

Измерения дефектов формы с помощью кватернионных алгоритмов геометрического преобразования

К. Епифанцев, к. т. н.¹

УДК 006.1 | ВАК 2.2.4

В условиях непрерывного развития промышленности, разработки более точных приборов, машин в области электроэнергетики, авиационных высокоскоростных двигателей для повышения КПД необходимо стремиться к меньшим дефектам геометрии, меньшей шероховатости кинематических элементов, находящихся в зоне непосредственного контакта. Алгоритм фильтрации значений измеренного сечения детали применяется для анализа и выявления дефектов формы и снижения помех методических и систематических погрешностей оператора и внешней среды.

Исследования алгоритма фильтрации значений измеренного сечения детали и его последующий анализ для выявления дефектов формы и снижения помех от погрешностей оператора и внешней среды помогают разработать концепцию импортозамещенного аналога зарубежного прибора, при этом обеспечивается минимальная погрешность при измерении. В основе рассматривается теория кватернионов как система гиперкомплексных чисел, образующая векторное пространство.

Процесс измерения дефектов формы производится с помощью кругломеров, в основе которых лежит воздушный подшипник вращения, работающий от компрессора и вращающий и координатный стол, и контактный щуп, производящий сканирование детали в определенных сечениях для выявления дефектов геометрии. Развитие приборов данного класса разработки является главной задачей отечественного приборостроения. Программное обеспечение кругломера RoundPak имеет ряд фильтров, позволяющих достигнуть микронной точности на измерениях для определения микродефектов геометрии. Исследуемый прибор RoundTest RA-120P входит в состав лаборатории цифровой метрологии ФГАОУ ВО ГУАП [1, 2].

Увеличение кинематических подвижных пар элементов конструкции прибора, безусловно, увеличивает погрешность оборудования из-за постоянного люфта,

возникающего при юстировке и настройке оборудования, непостоянства момента затяжки фиксирующихся компонентов. Оценка кинематических пар в кругломере представлена на рис. 1.

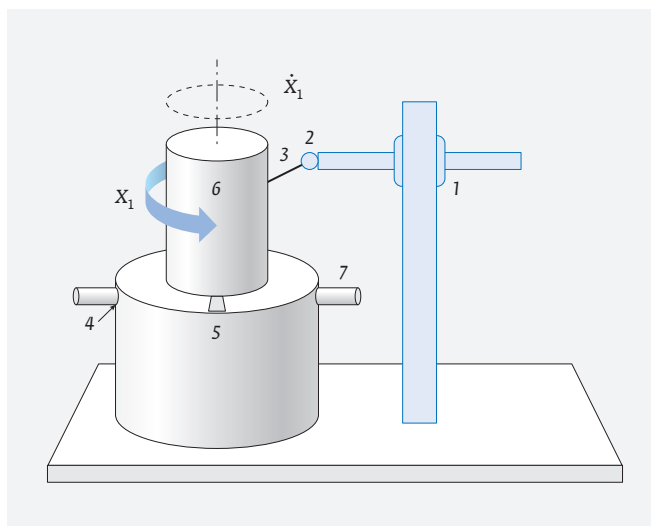


Рис. 1. Подвижные кинематические узлы кругломера Roundtest RA: 1 – подвижная консоль X и Z осей; 2 – подвижный элемент удержания датчика; 3 – подвижный щуп датчика; 4 – воздушные подшипники с пневмосистемой кругломера; 5 – трехкулачковый подвижный патрон; 6 – подвижная деталь, имеющая угловое ускорение при вращении стола X_1 и центр смещения масс G; 7 – подвижные микрометрические винты, используемые для выравнивания осей CX, CY, LX, LY

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия. Кафедра метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности, доцент, e-mail: epifancew@gmail.com.

В источнике [3], в трудах профессора Глухова В. И. подчеркивается, что предварительные измерения отклонений формы и положения поверхностей элемента должны предшествовать исследованиям точности размеров элементов, так как определяют выбор схемы измерения. Процесс контроля геометрических параметров по допускам ориентации, месторасположения и биения проходит согласно ГОСТ 53442-2015. По мнению авторов [4–6], процесс контроля дефектов геометрии должен быть в приоритете перед диаметральными и линейными измерениями. Важность данных измерений неоднократно подчеркивалась различными исследователями: так, в автореферате диссертации д. т. н. Глухова В. И. [7] отмечается большая роль координирующих размеров в системе координатных измерений, подчеркивается важность информативности баз, уход от излишнего базирования, которое может привести к потере точности на приборах и на высокоточных станках с ЧПУ. Принцип координирующих размеров также заложен и в базовом понятии TED (Theoretical exact dimension – теоретически точный размер) в метрологии – теоретически точного размера, ведущего к истокам ГОСТ 2.419-68 [8, 9].

