

Метрологическое обеспечение испытаний манипуляционных и силовых роботов

И. Б. ЧЕЛПАНОВ*, А. В. КОЧЕТКОВ**

* С.-Петербургский государственный политехнический университет, С.-Петербург, Россия,
e-mail: igorchelp@yandex.ru

** Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Для промышленных роботов предложен подход к нормированию показателей точности, при котором требования к точности формулируются по результатам измерений при калибровке векторов линейных и угловых погрешностей относительно заданных положений переносимого объекта.

Ключевые слова: роботы, калибровка, испытания, качество, аттестация.

An approach to the accuracy rating suggesting that the requirements to accuracy are formulated for industrial robots integrally by the accuracy of assignment of positions of transferable object is suggested.

Key words: robots, calibration, tests, quality, attestation.

Промышленная робототехника представляет собой более молодое направление, чем, например, станкостроение, поэтому целесообразно подробнее и глубже исследовать проблематику определения точностных характеристик роботов при калибровке, выйдя за рамки контроля паспортных данных.

В качестве примера сначала рассмотрим робот, работающий в цилиндрической системе координат, его схема изображена на рис. 1, а. При движении в горизонтальной плоскости достаточно учитывать только две степени свободы (рис. 1, б). При более подробном исследовании необходимо учитывать ориентирующие степени свободы робота, объединяемые в трехстепенной ориентирующий механизм (рис. 1, в), который функционально аналогичен карданову шарниру с дополнительным вращением вокруг входной оси. Основным нормативным документом для испытаний промышленных роботов (ПР) является стандарт [1], который можно рассматривать как основу их конкретной программы, содержащей пункты методик калибровки и контрольных испытаний. Анализ в соответствии с [1] позволит выявить сильные и слабые стороны стандартизации точностных характеристик и возможности совершенствования метрологического обеспечения в области испытаний ПР. В [1] констатируется необходимость определения по результатам испытаний только погрешностей позиционирования при выходе рабочего органа в заданную точку и отработки программной траектории при цикловом и контурном управлении, соответственно.

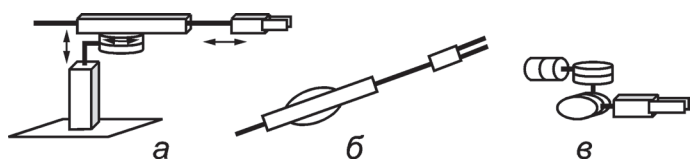


Рис. 1. Схема робота, работающего в цилиндрической системе координат:

а — вид сбоку; б — с учетом только двух степеней свободы в горизонтальной плоскости; в — с учетом ориентирующих степеней свободы

Рассмотрим возможности совершенствования метрологического обеспечения испытаний технологических и вспомогательных манипуляционных ПР. Это относится ко всем разделам программ испытаний вспомогательных роботов, но их совокупность оказывается недостаточной для вынесения суждений о возможности использования на производстве ПР. По этим дополнительным пунктам целесообразно использовать подходы, разработанные для метрологических испытаний станков и технологических установок [2—4]. Кроме того, необходимо выделить группу технологических ПР, предназначенных для выполнения операций, которые требуют приложения усилий. Применительно к таким роботам необходимо проводить испытания на возможность воспроизведения усилий в заданных диапазонах по различным направлениям.

Для большинства технологических ПР необходимо сочетать испытания на функционирование непосредственно с контролем результатов выполнения ими определенных операций, например, для окрасочных роботов — качества окрашенной поверхности. Такие результаты существенно зависят от квалификации программиста при составлении управляющих программ (при аналитическом программировании) или обучающего рабочего-оператора при программировании методом обучения.

Специфичным является класс транспортных роботов, которые по существу представляют специализированные транспортные средства. По отношению к их ходовым качествам целесообразно использовать подходы, проработанные для колесного и гусеничного транспорта, с определением в эксплуатационных условиях таких показателей, как диапазон управляемых скоростей, способность преодолевать препятствия, наименьший радиус разворота, длина тормозного пути. При испытаниях необходимо определять погрешности воспроизведения траекторий движения и погрешности позиционирования при остановке [4].

