

УДК 629.7.036.7

## **Метод дистанционного измерения профиля керамических колец холловского двигателя.**

А. И Севостьянов

### **Аннотация**

В данной статье предлагается реализация метода оптической триангуляции для дистанционного измерения профиля керамических колец холловского двигателя, позволяющая сократить материальные и временные затраты на прохождение ресурсных испытаний.

### **Ключевые слова:**

холловский двигатель; ресурсные испытания.

### **Введение**

Ресурс холловского двигателя (ХД) является одной из важнейших его характеристик и составляет порядка нескольких тысяч часов. Поскольку в наземных условиях для нормальной работы этого типа двигателей необходимо сложное и дорогостоящее экспериментальное вакуумное оборудование, то подтверждение этой характеристики становится очень затратным. На этапе отработки для сокращения затрат проводят укороченные ресурсные испытания (500..1000 часов), а реальный ресурс двигателя предсказывают, основываясь на динамике эрозии керамических колец разрядной камеры. Измерение профилей колец производят в атмосфере и эта процедура занимает значительное количество времени (от остановки двигателя до следующего старта может проходить до двух суток). Кроме того, изменение внешних условий во время ресурсных испытаний может отражаться на характеристиках двигателя. Поэтому для устранения влияния атмосферы и снижения временных затрат на ресурсные испытания существует необходимость в измерении профилей изоляторов непосредственно внутри вакуумной камеры без её вскрытия.



## 1. Выбор принципа и методики измерения

Предлагаемая методика основана на принципе оптической триангуляции, который широко используется в современных лазерных приборах для определения расстояния до объекта либо измерения профиля его поверхности. Суть метода описана ниже.

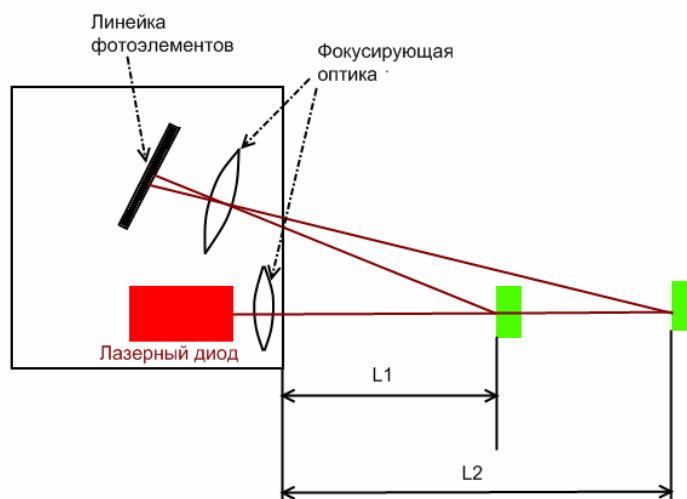


Рис.1. Схема оптической триангуляции

Источник лазерного излучения проецирует на измеряемом объекте световую точку (рис. 1). Диффузно отраженный свет, проходя через фокусирующую оптику, формирует световое пятно на линейке фотоэлементов. При смещении объекта относительно измерительного прибора происходит смещение этого пятна на линейке фотоэлементов и изменение электрического сигнала, получаемый с линейки фотоэлементов. Далее для непосредственного измерения расстояния необходимо откалибровать прибор.

Если вместо точечного лазера использовать генератор линии и линейку фотоэлементов заменить на матрицу, тогда вместо координаты одной точки мы получим профиль поверхности (рис.2).

Лазерные индикаторы обладают высокой точностью (до 1 мкм), но для измерения профиля необходимо использовать механическую систему перемещения индикатора такого же класса точности, что крайне усложняет всю систему в целом.

Недостаток профилометров состоит в их низкой точности измерения (порядка  $\pm 50$  мкм. на рабочем участке в 50 мм) и неприспособленности к работе в вакууме, из-за наличия герметичных полостей в составе прибора, нарушение целостности которых может привести

к выводу из строя прибора. Производитель не гарантирует корректную работу прибора в условиях высокого вакуума. Кроме того, применение стандартного профилеметра не снимает проблемы его точного позиционирования относительно измеряемого объекта.