В работе [10] описывается проблема оптических датчиков – наличие процента aberrаций, так называемого ореола, наложения бликов или алиасинга [11] вокруг измеряемого объекта. Ореол может быть вызван бликовыми свойствами различных марок сталей или радиозашумленностью лаборатории и заводского помещения. В процессе оценки систем сканирования иногда недостаточно базовой фильтрации сигнала. Также есть недостатки и у контактного датчика-щупа, который может изнашиваться, царапать деталь, на нем может оседать пыль, на него действует шероховатость детали. Сторонники лазерных датчиков добились существенных успехов при создании лазерных отечественных кругломеров [12]. И первый – контактный, и второй – бесконтактный методы имеют ряд положительных и отрицательных факторов. В исследовании авторов под руководством О. А. Заякина [12] изложен синергетический метод, необходимый как для контактных, так и для бесконтактных измерений дефектов геометрии. В исследовании [13] описывается новый подход к моделированию пространственных допусков, основанный на применении конфигурационных пространств, описываемых с помощью кватернионов.

Процессы формирования кватернионов могут быть положены в основу математического аппарата программного обеспечения приборов для контроля геометрических параметров как основные, наряду с уже существующими в программном софте RoundPak фильтрами Гаусса, формированием финального протокола через кардиоиду.

Система работы по выявлению компенсаций в кругломере на оси $CX-CY-LX-LY$ с учетом представления работы по методу кватернионов представлена на рис. 2.

Лорд Гамильтон в 19 веке представил научному миру кватернионы, которые в настоящее время имеют огромное значение для определения местоположения вращающихся тел. Кватернионы, по мнению автора статьи, неразрывно связаны с алгоритмом работы прибора для измерения отклонения от заданной геометрии – кругломера. Сумма скаляра (он учитывает в детали, установленной на кругломере, массу и диаметр детали) и вектора (учитывает ускорение детали при повороте, а значит дефекты формы, которые оператор не может обнаружить, не вращая деталь) – это отклонение от цилиндричности, круглости, осевое биение. Согласно [14], повороты объекта определяются как изменение положения осей системы координат $X_1Y_1Z_1$, связанной с отражателем, относительно осей неподвижной приборной системы координат XYZ . Авторы в исследовании [15] утверждают, что вращение произвольной точки твердого тела вокруг оси, проходящей через неподвижную точку с единичным направляющим вектором – это преобразование пространства, при котором все точки на оси остаются неподвижными, а остальные точки перемещаются в плоскостях, перпендикулярных этой оси по дугам окружностей с одним и тем же углом j . Это определение и является описанием кватерниона. Другими словами, приборы, основанные на измерении объекта, которое возможно только при его вращении, описываются кватернионами как наиболее точные научно доказанные способы описания алгоритмов ныне существующих приборов. Возможно их применение для создания приборов нового типа. Важно, что действия алгебры между статическими скалярными величинами (длина отрезка, объем, масса) и активными

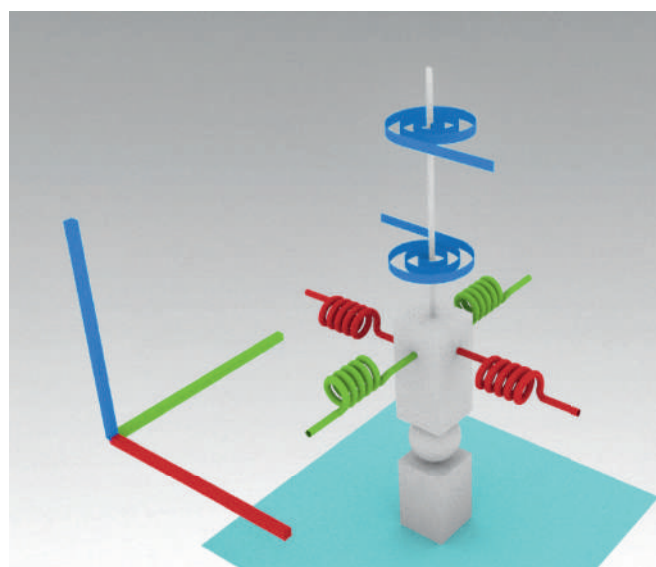


Рис. 2. Модель кватернионов при измерении параметров вращаемой детали

векторными (ускорение, сила, и пр.) являются сложным измерительным процессом, без которого, однако, не удастся проконтролировать базовые параметры допусков формы, ориентации, месторасположения и биения согласно ГОСТ 53442-2015.

РАСЧЕТ

Расчет основан на применении системы комплексных чисел и комплексной плоскости в трехмерном пространстве.