Есть специфика проведения испытаний демонстрационных роботов, для которых в формализованном виде могут быть представлены только некоторые требования; часто

наиболее важным является плавность движения. При этом требования к точности формулируются для режимов, когда робот взаимодействует с различными объектами внешней среды или с другими роботами.

При исследовательских испытаниях, не регламентируемых стандартами, часто определяются такие параметры, как коэффициенты жесткости, собственные частоты конструкции, показатели затухания свободных колебаний, зазоры в передачах, коэффициенты влияния температуры и т. п. Необходимо учитывать, что ряд измеряемых величин представляют собой векторы, измеряемые по проекциям (или составляющим), а требуется находить или составляющие по другим осям, или модули векторов.

Точностные характеристики ПР часто являются важнейшими, и их получение при испытаниях составляет наибольшие трудности. Показатели точности должны быть четко определенными, информативными, удобными для практического использования, прямоизмеряемыми и достаточно просто контролируемые. Подходы, разработанные для объектов машиностроения, могут быть непосредственно перенесены на технологических ПР, например, предназначенных для механической обработки. Однако для большинства технологических ПР прямой контроль показателей точности по параметрам положения изделий затруднен или практически невозможен. Для большинства технологических и всех вспомогательных ПР нормы точности устанавливаются только для положения и движения рабочего органа. Требования к точности ПР значительно ниже, чем для станков: обычно допустимы погрешности в десятые доли миллиметра, при этом для средств измерений (СИ) предельно допустимые значения инструментальных и методических погрешностей составляют порядка 0,1 мм. Известны проблемы операционного контроля качества при изготовлении сложнопрофильных деталей на автоматизированных профилегибочных станках ПГР-6АД — технологических роботах для силовых операций гибки с растяжением. На контуре детали длиной до 5 м необходимо обеспечить погрешность изготовления не более 0,5 мм.

Принципиально важными для вспомогательного робота являются требования к точности задания положения переносимого объекта как свободного твердого тела в пространстве. Вместо этого часто используется следующий подход: если степеней свободы или управляемых координат ПР несколько, то точность часто нормируется независимо по каждой из них. Например, для робота со всеми вращательными кинематическими парами нормируются и контролируются показатели точности задания каждого из углов поворота. При таком подходе, естественно, не учитывается влияние прогибов звеньев и упругость подшипниковых узлов, неустойчивость положения упоров, погрешности концевых переключателей и др.

Другой подход к нормированию точности заключается в том, что требования формулируются для ПР в целом по точности задания положений переносимого объекта. При этом необходимо однозначно определить, погрешности каких именно параметров положения необходимо рассматривать. Часто удобно задавать условный центр рабочего органа, тогда в качестве параметров положения вводят три прямоугольные координаты x_0, y_0, z_0 центра рабочего органа как точки и три угла поворота $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ вокруг карданных осей механизма ориентирования. В соответствии с этим нужно

рассматривать векторы Δr_0 погрешности позиционирования и $\Delta \theta$ погрешности ориентирования.

Также важно задать систему координат, в которой определяются положение и погрешности. Для любого ПР может быть установлена и привязана базовая система координат, жестко связанная с основанием ПР; только тогда погрешности могут быть разделены на систематические и случайные составляющие. Однако немногие ПР имеют на своем основании материально реализованные базы.

Следует установить составляющие векторов погрешностей, подлежащие нормированию. Отклонения по разным направлениям и углы поворота вокруг разных осей также могут существенно различаться. Так, при установке роботом заготовки в кулачковый патрон станка, допустимые значения поперечных смещений обычно значительно меньше продольных. Особое внимание надо обратить на выбор осей системы координат для составляющих погрешностей. Принципиально можно выбрать единую прямоугольную систему координат, жестко связанную с основанием манипулятора, и в любой точке рабочей зоны (при любых значениях обобщенных координат) определять по результатам испытаний составляющие погрешностей позиционирования и ориентирования именно по этим осям неизменных направлений. Однако, если ПР работает не в прямоугольной системе координат, то положения осей кинематических пар в этой системе изменяются (рис. 2). При испытаниях робота естественно определять погрешности положения по осям x_2, y_2 и затем считать, что они не зависят от угла поворота. Оборудование ориентируется по осям x_0, y_0 (или x_1, y_1).