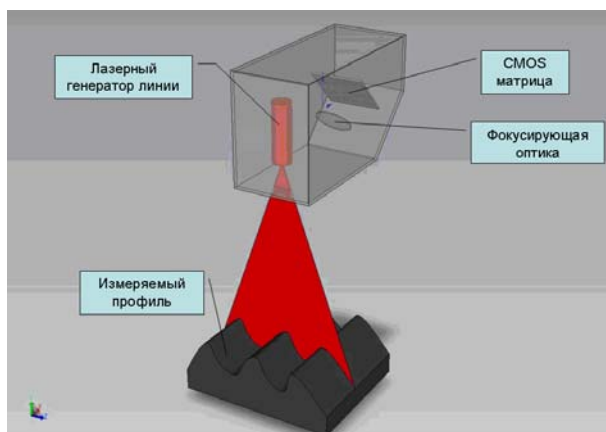


Рис. 2. Схема лазерного профилеметра

(CMOS - Complementary-symmetry/metal-oxide semiconductor,  
перевод: комплементарная логика на транзисторах металл-оксид-полупроводник)

Для устранения недостатка существующих схем измерения профиля была предложена оригинальная методика, суть которой состоит в следующем:

- 1) Лазерная линия, спроецированная на керамическое кольцо ХД, фотографируется под произвольным углом, но так, чтобы на снимке отображался след линии на разрядной камере и магнитном полюсе (рис.3).

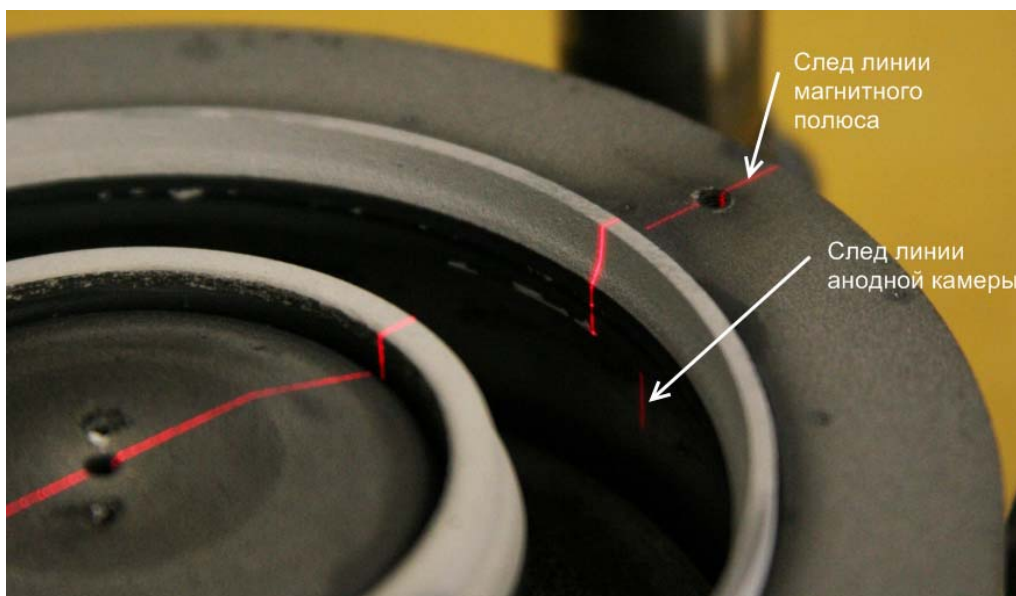


Рис. 3. Фотография проекции лазерной линии на ХД

Для упрощения дальнейшей обработки изображения снимок делается в темноте (рис.4).



Рис.4. Рабочий снимок для измерения профиля внешнего кольца ХД

2) Строится вспомогательный параллелограмм для определения узловых точек. Вспомогательный параллелограмм строится относительно линий АБ и СД, которые, из-за геометрических особенностей двигателя, параллельны соответствующим сторонам профиля кольца до начала распыления (рис.5).