Кватернионы имеют следующий обобщенный вид [16]:

$$Q = s + xi + yj + zk; \quad s, x, y, z \in \mathbb{R}, \quad (1)$$

где в соответствии с выражением Гамильтона

$$i^2 = j^2 = k^2 = i \cdot j \cdot k = -1; \quad (2)$$

$$i \cdot j = k; \quad j \cdot k = 1; \quad k \cdot i = j; \quad (3)$$

$$j \cdot i = -k; \quad k \cdot j = -i; \quad i \cdot k = -j. \quad (4)$$

Отметим, что отношения между i , j и k аналогичны правилам векторного умножения единичных декартовых векторов.

$$x \cdot y = z; \quad y \cdot z = x; \quad z \cdot x = y; \quad (5)$$

$$y \cdot x = -z; \quad z \cdot y = -x; \quad x \cdot z = -y. \quad (6)$$

Гамильтон сделал вывод: мнимые числа i , j и k можно применять для выражения трех декартовых единичных векторов i , j , и k с теми же свойствами мнимых чисел, так что

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1. \quad (7)$$

Кругломер является интеллектуальным устройством, преобразующим движение щупа по вращающейся детали в круглограмму, которая удобно воспринимается оператором. Но перед этим в приборе происходит глубокая фильтрация и преобразование сигнала.

Траектория движения точки, находящейся на вращающейся детали, может быть описана кватернионами Гамильтона.

Эволюция декартовых координат в кватернионы Гамильтона [16] представлена на рис. 3.

В соответствии с теорией Гамильтона, процесс разложения координат дает возможность учитывать микронные доли при исследовании микрогеометрических дефектов.

В исследовании [17] в аспекте погрешностей лазерных сканирующих элементов измерительных приборов данные математического аппарата представлены формулой,

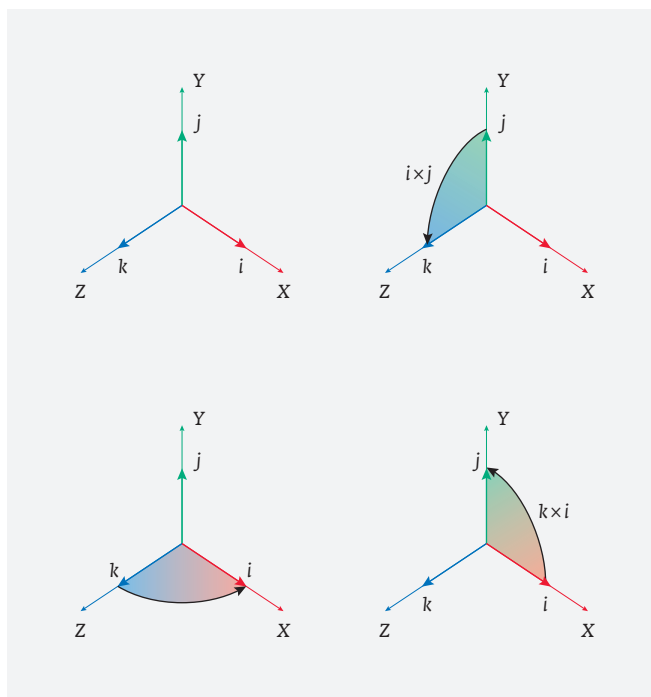


Рис. 3. Эволюция координат с учетом введенных орт Гамильтона

которая также связана системой кватернионов. И так, движение выходного вектора A сканирующей системы (кватернион элемента сканирования) можно представить в виде:

$$\bar{A} = \sum_{m=1}^N (\bar{Q}_m) \cdot (\bar{A}_m) \cdot (Q_m), \quad (8)$$

$$\text{где } Q_m = \cos \frac{\Phi_m}{2} + \cos \Delta (\bar{e}_m \cdot \bar{i}_1) \cdot \sin \frac{\Phi_m}{2} i + \cos \Delta (\bar{e}_m \cdot \bar{i}_2) \cdot \sin \frac{\Phi_m}{2} j + \cos \Delta (\bar{e}_m \cdot \bar{i}_1) \cdot \sin \frac{\Phi_m}{2} k, \quad (9)$$

где \bar{Q}_m – сопряженный кватернион Q_m ;

\bar{A}_m – промежуточный входной вектор элемента сканирования;

N – количество элементов сканирования в системе;

\bar{e}_m – единичные орты;

$\frac{\Phi_m}{2}$ – половина угла поворота элемента сканирования.

В данной формуле также учитывается дисторсия как один из элементов возмущающего эффекта сканирующей системы [16].

Этапы трансформации координатной системы при введении комплексных чисел представлены на рис. 4, а на рис. 5 – этапы трансформации координатной системы при повороте кватернионов [16].

В реальности при измерении биения детали на кругломере наблюдается аналогичное представление круглограммы (рис. 6).

