

# АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ УЧАСТКОВ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

А.С. Яковишин, О.В. Захаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Значительное число деталей, в первую очередь, авиационной, ракетной, автомобильной промышленности имеют сложные поверхности, в том числе с труднодоступными участками для контроля. К таким поверхностям относят поверхности с периодическим профилем (зубчатые, шлицевые, винтовые, крыльчатки и др.), валы со ступенчатыми отверстиями и различными выточками. В ракетной технике примерами могут служить детали в виде диска турбины (рис. 1) и вала ротора (рис. 2).

Для контроля сложных поверхностей деталей широко применяют координатно-измерительные машины (КИМ) [1-5]. КИМ позволяют осуществлять комплексный контроль размеров, формы и расположения поверхностей деталей. Однако при контроле труднодоступных участков контактным методом могут возникать следующие проблемы:

1. недоощупывание некоторых участков поверхностей;
2. ложные срабатывания датчика касания при контакте с другими поверхностями при подводе или отводе;
3. сложность подвода датчика касания по нормали к измеряемой поверхности;
4. нерациональная траектория перемещений датчика касания при измерении.

С практической точки зрения первые две проблемы во многом решаются применением щупов большой длины и с малыми диаметрами сферического наконечника. Другие же проблемы требуют совершенствования алгоритмов измерения на основе научного подхода. Если детали имеют достаточно точно обработанные базовые и измеряемые поверхности с малыми отклонениями от 3D-модели, то традиционные алгоритмы обеспечивают хорошие результаты. Например, хорошо зарекомендовали себя алгоритмы с компенсацией расположения поверхностей по минимуму расстояний профилей и значений кривизны для лопаток компрессора ракетных двигателей [4, 5]. В противном случае целесообразно применять адаптивный алгоритм измерения, в котором после определенного числа измерений вносятся коррекция в процесс виртуального базирования и траектории подвода датчика касания [1].

Предлагается следующий адаптивный алгоритм измерения деталей с труднодоступными участками поверхностей (рис. 3). Его основная идея состоит в том, что после некоторого числа измерений проводится повторное виртуальное базирование детали, позволяющее уточнить траектории перемещения датчика касания.

