
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 62-529

© С. В. Ванцов, В. А. Соколов, О. В. Хомутская, 2021

**АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ**

В статье рассматриваются вопросы соответствия механики манипуляторов прецизионных промышленных роботов (ППР) квалитетам наивысшей точности, указанным в нормативной технической документации и практически достигнутым в областях машиностроительной, приборостроительной и электронной промышленности. Рассматриваются возможности систем многосвязного управления сложными пространственными механизмами с избыточными степенями свободы (в том числе манипуляторами ППР); возможности систем многоконтурного управления приводами ППР с прецизионными датчиками линейных и угловых перемещений, скоростей, ускорений, градиентов ускорений (в перспективе); вопросы согласования этих параметров с параметрами вычислительной части систем управления — разрядностью цифровых датчиков (более 20 разрядов), с разрешением меньше угловой секунды.

Манипуляторы ППР используются в системах многосвязного и многоконтурного регулирования и управления с элементами искусственного интеллекта, таких как системы автоматического регулирования (САР), системы автоматического управления (САУ) и системы искусственного интеллекта.

Указанные проблемы рассматриваются в широких пределах, включая переход к областям нанотехнологий, конкретно: при линейных (нанометры) и угловых (сотые доли угловых секунд) измерениях, а также при измерении скоростей, ускорений и градиентов ускорений (в перспективе — для систем с "человеком-оператором" в контуре, т.е. систем "человек – машина" (СЧМ)).

Рассматривается обеспечение точности позиционирования ПР при невысокой точности изготовления его элементов за счет системы управления.

Кл. сл.: промышленный робот (ПР), манипулятор, квалитеты точности, САР, САУ, СИИ, прецизионные датчики механических величин, точность прецизионных датчиков, человек-оператор, система "человек – машина" (СЧМ)

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионные промышленные роботы (ППР) относятся к классу высокоточного технологического оборудования, точность которого уже в настоящее время определяется значениями единиц и долей микрометров.

Дальнейшее совершенствование и развитие ППР идет чрезвычайно высокими темпами.

Это определяется постоянным повышением требований к точности позиционирования и выполнению траекторий перемещения эффектора робота. Примером может служить использование промышленного робота (ПР) для изготовления и сборки микроэлектронных компонентов.

Выполнение этих требований определяется двумя группами факторов, а именно:

- факторы, связанные с точностью изготовления деталей робота и жесткостью их сочленения;
- факторы, связанные с системой управления ПР.

Первая группа факторов практически исчерпала свои возможности по влиянию на погрешности

позиционирования эффектора робота. В настоящее время механическое производство обеспечивает погрешности изготовления размеров деталей, составляющие доли полей допусков, определяемых Государственной нормативной документацией, и достигло своего физического предела.

Вторая группа отчасти позволяет уменьшить погрешности позиционирования эффекторов робота за счет применения специальных схем управления. Эффективность такого подхода определяется большим опытом управления сложными объектами, например стабилизацией возвращаемых модулей космических аппаратов при посадке. Такой подход позволяет реализовать принципы многосвязности систем управления ПР, а в ряде случаев использовать в контуре управления человека-оператора. Особенно актуальным вопрос увеличения точности позиционирования эффектора за счет применения специальных схем управления становится для подвижных ПР, перемещающихся относительно протяженного объекта манипулирования.