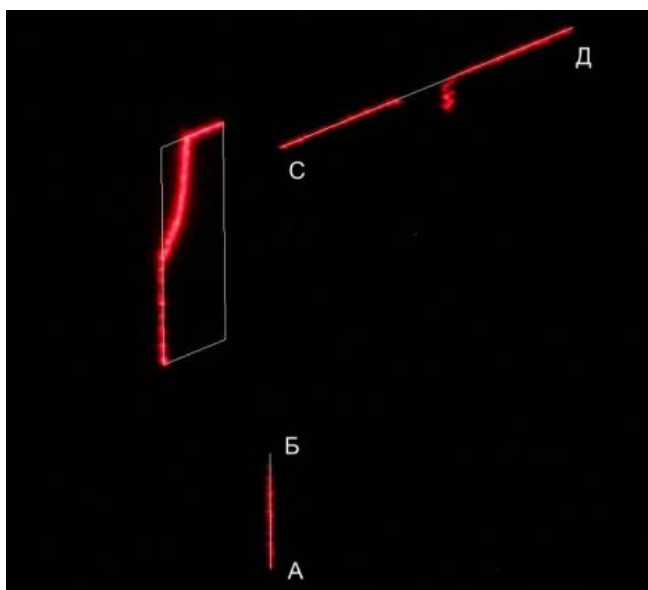


Рис. 5. Вспомогательные построения

3) Узловым точкам присваиваются координаты, пропорциональные габаритным размерам кольца до начала распыления, после чего изображение трансформируется для получения вида профиля кольца в плане (рис.6).

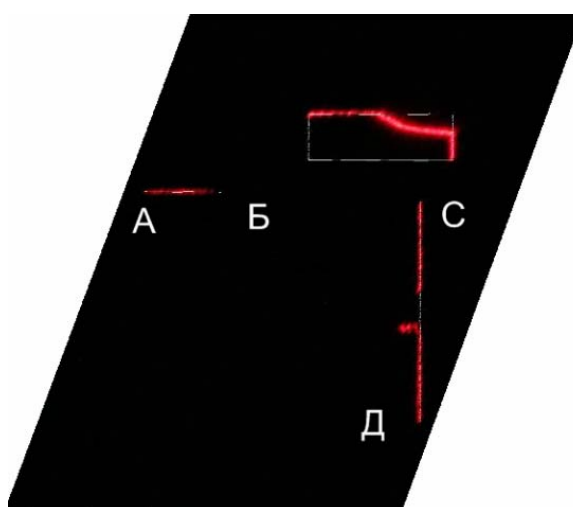


Рис. 6. Трансформированное изображение

4) После этого необходимо получить осреднённую кривую профиля. Осреднение необходимо проводить вдоль направления, указанного на рис. 10. Чтобы облегчить алгоритм осреднения изображение необходимо развернуть на такой угол, чтобы указанное направление стало вертикальным (рис. 7).

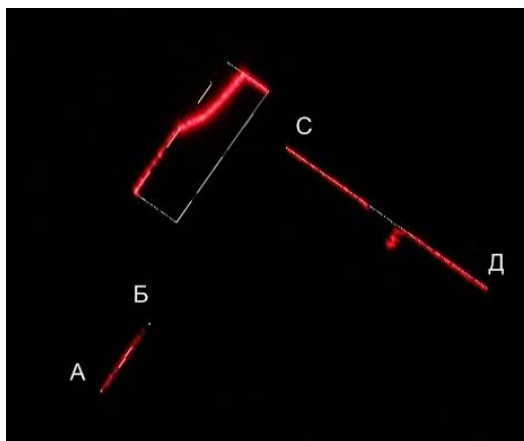


Рис. 7. Повернутое изображение

5) Координаты засвеченных пикселей записываются в отдельный массив данных и осредняются вдоль вертикальной составляющей.

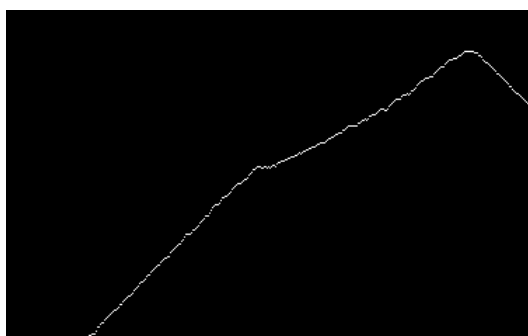


Рис. 8. Результат осреднения

6) Профиль разворачивается обратно на тот же угол (рис. 9).

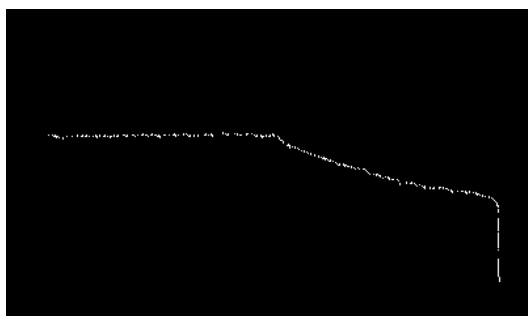


Рис. 9. Развернутый профиль

7) Полученные координаты профиля, выраженные в пикселях, пересчитываются в единицы длины (миллиметры).