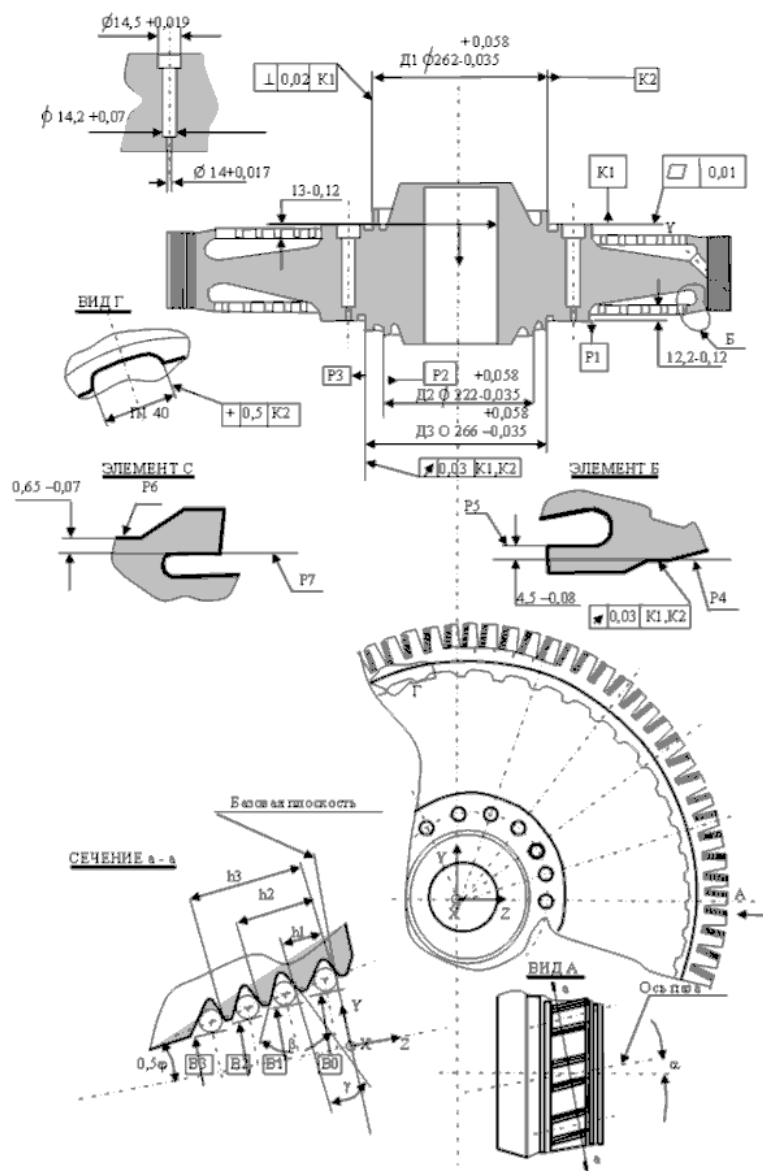


Рис. 1. Диск турбины первой ступени [2]

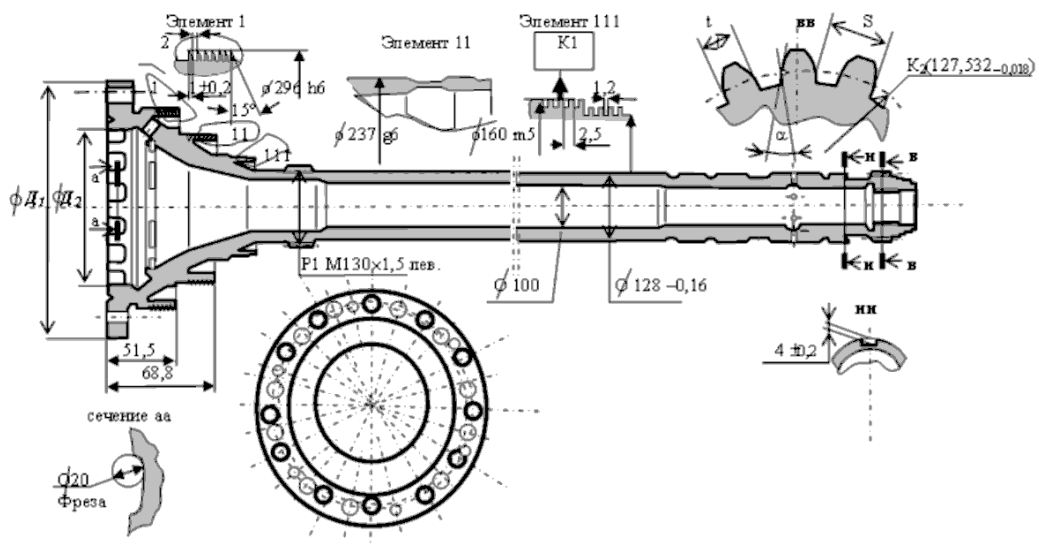


Рис. 2. Вал ротора низкого давления ГТД [2]

