

УДК 621.542

С.Н. Хрунков, А.А. Крайнов
РАЗВИТИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ РЕГУЛЯТОРОВ
МАКСИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА
ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИВODOB

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены принципы проектирования регуляторов частоты вращения ротора пневматических машин вращательного действия. Отмечено, что широко используемые регуляторы с механическим устройством определения частоты вращения недостаточно надежны на высоких оборотах за счет наличия взаимно движущихся элементов. Рассмотрены современные конструктивные схемы регуляторов максимальной частоты вращения, содержащие эластичное кольцо, которое совмещает функции чувствительного и исполнительного элементов. Охарактеризованы возможности их применения для ручных пневматических шлифовальных машин разных диапазонов частот вращения.

Ключевые слова: пневматический привод, малоразмерная турбин, регулятор максимальной частоты вращения.

Введение

Малоразмерные пневматические приводы, габаритные размеры которых не превышают 100 мм, в последние десятилетия находят широкое применение в машинах и системах различного назначения: пневматических инструментах, системах двигателей корабля, промышленных системах жизнеобеспечения и др. [1]. Наиболее распространенными являются ротационно-пластинчатые машины и устройства. Возникли тенденции использования турбинных пневматических двигателей, основными преимуществами которых является высокая частота вращения и достаточно высокий крутящий момент на всем диапазоне [2,3]. В условиях высокой частоты вращения ротора особенно важной становится задача ее регулирования и адаптации к условиям использования устройства [4]. Так, например, при использовании малоразмерной турбины в качестве привода для ручной шлифовальной машины задачей регулятора является установление стабильного значения оборотов холостого хода и сохранение его постоянным в условиях переменной нагрузки. Необходимо отметить, что, независимо от принципа действия регулятора частоты вращения, узел должен быть достаточно надежен, так как в случае выхода турбины на «угонные обороты» частота вращения может достигнуть 100 000 1/мин и более. Помимо возможного выхода из строя опор ротора, приводящего к поломке оборудования, возможно отделение и разрушение абразивного материала шлифовальной головки или борфрезы из-за чрезмерных центробежных сил, что делает процесс шлифования крайне опасным. Поэтому, кроме обеспечения запаса по параметрам надежности, при разработке устройств, возможно, целесообразно предусмотреть дублирующий регулятор либо аварийный клапан для полной остановки процесса подачи рабочего тела к турбине. Принцип действия большинства регуляторов основан на уменьшении площади проходного сечения для прохождения рабочего тела к турбине при увеличении частоты вращения ротора [5].

Работа регулятора и его влияние на выходные параметры воздушной турбины изображены на рис. 1.