Отличием предложенной методики от использующейся в профилометрах (когда каждому пикселу матрицы соответствуют определенные координаты профиля) является произвольный угол фотографирования, что позволяет получать результаты без изготовления специального приспособления для точного позиционирования фотоаппарата относительно лазерного модуля. Минусом данного метода является необходимость предварительного

измерения габаритов кольца для последующего масштабирования изображения. При работе с одним двигателем габаритные размеры колец ХД после изготовления известны и поэтому эта особенность не является недостатком.

Отработка предложенной методики была проведена с использованием лазерного генератора линии (фирма-производитель Sean&Stephen, модель S-7) и цифрового зеркального фотоаппарата (фирма-производитель - Canon, модель - 20D) на двигателях со средней линией разрядного канала 60 и 88 мм.



Рис. 10 Внешний вид лазерного модуля

Характерной особенностью данного лазерного модуля является отсутствие ручной фокусировки. Минимальная толщина лазерной линии (около 1 мм) получается на расстоянии порядка 0,8 метра, в связи с чем приходилось располагать лазерный модуль на упомянутом расстоянии от двигателя. Ниже представлена фотография макета для измерения (рис. 11).



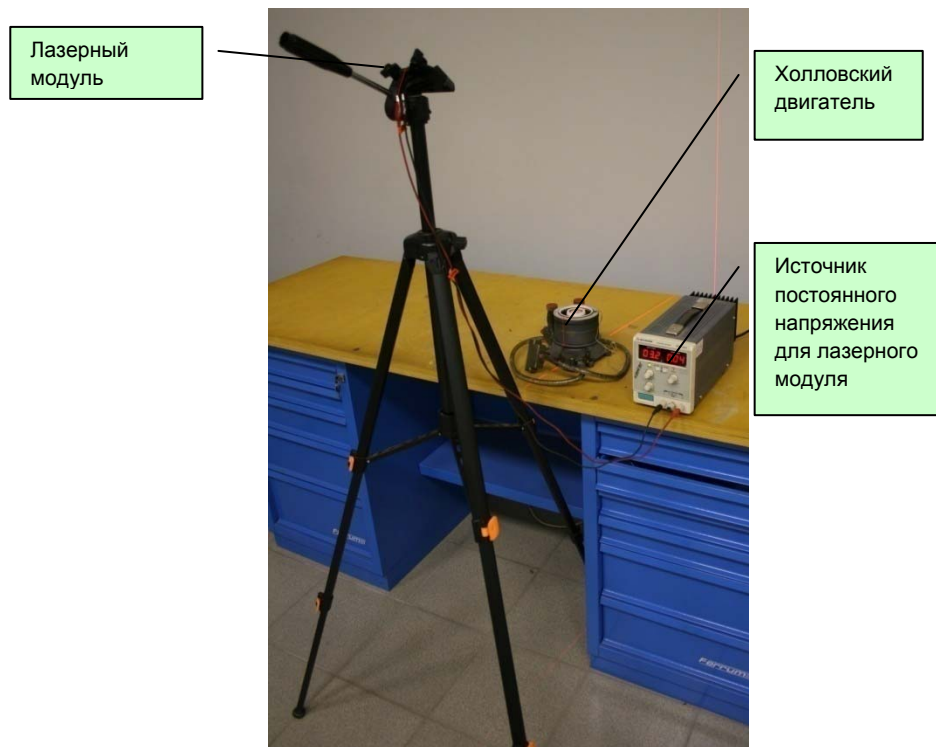


Рис. 11. Внешний вид макета для измерения

Профили, полученные с использованием данной методики и традиционным контактным способом приведены ниже на рис. 12.

