/20778481.

References

1. Jiangsu Lanmec Technology Co., Ltd. [sait]. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_lanlingjidian/company_info.html?pv_id=1itkva893aa&faw_id=1itkvabds458 (data obrashcheniya: 13.06.2025).
2. Stend dlya ispytaniya reduktorov i transmissij. – URL: <https://www.atestman.com/product/reducer-and-transmission-test-bench-13.html> (data obrashcheniya: 13.06.2025).
3. Povyshenie tochnosti mekhanicheskikh peredach na osnove komp'yuternogo modelirovaniya i ispol'zovaniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta: monografiya / V. M. Pashkevich, M. F. Pashkevich, D. A. Zabelin, YU. V. Kozlov. – Mogilev : Belorus.-Ros. un-t, 2011. – 139 s.
4. Patent BY 4858, MPK G 01M 13/02. Stend dlya kontrolya kinematicheskoy tochnosti peredach: № 19981066: zayavleno 26.11.1998: opubl. 03.12.2002 / Pashkevich M. F., Gerashchenko V. V., Pashkevich V. M., Pashkevich A. M., Kapitonov A. V.; zayavitel' Mogilev. mashin. in-t. – 5 s.
5. Patent BY 4341, MPK G 01M 13/02. Ustrojstvo dlya kontrolya kinematicheskoy tochnosti zubchatykh peredach: № 19980949: zayavleno 21.10.1998: opubl. 30.03.2002 / Pashkevich M. F., Gerashchenko V. V., Pashkevich V. M., Pashkevich A. M., Kapitonov A. V.; zayavitel' Mogilev. gos. tekhn. un-t. – 4 s.

Материал поступил 17.06.2025, одобрен 27.06.2025, принят к публикации 28.06.2025