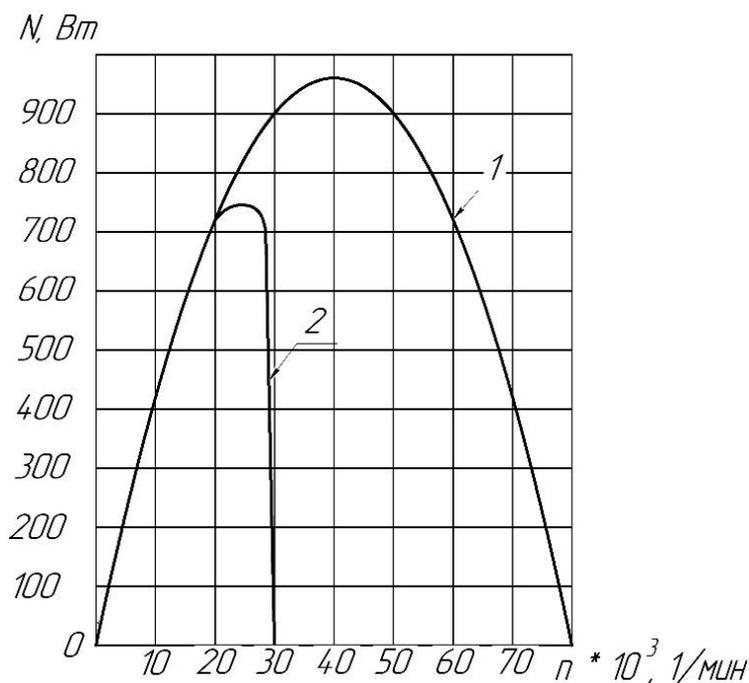


Рис. 1. Влияние регулятора частоты вращения на характеристику турбины

В результате анализа приведенного выше графика видно, что регулятор не оказывает влияние на левую ветвь характеристики турбины и предназначен для регулировки его правой ветви – линии 1. Линия 2 характеризует правую ветвь характеристики турбины при активной работе регулятора, который поддерживает заданную частоту вращения в 30 000 1/мин. Оценить влияние регулятора можно по расстоянию между линией 2 и правой ветвью линии 1.

Обзор существующих конструкций

Регуляторы частоты вращения могут быть условно разделены на два основных типа по принципу работы:

- 1) регуляторы, принцип действия которых основан на использовании вентиляционных течений рабочего тела в турбинной ступени;
- 2) регуляторы, работа которых основана на использовании центробежных сил, воздействующих на чувствительный элемент, встроенный в пневматическую машину.

Далее показаны преимущества и недостатки этих типов регуляторов применительно к пневматической шлифовальной машине. Конструктивные схемы регуляторов [6-8] основаны на увеличении интенсивности вентиляционных течений в регулирующем элементе турбопривода при увеличении частоты вращения ротора. Регулятор скорости вращения [6] включает в себя датчик скорости вращения и золотниковый исполнительный механизм (рис. 2). Регулятор снабжен упругим элементом, один конец которого закреплен на корпусе, другой – на регулируемом валу. Во время работы турбины вторичные течения смещают пневмомуфту с валом в радиальном направлении, в результате окна золотника частично перекрываются. Регулятор надежен, так как не имеет механической связи с вращающимся ротором. При этом следует отметить большие габариты конструкции, а также сложную аэродинамическую связь золотника с турбоприводом.

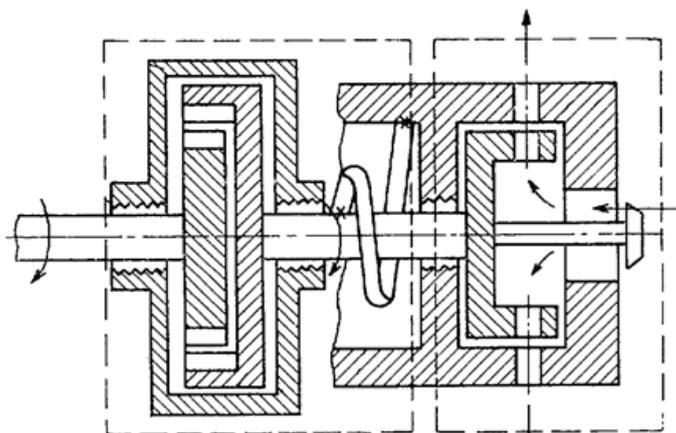


Рис. 2. Регулятор частоты вращения по [6]

Предельный регулятор частоты вращения [7] содержит тормозное колесо с лопатками, размещенное на регулируемом валу (рис. 3). Регулятор содержит кожух, выполненный в виде подпружиненного стакана, установленного с зазором концентрично с тормозным колесом и закрепленного на винтовых направляющих, жестко связанных с корпусом. Во время работы турбины вентиляционные течения смещают стакан по винтовым направляющим, в результате наружная цилиндрическая поверхность тормозного колеса «открывается», и вентиляционные течения в нем резко увеличиваются. Как и в предыдущей конструкции, регулятор не имеет механической связи с вращающимся ротором, что обеспечивает его надежность. Необходимо при этом отметить конструктивную сложность и громоздкость регулятора.