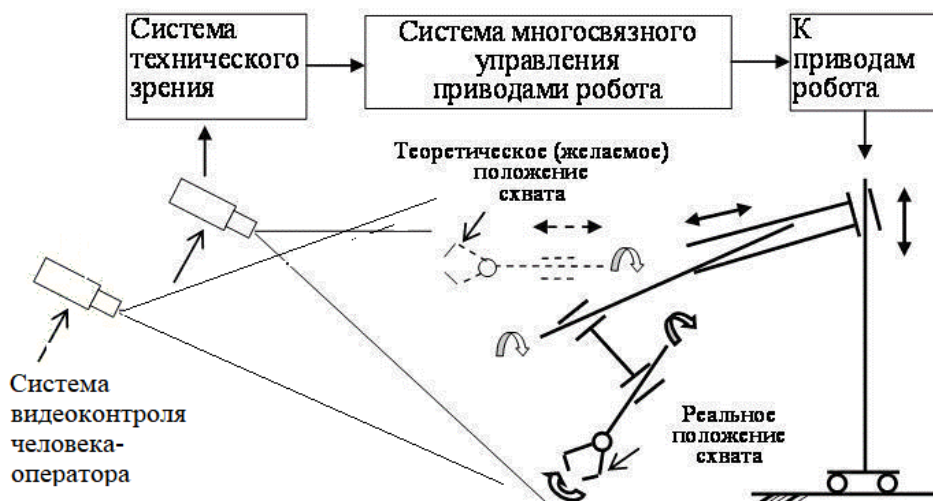


Рис. 1. Кинематическая схема прецизионного промышленного робота с системой многосвязного управления и человеком-оператором в контуре управления (точность ПР при многосвязном управлении всеми звеньями робота определяется разницей в положениях целевом и реальном захватного устройства)

ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МЕХАНИЗМОВ МАНИПУЛЯТОРОВ РОБОТОВ

В настоящее время разработано достаточно много кинематических систем и, соответственно, вариантов конструкций механизмов манипуляторов ПР и ППР, причем практически для всех промышленных производств [0, 1].

Пример одной из кинематических схем ППР представлен на рис. 1.

Эта схема иллюстрирует явление нарастания суммарной погрешности конструкции "условного" ППР, накапливающейся и увеличивающейся от "базового" элемента (основания) к последнему звену кинематической цепи звеньев манипулятора, несущему схват с рабочим инструментом ППР [2, 3].

Анализ такой схемы позволяет как оценить в целом возможные реальные индивидуальные точности механики ППР без системы автоматического управления, так и сформировать требования к системам управления ППР.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫМИ РОБОТАМИ (структурные схемы)

Системы управления ППР существенно сложнее систем управления роботами общепромыш-

ленного применения, т.к. системы ПР проектируются в основном в соответствии с методами теории автоматических систем управления и регулирования (САУ, САР), тогда как системы управления ППР включают также системы с элементами искусственного интеллекта (СИИ, САУ, САР), а "сверхпрецизионные" ППР включают еще системы с человеком-оператором в контуре в качестве контрольных (СЧМ) [4, 5].

Несмотря на различия всех указанных выше систем, при проектировании и управлении ПР и ППР предварительно отдельно рассматриваются системы (подсистемы):

- многомерные,
- многосвязные,
- многоконтурные,
- системы с человеком-оператором в контуре.

Многомерность характеризуется определенной независимостью каналов управления ППР (их автономностью).

Многосвязность управления многостепенными механизмами манипуляторов заключается в оптимизации последовательности управления звеньями манипулятора, даже выключения отдельных каналов, формируя такую группу оставшихся включенными звеньев, которая обеспечивает минимум погрешности позиционирования схвата манипулятора (схвата, рабочего инструмента).

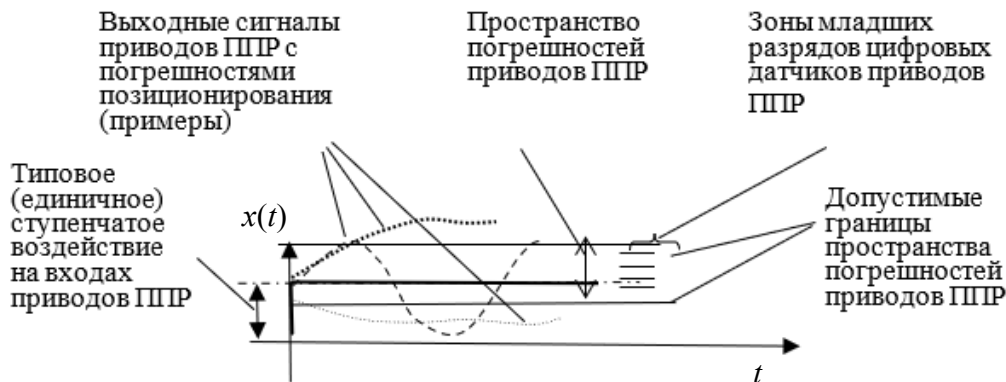


Рис. 2. Иллюстрации переходных процессов в приводах ППР без обратной связи при типовом (единичном ступенчатом) воздействии

Естественно, что такой алгоритм управления реализуем только для сложных кинематических схем манипуляторов, допускающих сокращение в процессе управления некоторого числа степеней движения при сохранении возможности реализации заданного технологического процесса изготовления конкретных изделий.