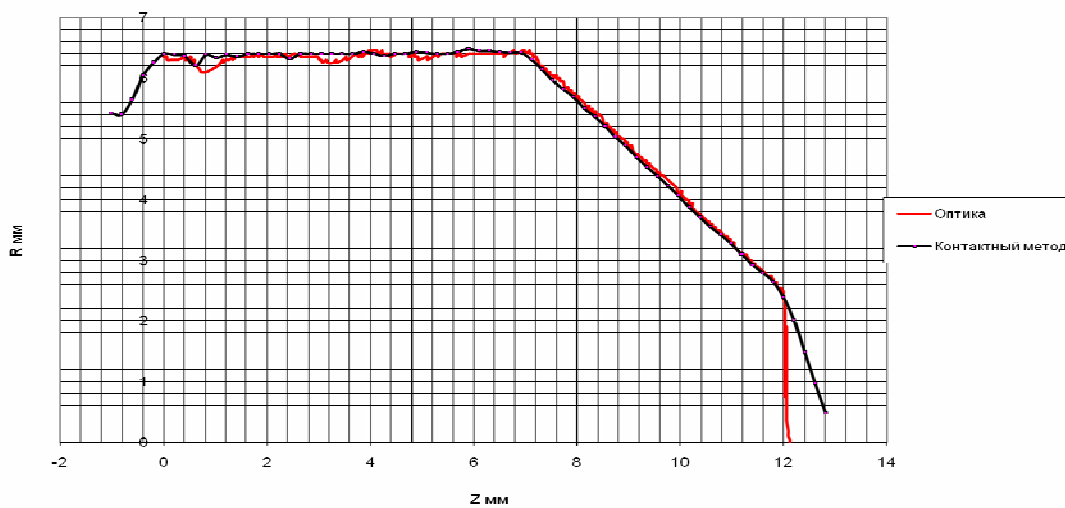


Рис. 12. Сравнительные результаты измерения оптическим и контактным способом

Для определения порядка точности измерения был изготовлен эталонный профиль, некоторые размеры которого были измерены с помощью цифрового штангенциркуля

(точность измерения которого  $\pm 10$  мкм). Далее профиль был измерен оптическим методом (рис. 13).

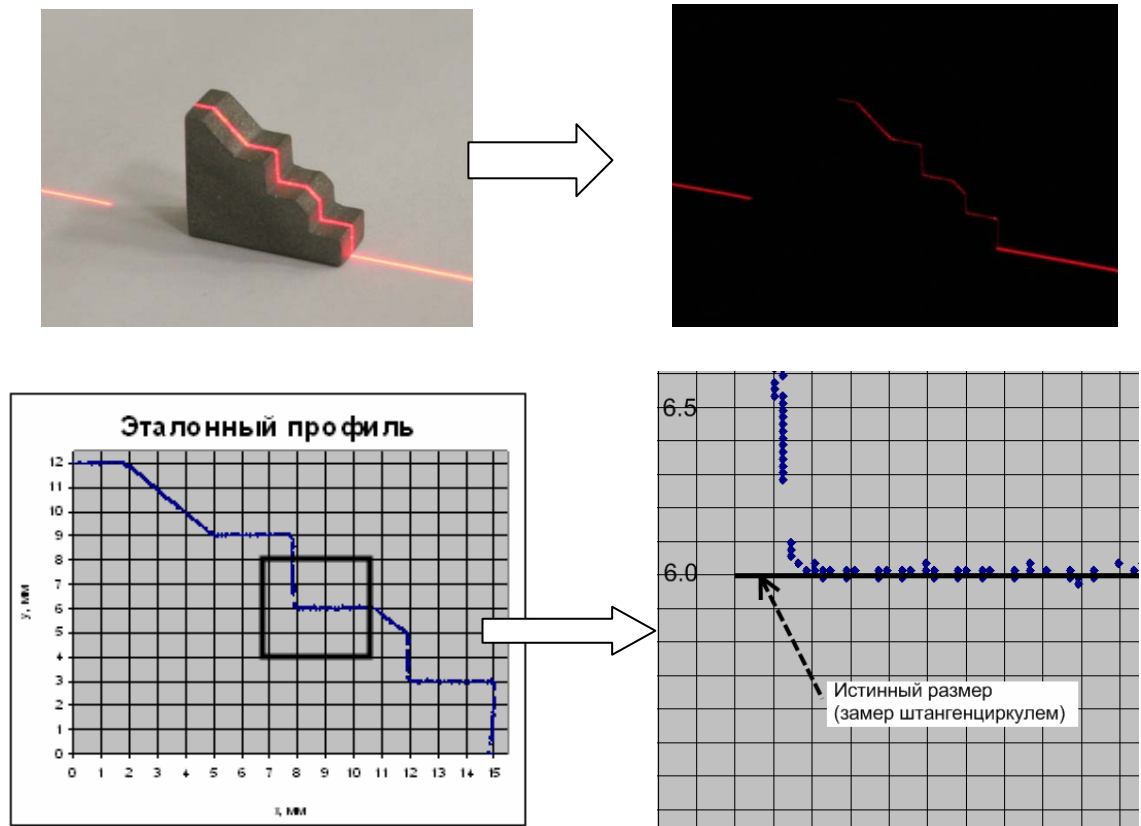


Рис. 13. Измерение эталонного профиля

Достигнутая точность измерения составляет  $\pm 30$  мкм. Для повышения точности планируется использование лазерного модуля с меньшей толщиной лазерной линии, а также ввести алгоритм компенсации оптических искажений объектива.