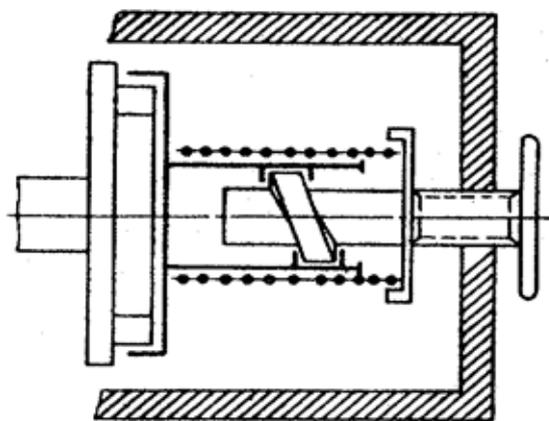


Рис. 3. Предельный регулятор частоты вращения [7]

В предельном регуляторе частоты вращения турбины [8] на обращенной к сопловому аппарату торцевой поверхности диска осевого рабочего колеса выполнены радиальные канавки, прорезающие дно межлопаточных каналов (рис. 4). Принцип действия регулятора основан на воздействии вторичных течений, возникающих в радиальных канавках, на основной поток воздуха, выходящего из сопел.

Общим недостатком регуляторов [6-8] является низкая чувствительность регулирования, обусловленная малой интенсивностью вторичных течений, которые начинают оказывать ощутимое воздействие на режим работы МТ только при частоте вращения более 100000 об/мин. Поэтому от использования данного типа регуляторов при проектировании ручных пневматических машин было решено отказаться.

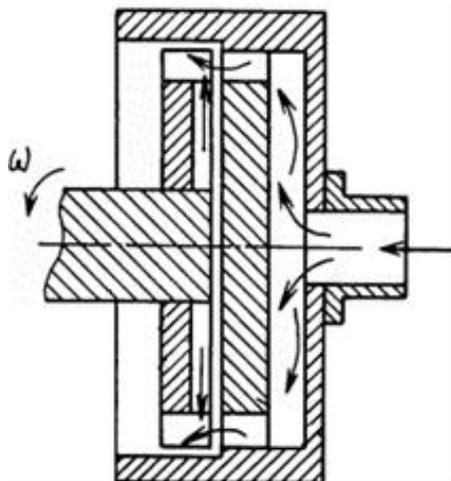


Рис. 4. Предельный регулятор частоты вращения по [8]

Регуляторы, работа которых основана на использовании центробежных сил, имеют множество вариантов исполнений. В известных конструкциях роль датчиков частоты вращения чаще всего выполняют вращающиеся совместно с валом подвижные шарики или закрепленные на валу грузы. Регуляторы содержат также подвижные исполнительные элементы, осуществляющие обратную связь с системой подвода или отвода воздуха и возвратный механизм с упругим элементом.

В [9] приведен центробежный регулятор оборотов пневматических ручных машин, содержащий шарнирно установленные на валу подпружиненные грузы и подвижный элемент, торец которого расположен соосно с впускным отверстием воздухораспределительного устройства (рис. 5). Для пневматических машин такой механизм слишком тяжел и громоздок. В [10] описана более компактная конструкция центробежного регулятора скорости, в которой датчик частоты вращения содержит подвижные шарики, а исполнительный элемент выполнен в виде соосной валу подвижной втулки (рис. 6). Упругий элемент регулятора выполнен в виде скобообразных пружин.