При этом методы синтеза таких алгоритмов управления могут быть достаточно простыми, т.к. число степеней свободы современных ППР, как правило, не превышает шести, и могут быть легко смоделированы на ПК.

Кроме того, может быть допущена возможность искусственного введения дополнительных степеней свободы манипуляторов для расширения возможностей оптимизации траекторий движения его схвата (инструмента) с целью минимизации интегральной ошибки движения и позиционирования.

Такие технические решения уже просматривались в сложных пространственных механизмах: как конструкциях, так и алгоритмах управления ими, например в тренажерах ручного управления космическими кораблями, в которых были введены дополнительные степени свободы в сложные пространственные механизмы, имитирующие "плавное" вращение космического летательного аппарата (КЛА) относительно имитаторов звездного неба [6].

Многоконтурность характеризуется введением в контуры управления каждым каналом корректирующей информации по производным от функций заданных траекторий движения инструмента: по скорости (1-я производная), по ускорению (2-я производная), а также, возможно, по градиенту ускорения (3-я производная) [7].

Такие алгоритмы (введение высших производных) уже просматривались в алгоритмах ручного управления тренажерами космических кораблей, т.к. была обнаружена чувствительность организма человека-оператора (пилотов ЛА, КЛА) к градиенту ускорения (3-я производная) при хаотичном вращении их относительно центра масс. Не исключена ситуация введения в перспективе в управление ППР производных более высоких порядков — 4-го, 5-го и т. д.

Решающее значение в обеспечении точности ПР имеют переходные процессы, возникающие при осуществлении рабочих движений звеньев робота.

Реализация заявленных принципов приводит к возможности управления такими переходными процессами.

Примеры переходных процессов в таких системах представлены на рис. 2, 3, 4.

Системы с человеком-оператором в контуре характеризуются формированием параллельно контурам автоматического управления манипуляторами (см. выше рис. 1) контура с человеком-оператором (группой операторов), выполняющим функции:

- во-первых, контроль точности движения и позиционирования схвата манипулятора (с рабочим инструментом) при реализации заданного технологического процесса;
- во-вторых, выполнение более точных управляющих действий манипулятором благодаря применению в качестве датчиков оценки качества движения и позиционирования высокоточных оптических систем.

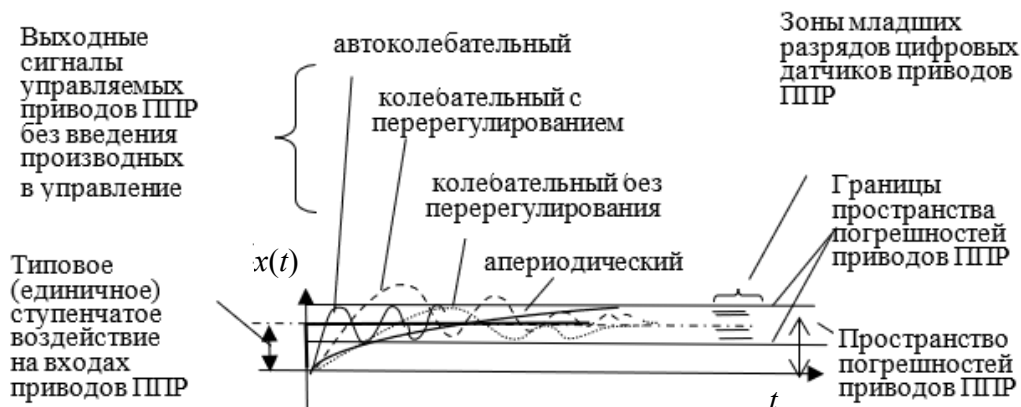


Рис. 3. Иллюстрации переходных процессов в приводах ППР с обратной связью по позиционированию при типовом (единичном ступенчатом) воздействии