Данную методику можно считать пригодной для измерения профилей керамических колец ХД при условии, что будет достигнута необходимая точность измерения.

Из недостатков используемого тестового оборудования следует отметить массу, габариты, невозможность полного дистанционного управления у фотоаппарата и большая толщина проецируемой линии у лазерного модуля (порядка 3 мм на расстоянии 15 см). Именно эти недостатки делают невозможным использование данных устройств в составе системы для дистанционного измерения.

Для устранения этих недостатков планируется использовать более совершенный лазерный модуль с толщиной лазерной линии 150 мкм, на расстоянии 15 см, веб-камеру с 2-х мегапиксельной матрицей и асферической оптикой.

## 2. Описание конструктивной схемы устройства

В соответствии с выбранной методикой и ТЗ было разработано устройство для позиционирования измерительного инструмента (лазерный модуль и вебкамера с объективом) на расстоянии  $\sim 90$  мм от среза двигателя. Система позволяет производить измерения двигателей со средней линией разрядного канала до 90 мм и высотой до 140 мм. Данное устройство имеет две степени свободы (азимутальное и радиальное перемещение), что позволяет производить измерение в любом сечении как внутреннего, так и наружного изоляторов, а также удалять измерительный инструмент из зоны действия плазменной струи ХД.

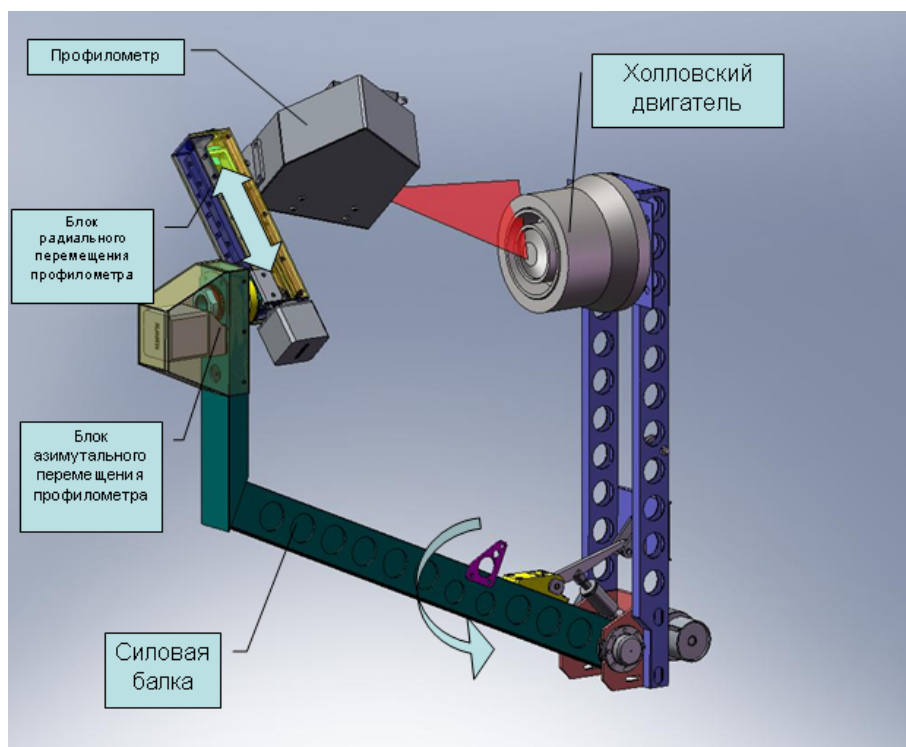


Рис. 14. Трехмерный вид устройства позиционирования измерительного инструмента.

## **Заключение**

Получены следующие результаты:

- Разработана методика измерения.
- Проведены тестовые измерения.
- Разработана конструкторская документация на техническое устройство для бесконтактного измерения профилей керамических изоляторов внутри вакуумной камеры.

## **Библиографический список**

[1] Горшков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов, М.: Машиностроение, 2008, с 180.

[2] Peter Y. Peterson, David H. Manzella, Proceeding of the 2003 AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA Papers № 2003-5005.

## **Сведения об авторе**

Севостьянов Антон И., инженер ФГУП «Центр Келдыша»

Тел.456-75-82

e-mail:sev-anton@mail.ru