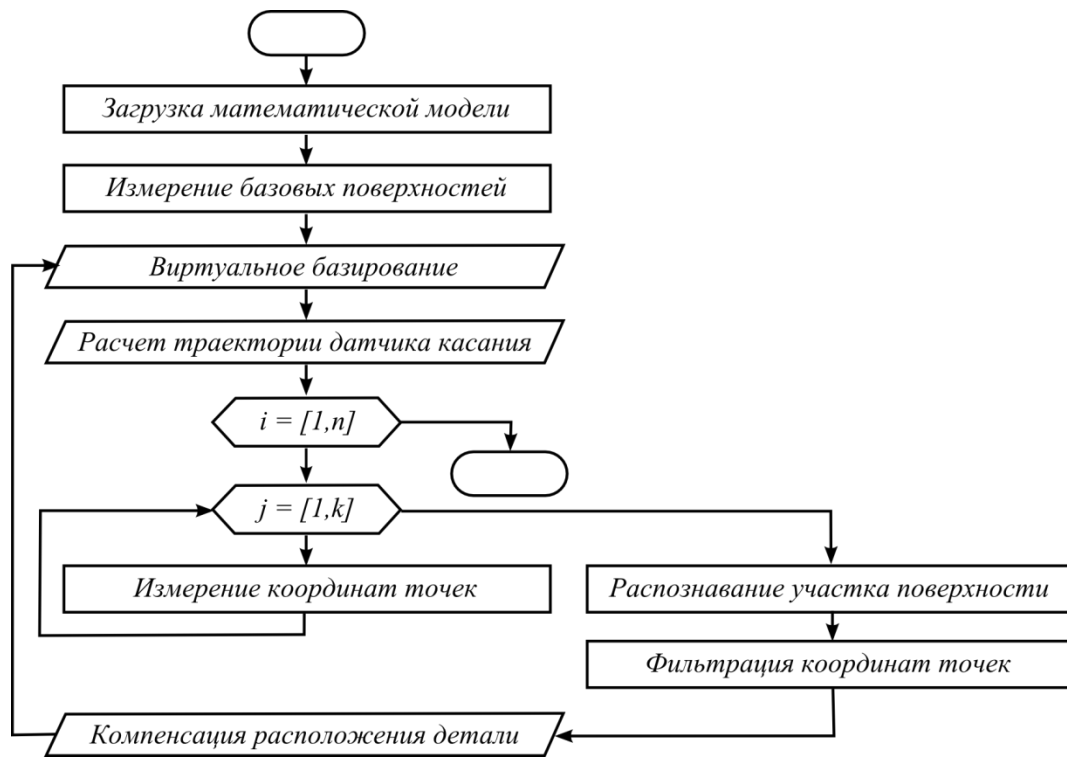


Рис. 3. Схема адаптивного алгоритма контроля

Кластеризация измеренных точек целесообразно проводить по значению их кривизны. После фильтрации и нормирования значений кривизны проводится распознавание элементов профиля. Перед проведением кластеризации осуществляется фильтрация значений кривизны с использованием фильтра Гаусса, позволяющая отсеять точки с выпадающими из общего фона значениями кривизны. Алгоритм  $k$ -средних предполагает минимизацию суммарного квадратичного отклонения точек кластеров  $K$  от их центров:

$$K = \sum_{j=1}^k \sum_{r_i \in S_j} (r_i - m_j)^2 \rightarrow \min$$

где  $S_j$  – полученные кластеры,  $k$  – число кластеров,  $m_i$  – центры масс кластеров.

Алгоритм  $k$ -средних разбивает множество элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров  $k$ . Идея алгоритма заключается в том, что на каждой итерации заново вычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы вновь разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике [6].

На следующем этапе проводится компенсация расположения поверхностей относительно первоначального виртуального базирования. Для этого последовательно выполняются повороты и перемещения системы координат детали для наилучшего вписывания измеренного облака координат точек. Расчет ведется с помощью векторно-матричных преобразований координат по методике, изложенной в [2].

Далее при необходимости вносятся коррективы в траекторию перемещения датчика касания для минимизации проходимого пути и подвода к измеряе-

мой поверхности по нормали. Эта отдельная задача, решаемая на основе известных алгоритмов координатной метрологии [7].

Таким образом, разработанный адаптивный алгоритм контроля труднодоступных участков сложных поверхностей деталей позволяет распознавать измеряемые участки поверхности, изменять виртуальное базирование детали и корректировать траектории перемещения датчика касания.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гречников Ф.В. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах / Ф.В. Гречников, О.В. Захаров, А.А. Королёв // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.
2. Захаров О.В. Формообразование сложных поверхностей с применением адаптивных систем контроля / О.В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2014. 256 с.
3. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учебник / Ф.И. Демин, Н.Д. Пронищев, И.Л. Шитарев. Самара: Изд-во СГАУ, 2012.
4. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / В.А. Печенкин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18-23.
5. Болотов М.А. Повышение точности оценки отклонения расположения в координатных измерениях профилей лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5-3. С. 202-211.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
7. Кононогов С.А. Координатная метрология / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко. М.: АСМС, 2010. 380 с.

Научный руководитель: О.В. Захаров, д.т.н., профессор ИнЭТМ СГТУ имени Гагарина Ю.А.