В работе [18] рассматривается проблема конечной и истинной координаты поворота точек изделия в качестве уравнения Родрига – Гамильтона. Для улучшения фильтрации полученных данных необходимо применить кинематические уравнения и дополнить их динамическими уравнениями вращательного движения твердого тела

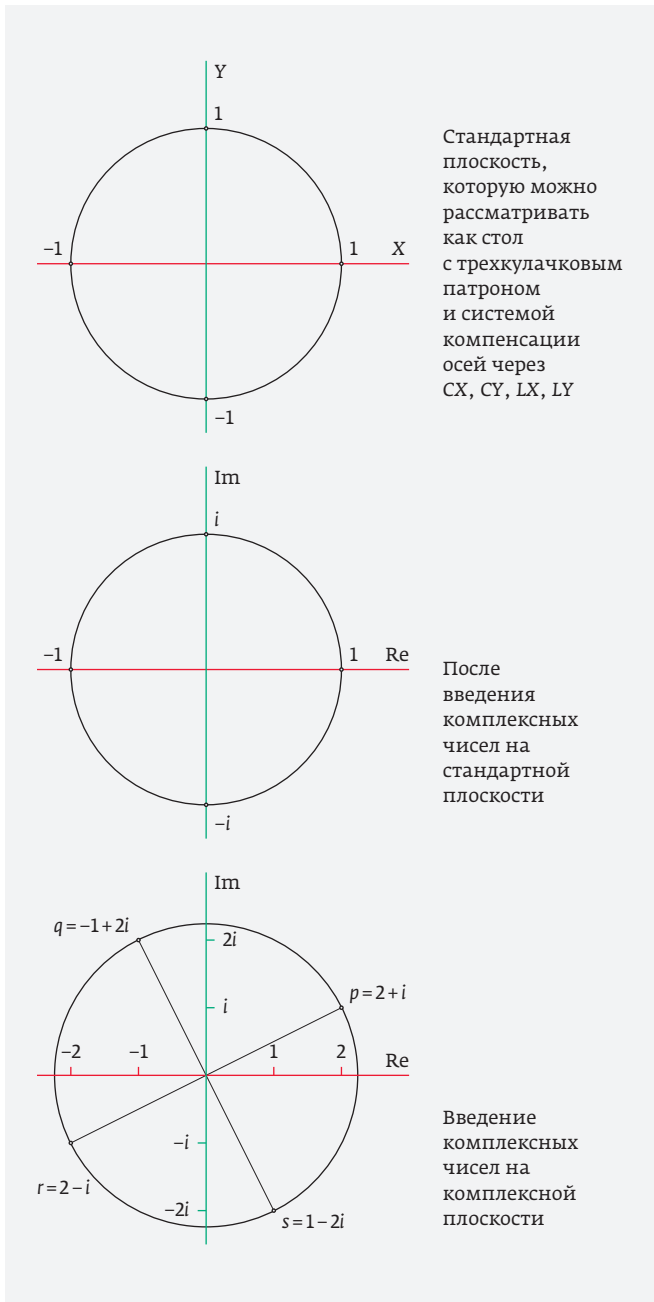


Рис. 4. Этапы трансформации координатной системы при введении комплексных чисел

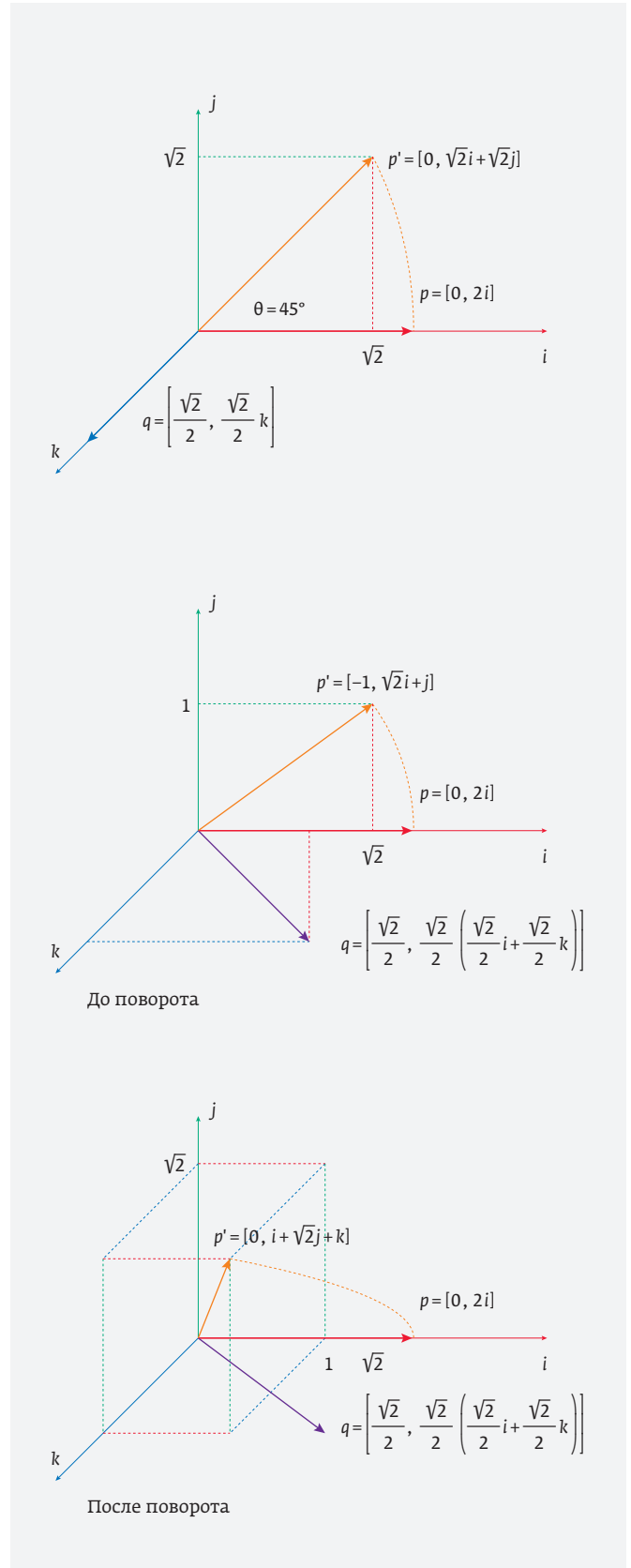


Рис. 5. Этапы трансформации координатной системы при повороте кватернионов

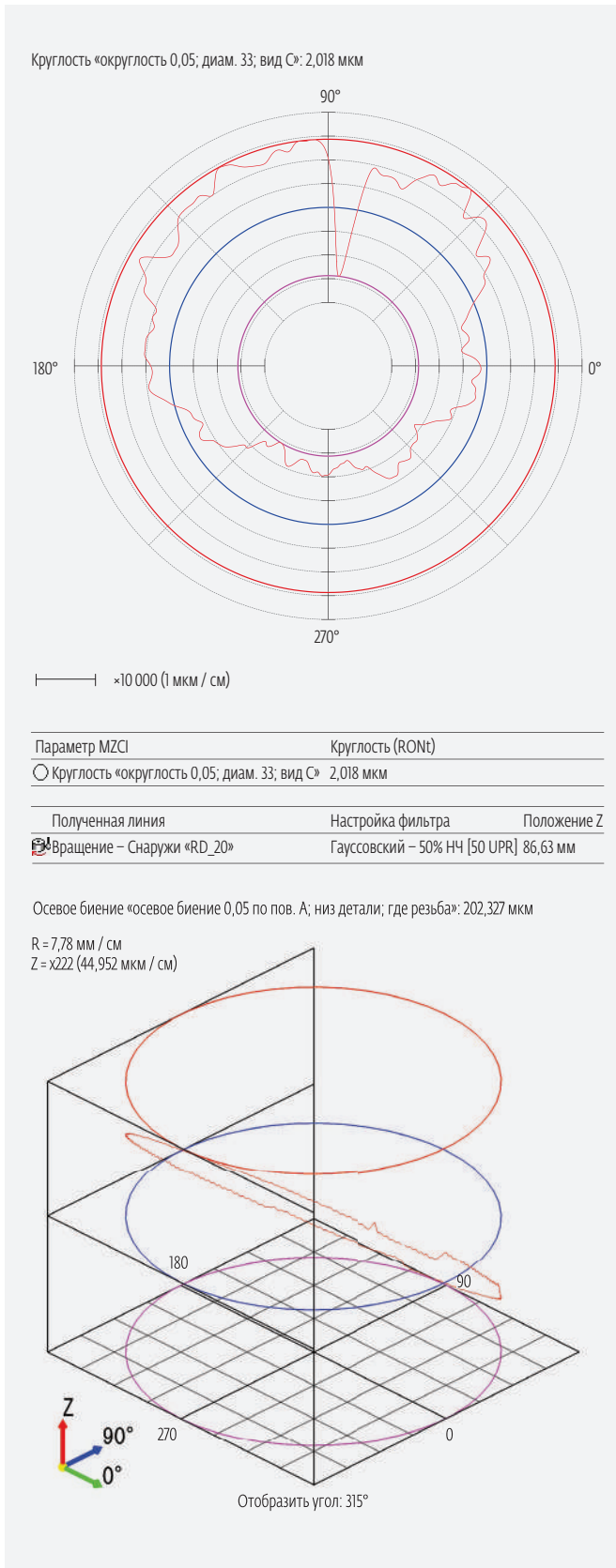


Рис. 6. Круглограмма при измерении биения детали на кругломере

в системе координат, связанной с телом, центр которого находится в центре инерции тела.

$$T\omega + \omega \times T\omega = M, \quad (10)$$

где T – тензор инерции твердого тела;

ω – угловая скорость;

M – момент внешних сил, приложенных к телу.

Далее получим систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} T\omega + \omega \times T\omega = M; \\ \lambda_0 = -\frac{1}{2}(\omega, \lambda); \\ \lambda_0 = -\frac{1}{2}(\omega\lambda_0 - \omega \cdot \lambda). \end{cases}$$

Система графического представления Родрига – Гамильтона, применимая для анализа алгоритма формирования круглограммы в кругломере, представлена на рис. 7.