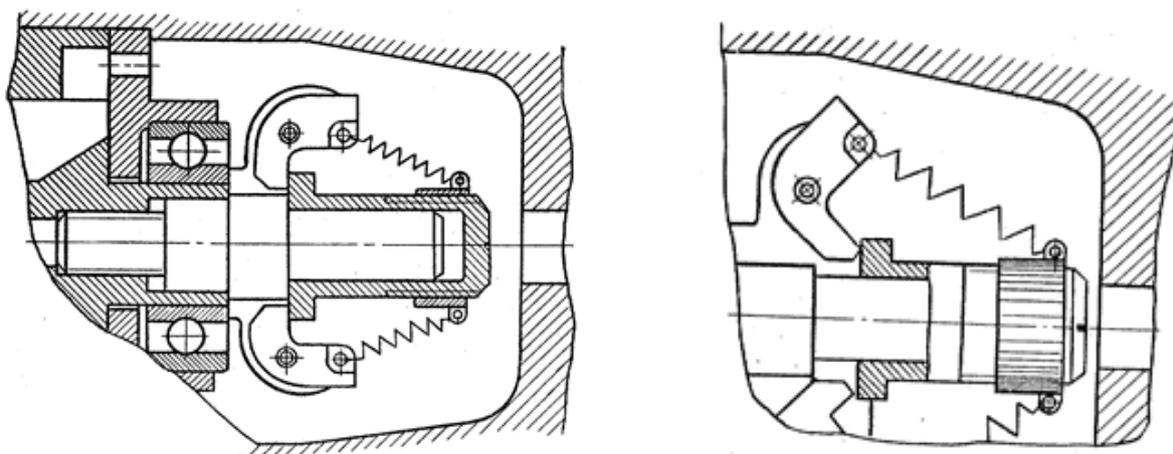


Рис. 5. Центробежный регулятор оборотов пневматических ручных машин [9]

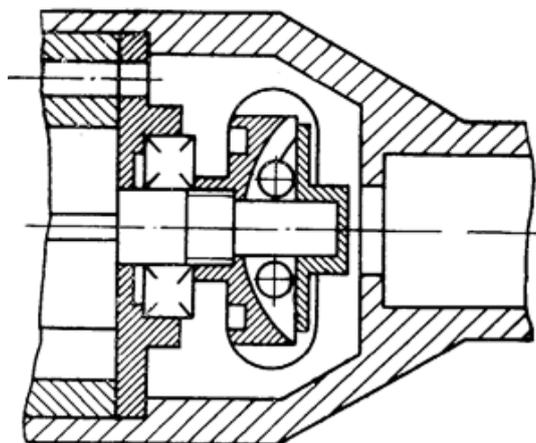


Рис. 6. Центробежный регулятор скорости [10]

В регуляторах [9,10] исполнительный механизм находится под постоянным воздействием сил давления сжатого воздуха, препятствующих его перемещению в направлении впускного отверстия. В малогабаритных пневматических приводах центробежные силы, воздействующие на грузы, недостаточны для уравнивания этих сил, что препятствует эффективному воздействию регуляторов на характеристику пневматические машины. Недостатками регуляторов данного типа являются громоздкость, конструктивная сложность и низкая технологичность. Кроме того, надежность регулятора на высоких частотах вращения является низкой из-за наличия взаимно движущихся механических элементов.

Вышеуказанных недостатков лишены конструкции регуляторов, принцип действия которых основан на деформации эластичного кольца, которое под действием центробежных сил перекрывает окна для подачи рабочего тела к турбине. Такой регулятор разработан компанией Air turbine technologies и широко применяется в скоростном пневматическом инструменте (рис. 7а).