Также надо учитывать изменения характеристик погрешностей позиционирования и ориентирования по рабочей зоне. Обычно систематические погрешности и среднеквадратичные значения случайных погрешностей возрастают при приближении к границам рабочей зоны, но это справедливо не для всех составляющих. По практическим соображениям число точек должно быть ограничено в пределах 4—15. Нормирование точности часто проводится для наихудших, наименее благоприятных в смысле точности точек рабочей зоны. Редко бывает так, что в одной точке максимальны все составляющие погрешностей: обычно в одной точке максимальна одна составляющая, в другой — другая. Поэтому при нормировании по максимуму фактически учитывается несколько точек.

Необходимо принимать во внимание часто предусматриваемую компенсацию систематических составляющих погрешностей, зависящих от массы переносимого объекта и его координат. Компенсирующие поправки вычисляются в устройстве управления в соответствии с заложенными формульными зависимостями, получаемыми при обработке результатов измерений в точках рабочей зоны с учетом массы переносимого объекта. Для этих случаев следует норми-

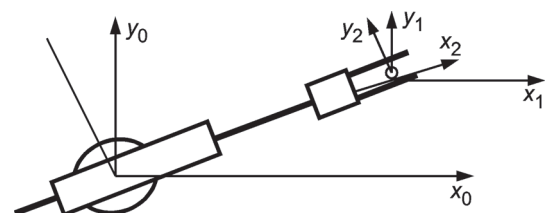


Рис. 2. Нормирование составляющих векторов погрешностей робота

ровать вид зависимостей составляющих погрешностей от координат вместе со значениями коэффициентов, а также остаточные погрешности.

Проблематика выбора СИ и методик измерений при калибровке. При исследовательских испытаниях ПР можно измерять большое число различных показателей и применять множество разных измерительных устройств. Все измеряемые величины целесообразно разделить на три группы. В первую группу входят многие геометрические параметры: габаритные размеры, значения ходов по степеням подвижности, предельных углов поворота, размеры рабочей зоны и рабочего пространства и т. п. Для их измерения достаточно простейших СИ, требования к точности которых практически не регламентируются, не требуется разработка специальных методик.

Ко второй группе относятся величины, измеряемые обычными приборами, используемыми при испытаниях любого другого оборудования, причем по отношению к измерениям этих величин ПР не имеют специфики. Такие измерения можно назвать общетехническими, они включают измерения напряжений в силовых и сигнальных цепях, силы тока, давления рабочего тела, расхода, мощности, виброперемещений и виброускорений, сопротивления изоляции, уровня электромагнитных помех и пр. По отношению к основным критериям правильности функционирования ПР измерения величин первой и второй групп являются вспомогательными, требования к их точности невысоки.

Третья группа — величины, определение которых требует применения специфических СИ и разработки специальных методик выполнения измерений. Иногда в составе работы имеются средства технического зрения, их контроль с последующим устранением искажений изображений представляет самостоятельную проблему. К величинам данной группы относятся геометрические и кинематические показатели точности позиционирования и ориентирования, линейные и угловые скорости и ускорения, силы и моменты сил, создаваемые рабочим органом при его контакте с опорными поверхностями.

Для определения разброса точек позиционирования при приходе в заданное конечное положение раньше часто использовали самые примитивные способы, например, разброс оценивали по следам от иглы, закрепленной в схвате ПР и протыкающей неподвижно установленную мишень (лист бумаги). В настоящее время подобные способы определения погрешностей вполне допустимы только в демонстрационных испытаниях.

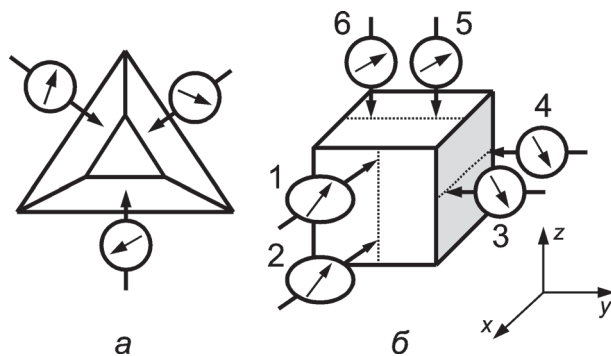


Рис. 3. Схема измерения погрешностей позиционирования (а) и вариант расстановки датчиков 1—6 работа относительно контрольного тела — куба (б)