В исследовании [19] отмечается важная корреляция между кватернионами и углами Эйлера. Предположим, если обозначить начальную систему координат x, y, z , а конечную X, Y, Z , то пересечение координатных плоскостей xy и XY называется линией узлов N . На рис. 7б представлены углы Эйлера: угол α между осью x и линией узлов – угол прецессии. Угол β между осью z и Z – угол нутации. Угол γ между осью X и линией узлов – угол собственного вращения.

В ряде исследований [20, 21] подчеркивается важность применения алгоритма расчета поворота тела в пространстве по методу Гамильтона, поскольку это позволяет выявить микролюфты шарниров и других кинематических областей в робототехнике, точных системах позиционирования объектов. В процессе проведения измерений, как правило, учитываются базовые координаты и вращения в этих осях, что в сумме дает нам шесть степеней свободы, теоретически – провокаторов погрешностей

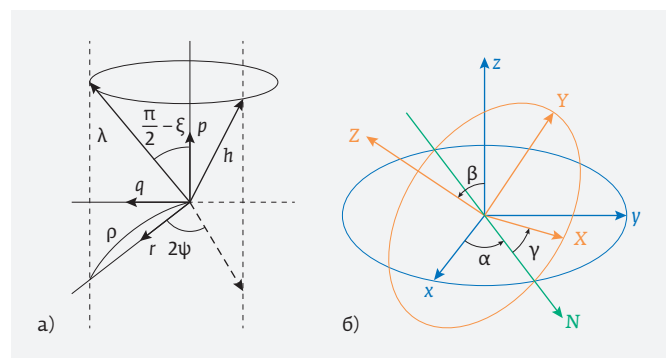


Рис. 7. Система графического представления Родрига – Гамильтона: а – поворот вектора на угол 2ψ ; б – углы Эйлера

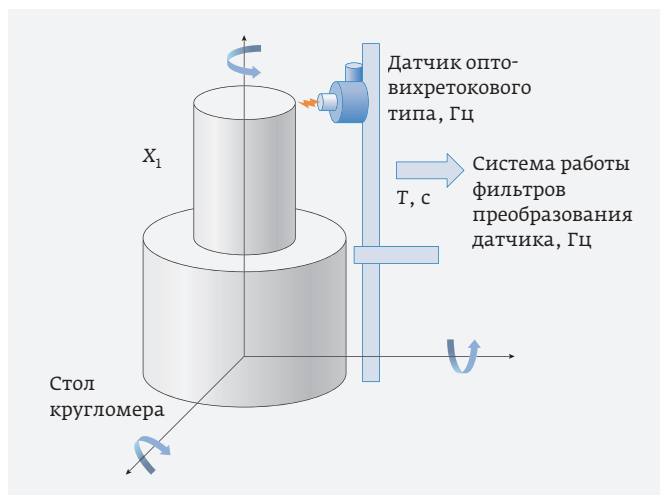


Рис. 8. Фильтры и координатные шумы, действующие на кругломер в процессе измерения

и микролюфтов. В работе [21] указывается на необходимость использовать теорию Гамильтона в некоторых четырех осях R^4 векторов $q = (t, x, y, z)$, где четвертой осью является время, которое в свою очередь изменяет базовые условия измерений – за несколько минут в лаборатории меняется погода, вибрация, изменяются параметры напряжения в сети, и, следовательно, две равные детали, измеренные на одном приборе, но в разные промежутки времени, могут иметь немного разные результаты измерений.

Работа на предприятии спланирована в несколько смен и невозможно предусмотреть измерения на кругломере по теории Гамильтона только в одно и то же время (рис. 8). Данные временные промежутки вполне могли быть описаны Гамильтоном с учетом нормирования некоей величины, содержащей в своем составе время. В кругломере Roundtest данная характеристика представлена параметром частоты фильтров в герцовом диапазоне, в которых есть связь со временем, как $1/c = \text{Гц}$. Учитывая этот факт, необходимо подчеркнуть обязательное наличие на датчике фильтров из ряда конденсаторных или диодных мостов, стабилизированных под скачки напряжения для уменьшения внешних помех. Именно данный параметр будет учитывать временную составляющую в работе кругломера. Стабилизация сигнала во многом улучшает процесс передачи измерительной информации. Был исследован стандартный блок питания кругломера (рис. 9). На рис. 10а представлена осциллограмма входного напряжения с помеховыми элементами в виде локальных столбцов, на рис. 10б – осциллограмма без помеховых элементов.

Это свидетельствует о стабилизации напряжения, снятии дополнительных помех микросхемой LM317T, уменьшении риска развития шумов и различных элементов, увеличивающих развитие метрологических отказов.