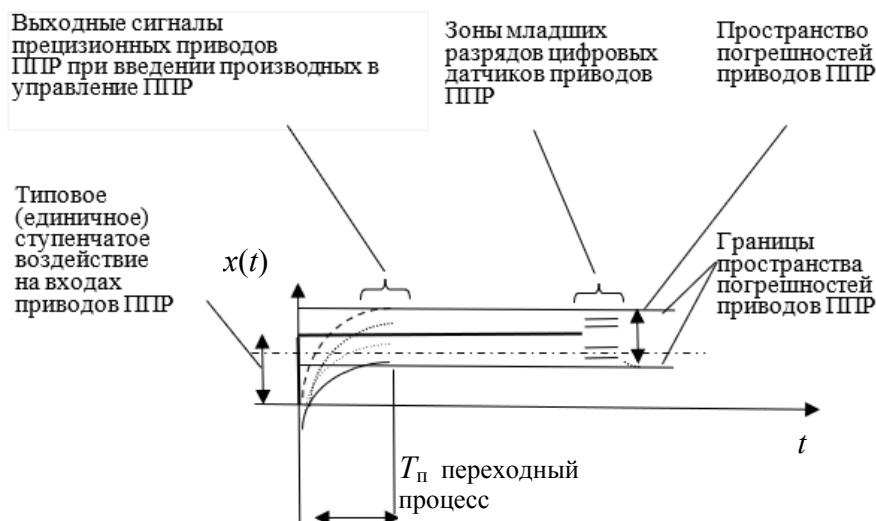


Рис. 4. Иллюстрации переходных процессов в приводах ППР с введением производных в управляющий сигнал при типовом (единичном ступенчатом) воздействии

Для этого в конструкциях ППР требуется использование высокоточных цифровых датчиков: перемещений, скоростей, ускорений. В целом их применение приводит к эффективному и точному управлению манипуляторами ППР в пространстве.

Примеры, иллюстрирующие конструкции и технические характеристики прецизионных цифровых датчиков (энкодеров — в современной терминологии) линейных и угловых перемещений звеньев манипуляторов ППР, приведены в [8, 9].

Из анализа технических характеристик этих датчиков становится очевидным, что современный

уровень точности ППР уже приближается к направлениям "нанотехнологий" в областях механики и управления ППР — с учетом введения в управляющие сигналы высших производных от управляющих функций, при условии применения цифровых датчиков с числом двоичных разрядов порядка $\gg 21$ и разрешением $\ll 1$ угл. секунды, т.е. с характеристиками, существенно превышающими датчики для простейших алгоритмов только позиционного управления ($\ll 20$ разрядов, с разрешением $\gg 1$ угл. секунды).

На сегодняшний день промышленность выпускает цифровые датчики линейных перемещений (энкодеры), точность и разрешение которых достигают нескольких десятков нанометров. Аналогично разрешение угловых энкодеров достигнуто в диапазоне долей угловой секунды ($\approx 0.0020625''$).

ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ МАНИПУЛЯТОРОВ С ВЫСОКОРАЗРЯДНЫМИ ЦИФРОВЫМИ ДАТЧИКАМИ

Первой особенностью применения высокоразрядных цифровых датчиков является необходимость строгого согласования скоростных параметров движения схвата манипулятора (с рабочим инструментом) с технологическими режимами и процессами контроля человеком-оператором функционирования ППР в комплексе.

Это обусловлено чрезвычайно малыми значениями рабочих шагов схвата манипулятора ППР, малыми длительностями тактов дискретизации траекторий движения, низкими значениями "ползучих" скоростей во многих процессах, иногда даже не воспринимаемых глазом человека-оператора без современных высокоточных оптических средств (см. выше примеры систем с человеком-оператором в контуре).

Рассмотрим пример расчета параметров скорости движения схвата (рабочего органа) ППР для конкретного технологического процесса:

- пусть заданная рабочая скорость движения схвата манипулятора (требуемая по заданию на технологический процесс) — 1 мм/с;
- разрядность датчиков (энкодеров угловых перемещений) приводов манипулятора — 20 двоичных разрядов ($1\ 296\ 000$ дв. ед.); цена одного разряда: ≈ 1 угл. с;
- шаг (дискретность) траектории технологического процесса — 1 нм;
- частота задающего генератора управления датчиками положения — 1 ГГц;
- таким образом, итоговая скорость равна перемещению 1 нм за 1 шаг дискретизации, т.е. соответствует заданной скорости рабочего инструмента 1 мм/с.

Этот пример иллюстрирует при использовании соответствующих датчиков возможность перемещения с нанометровой погрешностью при разумной технологической скорости перемещения эффектора.

Второй особенностью является введение в контурах управления производных высших порядков (1-го, 2-го, возможно, 3-го), что требует применения цифровых датчиков с увеличенным числом двоичных разрядов (сверх того количества, кото-

рое необходимо только для самой простой задачи — позиционирования манипулятора, без учета качества переходных процессов).