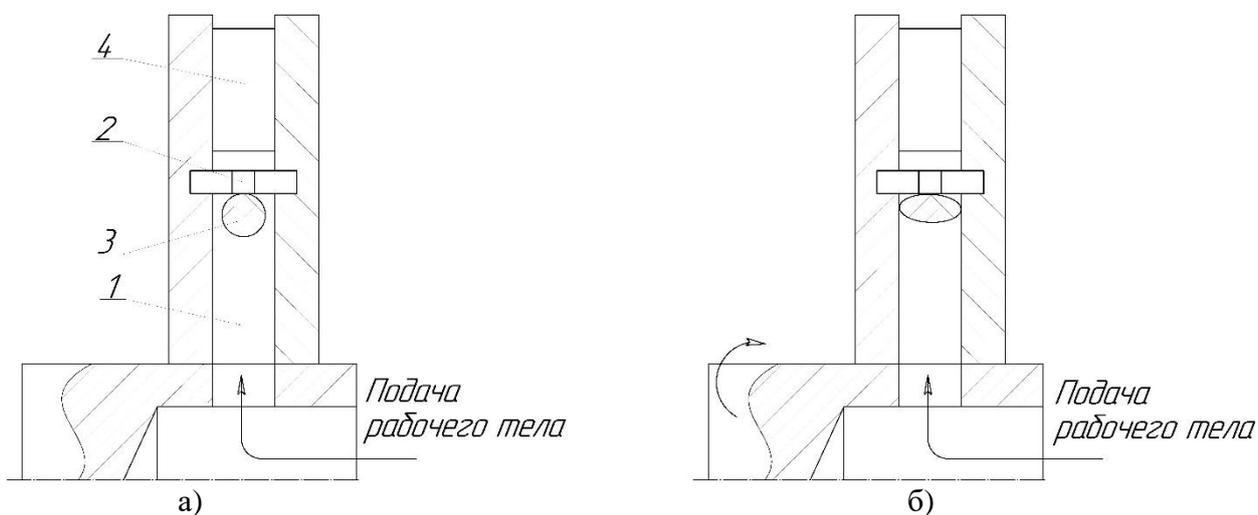


Рис. 7. Регулятор фирмы Air turbine technologies

Регулятор включает в себя регулировочную камеру (позиция 1), в периферийной стенке которой имеется сквозные окна для подвода воздуха через малоразмерную турбину (позиция 2). Внутри боковой стенки (2) устанавливается эластичное кольцо (3), которое сочетает в себе функции чувствительного и исполнительного элементов.

Во время вращения ротора (рис. 7б), эластичное кольцо отжато против внутренней поверхности стенки под действием центробежных сил (позиция 2). Это вызывает поперечную деформацию эластичного кольца, а величина перекрытой площади проходного сечения окон зависит от частоты вращения ротора. В номинальные режимы работы пневматической машины, поток воздуха свободно проходит через регулировочную камеру.

Отсутствие взаимно движущихся механических частей в регуляторе обеспечивает высокую надежность и технологичность. Компактный размер регулятора определяется взаимным соосным расположением регулировочной камеры (позиция 1) и лопаточного аппарата (позиция 4) турбины, и подачей воздуха в регулировочную камеру радиально через осевое отверстие вала. Следует отметить, что описанный регулятор имеет достаточно узкую область применения, так как он сконструирован специально для струйно-реактивной турбины и применение для других типов турбин затруднено.

В рассмотренной далее конструктивной схеме [5] (рис. 8) регулятор максимальной частоты вращения состоит из регулировочной камеры (позиция 2), которая размещена на валу, эластичного кольца (позиция 3). Кольцо подогнано к внутренней стенке и к двум боковым стенкам камеры. В статическом положении ротора, проходное сечение входных отверстий (позиция 4) камеры регулировки, остаются свободными. В случае радиального растяжения эластичного кольца под действием центробежных сил площадь его поперечного сечения уменьшается. Поэтому боковые стенки камеры регулировки спроектированы таким образом, что зазоры между ними в цилиндрическом поперечном сечении любого диаметра соответствует ширина эластичного кольца, растянутого до того же диаметра. Во время вращения пневматического привода упругое кольцо (3) растянуто и частично перекрывает впускные отверстия (позиция 5), влияя, таким образом, на подачу рабочего тела в турбинную ступень. Данная схема регулятора, разработанная специально для применения в ручных пневматических шлифовальных машинах с турбинным приводом, является наиболее компактной и технологичной. Судя по результатам испытаний [5], эффективность его работы и стабильность частоты вращения ротора под различными нагрузками являются высокими. Стоит отметить, что регулятора данного типа возможно настроить под любую частоту вращения в диапазоне 20 000-60 000 1/мин.