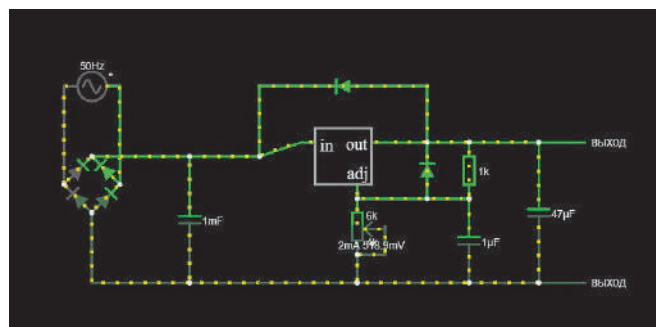


Рис. 9. Пример схемы блока питания кругломера в программе FALSTAD

Программное обеспечение FALSTAT является открытым программным ПО, которое может применяться для решения различных задач в области схемотехники и проведения исследований. Исследование данной схемы проводилось в программе FALSTAD [22]. Моделирование приведено на рис. 9 Представленная система помехоподавления визуализирует теорию Гамильтона о влиянии временного промежутка на результат измерения.

Важными составляющими высокоточного прибора являются не только контактные щупы, но и математические фильтры компенсации и введения поправок, способные даже в условиях вибрации, большой запыленности, разнородности используемых марок сталей произвести изначальное эталонное центрирование детали, а затем, отталкиваясь от данного результата, получить конечное заключение по годности или негодности детали. Из приведенного выше исследования можно сделать вывод о применении

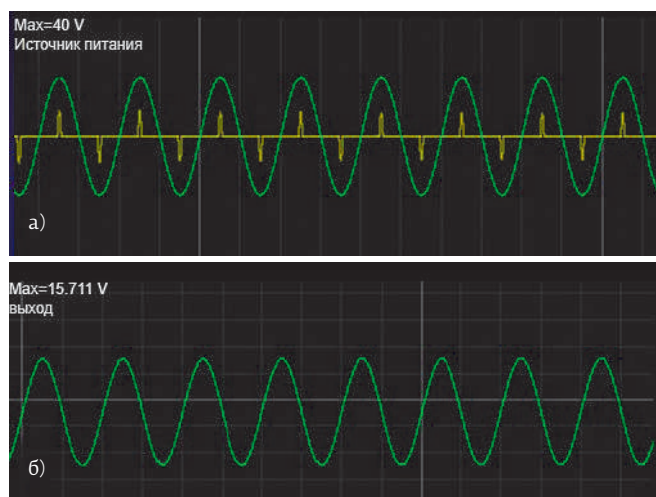



Рис. 10. Осциллограмма входного напряжения с помеховыми элементами (а) после стабилизации напряжения микросхемой LM317T (б)

принципа кардиоиды [23], использования кватернионов Гамильтона, уравнения Родрига – Гамильтона, углов Эйлера как основополагающих элементов синтеза снимаемых щупом кругломера данных с детали, независимо от контактного или бесконтактного метода сканирования детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виды видеоизмерительных систем M-Solutions. Электронный ресурс. URL https://mitutoyo.ru/ru_ru/products/vision-measuring-systems. Дата обращения 25.02.2022.
2. **Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.** Цифровая метрология: учеб.-метод. пос. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
3. **Глухов В. И.** Повышение точности измерений в машиностроении на основе введения новых комплексных показателей действительных размеров деталей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 1998. 319 с.
4. **Сурков И. В., Волков Д. А.** Развитие координатной метрологии в России // В сб.: Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Уфа, 2018. С. 322–327.
5. **Глухов В. И., Златкина О. Ю., Ивлева И. А.** Геометрические характеристики изделий. Базы и координатные системы. Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 1. С. 285–290.
6. ISO 5459 Geometrical product specifications. ISO 5459:2011 Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems.
7. **Глухов В. И.** Повышение точности измерений в машиностроении на основе введения новых комплексных показателей действительных размеров деталей. Автореферат диссертации доктора технических наук. М., 1998, 35 с.
8. ГОСТ 2.419-68. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения документации при плановом методе производства. Стандартиформ, 1968.
9. **Епифанцев К. В.** Интерпретации системы координирующих размеров и размерных элементов в конструкторской документации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 6 (104). С. 52–55.
10. **Кунделева Н. Е.** Создание автоматизированного метода расчета допусков на конструктивные элементы центрированных оптических систем со сферическими и плоскими поверхностями. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Л., 1982.
11. **Лесников В. А., Наумович Т. В., Частиков А. В.** Восстановление аналитического сигнала, искаженного алиасингом первого порядка // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 3. С. 194–200.
12. **Заякин О. А., Манухин А. В., Ростов А. А.** Экспериментальный лазерный кругломер, исследование основной погрешности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 6. С. 184–188.
13. **Гаер М. А.** Разработка и исследование геометрических моделей пространственных допусков сборок с использованием кватернионов. Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. Иркутск, 2005.
14. **Хоанг ван Фонг, Коняхин И. А.** Анализ погрешности измерения параметров поворота объекта методом автоколлимации с помощью компьютерных моделей на основе кватернионов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 12. С. 1157–1160
15. **Мисюра Н. Е., Митюшов Е. А.** Кватернионные модели в кинематике и динамике твердого тела. Учебное пособие. Мин-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 2020. 120 с.,
16. Электронный ресурс <https://habr.com/ru/post/426863/> Дата обращения 04.12.2022.
17. **Суборов К. Г., Ларченко Ю. В.** Использование кватернионов в методике расчета искажений в лазерных угловых сканирующих системах // В сб.: Квантовая электроника. Материалы XI Международной научно-технической конференции. 2017. С. 18–19.
18. **Ле Т.** Использование кватернионов для описания вращательного движения // Современные научные исследования и разработки. 2019. № 1 (30). С. 633–644.
19. **Окатов Д. А., Минеева Т. А.** Применение кватерниона в компьютерной графике // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 61–15. С. 86–90.
20. **Цегельник В. В., Стародубец А. С.** Кватернионы, их представление и применение. Кватернионы и повороты пространства // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 6 (42). С. 400–402.
21. **Королев В. С.** Возращение пространства и поворот времени. Инновации в науке. 2016. № 8 (57). С. 14–22.
22. Электронный ресурс Программа для моделирования URL <https://falstad.com/circuit/circuitjs.html> Дата обращения 12.11.2022.
23. **Захаров О. В., Пугин К. Г.** Выбор опорных окружностей при анализе круглости деталей подшипников качения. Измерительная техника. 2022. № 2. С. 14–21.