Рассмотрим общую методику решения задачи определения погрешностей позиционирования. Составляющие погрешностей линейных перемещений и углов поворота определяются с помощью датчиков малых перемещений, например, измерительных головок или индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм или цифровых приборов того же назначения и той же точности. Датчики устанавливаются вблизи заданного конечного положения зажатого в схвате объекта — контрольного тела, погрешности положения которого определяются по результатам измерений. Схема измерения изображена на рис. 3, а. Датчики малых линейных перемещений устанавливаются неподвижно в зоне позиционирования переносимого манипулятором объекта (контрольного тела), которое изображено в виде многогранника так, что измерительные оси направлены по нормальным к поверхностям в соответствующих точках. Объект входит в зону измерения непосредственно перед позиционированием. Поскольку элементы датчиков представляют собой препятствия для перемещений, вход в зону измерений обычно возможен из узких секторов.

Введем следующие обозначения: $\mathbf{r}_i$ — радиусы-векторы точек взаимодействия датчиков с поверхностью; $\mathbf{n}_i$ — орты нормалей к поверхности в этих точках. Определим центр контрольного тела, принимаемый за начало подвижной системы координат, связанной с телом. Обозначим векторы малого линейного перемещения центра тела (вектора погрешности позиционирования) и малого угла поворота (вектора погрешности ориентирования) — $\Delta \mathbf{r}_0$, $\Delta \boldsymbol{\theta}$. Тогда смещения выделенных точек поверхности контрольного тела по нормальным или по измерительным осям датчиков определяются как скалярные произведения:

$$u_i = (\Delta \mathbf{r}_0 + \Delta \boldsymbol{\theta} \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}_i. \quad (1)$$

Ввиду того, что u_i измеряются датчиками и, следовательно, известны, совокупность соотношений (1) следует рассматривать как систему уравнений относительно шести неизвестных: по три составляющие векторов $\Delta \mathbf{r}_0$, $\Delta \boldsymbol{\theta}$. Для их определения по результатам испытаний достаточно шести уравнений (1), т. е. шести датчиков малых линейных перемещений. При этом все уравнения должны быть линейно независимыми, что накладывает некоторые ограничения на их расстановку и ориентацию измерительных осей.

Конкретный вид и особенности системы уравнений обусловлены расположением и ориентацией площадок, с которыми взаимодействуют наконечники датчиков. Часто контрольное тело выбирают простой геометрической формы (шар, цилиндр, куб). Один из распространенных вариантов расстановки датчиков относительно контрольного тела, представляющего собой прямоугольный параллелепипед, показан на рис. 3, б. При такой расстановке структура уравнений (1) получается простой и решение упрощается, а именно: составляющие погрешностей позиционирования определяются по сигналам датчиков 1, 3, 5, углы поворота — по парным разностям сигналов датчиков 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6. Точность измерений составляющих погрешностей углового ориентирования тем выше, чем больше разнесены пары датчиков. При удачной установке трех датчиков допускается подвод контрольного тела с трех направлений по осям координат или с любого направления в пределах ограниченного сектора. Для надежности и стабильности работы датчиков их целесообразно конструктивно объединять в один

блок при помощи специальных приспособлений. Если требуется измерять погрешности позиционирования в различных точках рабочей зоны, то этот блок, как единое целое, следует переставлять на различные позиции. Обычно конструктивной основой испытательного стенда является клетка, в которую устанавливают испытываемый ПР.

Измерения погрешностей позиционирования и ориентирования могут быть статическими и динамическими. При статических измерениях определяется окончательное положение, при динамических — последняя фаза прихода в конечное положение. Во втором случае для регистрации перемещения при колебаниях применяют датчики с электрическим выходом и устройством, регистрирующим заключительную фазу переходного процесса.