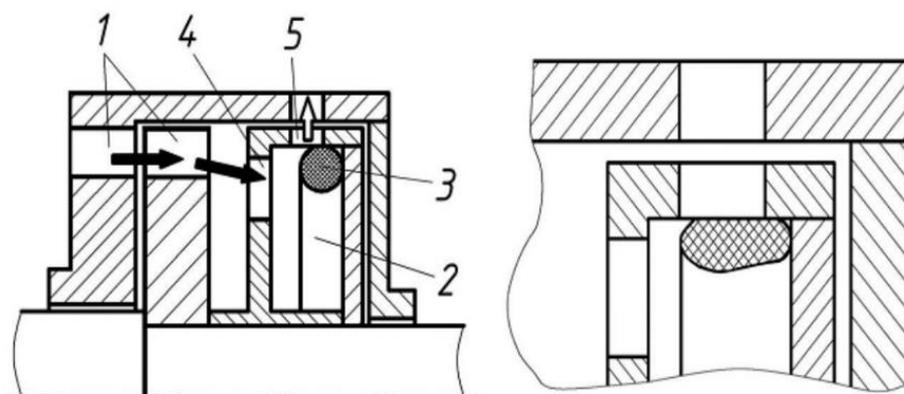


Рис. 8. Регулятор максимальной частоты вращения [5]

Выводы

Для работы в составе ручной пневматической шлифовальной машины на частотах вращения от 20 000 до 60 000 1/мин наиболее рационально, по мнению авторов, применить регуляторы, действие которых основано на перекрытии проточной части пневматической машины упругим элементом (эластичным кольцом) вследствие его деформации под действием центробежных сил. Конструкции данного типа, как правило, компактны, надежны, технологичны и подходят для использования в ручных пневматических шлифовальных машинах.

Библиографический список.

1. Khimich, V.L. Two-rimming radial turbine for drive of manual pneumatic grinders [Текст] / V.L. Khimich, A.B. Chuvakov, V.A. Kikeyev, S.N. Khrunkov, A.A. Kraynov // International Journal of Applied Engineering Research 2016. №11(16). P. 8982-8986.
2. Батурин, О.В. Получение уравнения для вычисления профильных потерь в венце осевой турбины при проектном расчете [Текст] / О.В. Батурин, Д.А. Колмакова, Г.М. Попов, В.Н. Матвеев // Труды МАИ. 2018. № 101. С. 15.
3. Matveev V.N. Workflow optimization of multistage axial turbine [Текст] / V.N. Matveev, G.M. Popov, O.V. Baturin, E.S. Goryachkin, D.A. Kolmakova // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 51st. 2015.
4. Фершалов, М.Ю. Степень влияния конструктивных и режимных факторов на относительный перепад энтальпии в соплах турбинных ступеней с малыми углами выхода сопел [Текст] / М.Ю. Фершалов, Ю.Я. Фершалов, А.Ю. Фершалов, Л.П. Цыганкова // Полярная механика. 2016. № 3. С. 966-975.
5. Khrunkov, S.N. Maximum rotation frequency regulators of high-speed small-sized pneumatic actuators [Текст] / S.N. Khrunkov, V.L. Khimich, A.B. Chuvakov // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. №11(18). P. 9256-9260
6. Котляр, И.В. Регулятор скорости вращения [Текст] / А.с. СССР № 574700, G05B11/44. Опубл. 30.09.1977.
7. Котляр И.В. [Текст] / А.с. СССР № 611189, G05D13/28. Предельный регулятор частоты вращения / и др. Опубл. 15.06.1978.
8. Котляр И.В. Предельный регулятор частоты вращения турбины [Текст] / Патент РФ на изобретение № 2023284, G05D13/08, F01D15/06. Опубл. 15.11.1994.
9. Раздольский А.М. Центробежный регулятор оборотов пневматических ручных машин [Текст] / А.с. СССР № 619908, G05D13/10. Опубл. 15.08.1978.
10. Гайдуков А.В. Центробежный регулятор скорости ротационного пневмодвигателя [Текст] / А.с. СССР № 396670, G05D13/10. Опубл. 01.01.1973.