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные
для поверхностного
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Керамические конденсаторы до 100 мкф
- Синфазные дроссели на ток 10 А



Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780



ЭЛЕКТРО

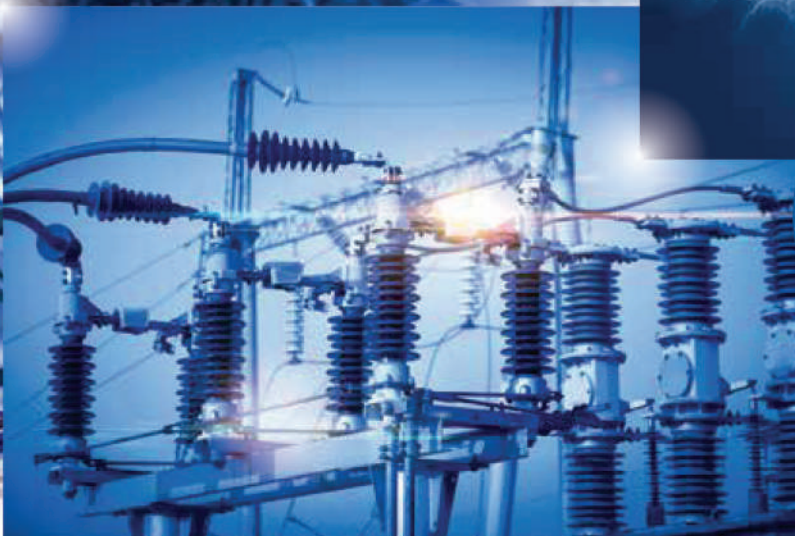
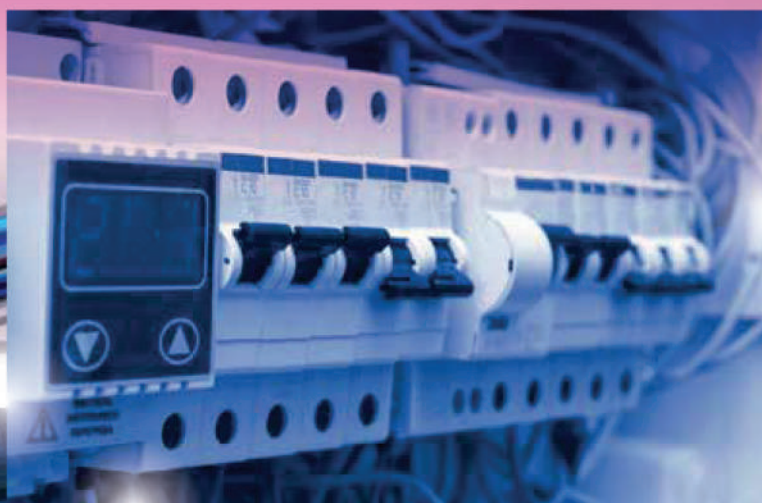
МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



31-я международная выставка
«Электрооборудование. Светотехника.
Автоматизация зданий и сооружений»

6–9 ИЮНЯ 2023

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР» • WWW.ELEKTRO-EXPO.RU



**ЭЛЕКТРО
МАРКЕТ**
ВАЖНЫЕ СВЯЗИ
ДЛЯ ВАЖНЫХ ДЕЛ



**ЭЛЕКТРО
ОБЩЕНИЕ**
РАЗГОВОРЫ
С ТОЛКОМ



**ЭЛЕКТРО
НАВЫКИ**
ПРОКАЧАЙ НАВЫКИ
И КОМПЕТЕНЦИИ

Присоединяйтесь!
Сканируйте QR-код и переходите на сайт выставки



Реклама

12+

 **ЭКСПОЦЕНТР**