Значительно более сложной является задача измерения больших перемещений. Наиболее подходящими для определения положения контрольного тела в этом случае являются специальные, нестандартизованные СИ последовательной структуры — многозвенные измерительные механизмы, снабженные соответствующими датчиками линейных перемещений или углов поворота. По кинематическим схемам такие механизмы могут быть аналогичны манипуляторам ПР. В простейших случаях измерительные механизмы не имеют собственных приводов. Контрольное тело, захваченное схватом испытываемого ПР, одновременно закрепляется в зажимном устройстве измерительного механизма. Такая схема изображена на рис. 4, где слева находится трехступенный испытываемый робот, а справа — измерительный механизм, который обязательно должен быть шестиступенным, но вид и порядок кинематических пар могут быть различными. Во всех шести шарнирах измерительного механизма, который может не иметь самостоятельных приводов, встроены датчики 1—6 углов поворота, по сигналам которых и геометрическим соотношениям вычисляются линейные координаты и углы ориентации контрольного тела.

При контрольных испытаниях можно ставить и решать более простые задачи определения лишь некоторых составляющих погрешностей положения. Можно использовать устанавливаемые неподвижно в различных положениях профилированные плиты или направляющие, а также простейшие механизмы без приводов. Во всех случаях достаточно применять только узкодиапазонные датчики линейных перемещений.

На рис. 5 изображен случай, когда контрольное тело должно двигаться поступательно по прямой, а измеряются два отклонения от плоскостей (от линии их пересечения) и два угла поворота. Для получения более полных сведений о точности робота, направляющую следует устанавливать в различных положениях под разными углами. Кроме того, направляющая, по которой перемещается каретка, может быть сделана не прямолинейной, а криволинейной (например круговой — в виде диска), поэтому точность испытываемого ПР при предложенном способе может определяться не только при прямолинейных программных движениях. Погрешности обработки траектории зависят от вида программной траектории и скорости. Обычно максимальные погрешности получаются при негладких траекториях с изломами (вблизи угловых точек).

При контрольных и демонстрационных испытаниях часто идут по другому пути. По траектории перемещения контрольного тела, находящегося в схвате, задают створы: раз-

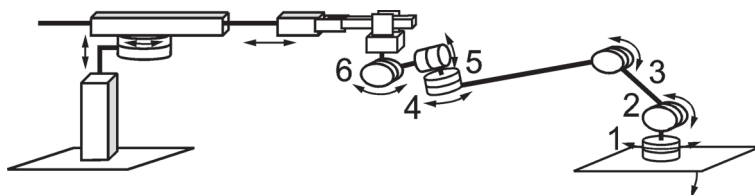


Рис. 4. Схема взаимодействия при захватывании контрольного тела схватом испытываемого робота (слева) и схватом измерительного механизма (справа):

1—6 — датчики углов поворота

мещают рамки, вилки, выдвижные штыри так, чтобы при достаточно точном выполнении программных движений зазоры несколько превышали допустимые погрешности. Если в точках отклонения от траектории зазоры превышают допустимые, то происходит касание, которое обычно регистрируется по появлению электрического контакта. Подобный метод может быть использован для контроля точности на целых участках траектории. При этом контрольное тело перемещается вдоль стержней, по оси трубки и т.п.

Скорости необходимо измерять при всех видах испытаний ПР, однако обычно требуемая точность невысока, допустимы погрешности порядка единиц процентов. Это упрощает процедуры измерений. Средние скорости, определяющие быстродействие, проще находить как отношение перемещения при полном ходе для данной степени подвижности ко времени перемещения. Есть два подхода к измерению переменных скоростей. При первом подходе датчики непосредственно измеряют относительные скорости перемещений смежных звеньев механизма манипулятора. Каждый датчик располагается у соответствующей кинематической пары. При этом линейную скорость центра контрольного тела или угловую скорость контрольного тела рассчитывают на основе известных кинематических соотношений при переходе от звена к звену. Можно применять штатные датчики скоростей, входящие в состав следящих приводов (при контурном управлении), или специальные измерительные датчики, размещенные по кинематическим парам механизма манипулятора. При втором подходе абсолютные линейная и угловая скорости контрольного тела в схвате ПР определяются непосредственно по сигналам датчиков, установленным на контрольном теле или связанном с ним.

Следует констатировать особую важность измерений составляющих линейных ускорений при помощи линейных акселерометров. Свойство плавности движений, очень важное для практики, но не отражаемое в номенклатуре основных показателей ПР и не нормируемое косвенно, можно контролировать только по результатам измерений ускорений. Запасы несущей способности захватных устройств при переносе объектов обусловлены максимальными значениями сил инерции, или составляющих ускорения. Форма и параметры импульсов ускорений и амплитуды импульсов служат диагностическими признаками при наладке и регулировке приводов и демпферов, выявляе-

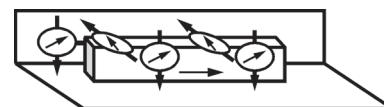


Рис. 5. Схема измерения при поступательном движении контрольного тела

нии и устранении зазоров и люфтов. По записям ускорений целесообразно анализировать частотный состав возникающих во время движения упругих колебаний конструкции.

Измерение составляющих линейных ускорений рабочего органа ПР почти всегда осуществляется линейными однокомпонентными акселерометрами; для определения трех составляющих вектора линейного ускорения на рабочем органе достаточно установить три линейных акселерометра. В частных случаях, когда известно наиболее неблагоприятное направление, достаточным может оказаться один акселерометр.

В зависимости от решаемых задач и видов испытаний может быть необходима различная информация о динамике ПР, и поэтому могут изменяться требования к акселерометрам. Часто по сигналам акселерометров определяются только максимальные значения составляющих ускорений, тогда их динамические характеристики должны зависеть от условий достаточно точного воспроизведения именно пиков ускорений. Требования к частотным характеристикам оказываются достаточно жесткими: при возможной длительности импульса ускорения порядка 0,01 с при торможении собственная частота акселерометра должна быть около 1000 Гц. Подобные требования к акселерометрам связаны с задачами измерения ускорений при ударах и в аварийных режимах.

Если необходимо измерять ускорения на участках для установившихся движений с медленно и мало изменяющейся скоростью и на участках действия импульсов ускорения (при разгоне и торможении), может оказаться целесообразной установка по одной оси двух акселерометров: низко- и высокочастотного, причем первый предназначен для измерения низкочастотных составляющих ускорений в режимах, близких к установившимся, а второй должен обеспечивать достоверные измерения высокочастотных составляющих и амплитуд импульсов. Для акселерометров, измеряющих медленно изменяющиеся составляющие, необходимо вычислять составляющие ускорения свободного падения по измерительным осям и вводить соответствующие поправки.

Пример. Тестирование разработанной авторами методики определения показателей точности позиционирования и ориентирования проводили при испытаниях многоцелевого промышленного робота Fanuc модели M-10iA/6L с удлиненной рукой (вылет 1632 мм) и грузоподъемностью 6 кг. Механизм манипулятора этого робота, работающего в сферической системе координат, имеет шесть степеней подвижности. Важными преимуществами робота считаются электроприводы с повышенными вращающими моментами.

Паспортное значение неповторяемости положений рабочего органа (предельных значений случайных составляющих погрешностей положения) составляет 0,08 мм, причем направления не уточняются; погрешности углового ориентирования не нормируются.

Экспериментально определяли показатели неповторяемости положения и угловой ориентации контрольного тела в виде куба с ребром 80 мм, жестко закрепленного на фланце последнего звена руки робота. Программированием движения робота контрольное тело переводилось в несколько положений как вблизи границ, так и близко к середине рабочей зоны. В зонах вблизи этих точек на специально спроектированных приспособлениях по схеме, приведенной на рис. 3, а, переустанавливались шесть аттестованных индикаторов ИЧ-02 с диапазоном измерения 2 мм и ценой деления 0,01 мм. В результате обработки данных по семи точкам позиционирования и при повторении измерений 10 раз в каждой точке наблюдались повышенные погрешности невоспроизводимости по линейным положениям соответственно + 0,14 и –0,11 мм. При этом невоспроизводимость углового положения не превышала 3'.

В заключение отметим, что вопросы совершенствования метрологического обеспечения испытаний манипуляционных и силовых роботов с учетом их стандартизации могут быть реализованы на базе новых метрологических подходов, СИ и современных информационных систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. (соглашение № 14.B37.21.1222).

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 26053—84.** Роботы промышленные. Правила приемки. Методы испытаний.
2. **Марков Н. Н., Ганевский Г. М.** Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов. М.: Машиностроение, 1993.
3. **Колпашников С. Н., Тимофеев А. В., Челпанов И. Б.** Стандартизация промышленных роботов. М.: Изд-во стандартов, 1990.
4. **Челпанов И. Б.** Испытания технических средств: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2008.

Дата принятия 20.06.2013 г.