Общее число разрядов при этом будет определяться в зависимости от методов цифрового дифференцирования, но в любом случае оно будет больше необходимого для простого позиционирования, и это приведет к усложнению как алгоритмических, так и конструкторских решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современных конструкций механизмов манипуляторов и систем управления ППР позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Современные конструкции "механики" ППР достигли уровня, соответствующего наивысшим качествам точности, указанным в таблицах допусков и посадок ЕСДП, используемым в машиностроительных и приборостроительных производствах.

2. Достигнутые результаты подтверждаются публикациями технических данных по созданию комплексов как соответствующих конструкций манипуляторов, так и систем управления ППР в целом.

3. Анализ темпов развития технологий конструирования и производства ППР позволяет надеяться на дальнейшее развитие отраслей машиностроения и приборостроения как в части перехода к достижению еще более высоких точностей конструкций и управления ППР, так и в направлении расширения и использования разного вида нормативных материалов (в том числе таблиц допусков и посадок, указанных выше) с данными уже в областях нанометрии: расширением диапазонов измерений линейных и угловых величин, временных отрезков (нанометров, наносекунд), тысячных долей угловых секунд и т.д.

Таким образом, в данной работе проблема прецизионности роботов рассмотрена с самых разных сторон, с учетом новейших теоретических и практических достижений и при том с указанием реальных примеров из разных областей науки и техники в части конструирования и управления ППР.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства высшего образования и науки России, номер темы FSFF-2020-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдаков С.Ф., Дьяченко В.А., Тимофеев А.Н. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов: Учеб. пособие для студ. вузов. М.: Высш. шк., 1986. 264 с.

2. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. 488 с.
3. Сыроватченко П.В. Справочник технолога-приборостроителя. Т. 1. М.: Машиностроение, 1980. 607 с.
4. Справочник технолога-приборостроителя. Т. 2 / под ред. Е.А. Скороходова. М.: Машиностроение, 1980. 463 с.
5. Техническая кибернетика: Серия инженерных монографий. Теория автоматического регулирования. Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 770 с.
6. Ломов Б.Ф. Справочник по инженерной психологии. М.: Машиностроение, 1982. 368 с.
7. Имитатор условий космического полета Т-27 // Астронавтика и ракетодинамика. 1966. Вып. 44.
8. Оценка возможности защиты операционного блока офтальмологического центра, размещенного на теплоходе "ПЕТР ПЕРВЫЙ", от судовой качки и вибрационных воздействий, НИИАС, 1990.
9. К вопросу о точности угловых энкодеров. Техническое издание отдела преобразователей линейных и угловых перемещений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf>
10. Примеры применения датчиков линейных перемещений [Электронный ресурс]. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/mitutoyo/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3_Mitutoyo_o_2017_2019_%D0%A0%D1%83%D1%81_10.pdf

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва

Контакты: Хомутская Ольга Владиславовна,
khomutskayaov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 09.09.2021

ANALYSIS OF ACCURACY PROBLEMS OF PRECISION INDUSTRIAL ROBOTS

S. V. Vantsov, V. A. Sokolov, O. V. Khomutskaya

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

The article highlights the issues of compliance of the mechanics of manipulators of precision industrial robots (PIRs) with the highest accuracy standards specified in the normative technical documentation and practically achieved in the fields of machine-building, instrument-making and electronic industries. In the spotlight there are the possibilities of systems of multi - connected control of complex spatial mechanisms with excessive degrees of freedom (including manipulators of PIRs), the possibilities of systems of multi-circuit control of PIR drives with precision sensors of linear and angular displacements, velocities, accelerations, acceleration gradients (in the future), the issues of matching these parameters with the parameters of the computational part of control systems — the bit depth of digital sensors (more than 20 digits) with an resolution of less than an arc second.

PIR manipulators are used in systems of multi-connected and multi-circuit regulation and control with elements of artificial intelligence, such as automatic adjustment systems (AASs), automatic control systems (ACSs) and artificial intelligence systems (AISs).

These problems are considered in a wide range, including the transition to the field of nanotechnologies, specifically: for linear (nanometers) and angular (hundredths of arc seconds) measurements, as well as the measurements of velocities, accelerations, and acceleration gradients (in the future — for systems with a human operator in the loop, i.e. human-machine systems (HMSs)).

Keywords: industrial robot, manipulator, accuracy qualifications, ACS, AAS, AIS, precision mechanical value sensors, precision sensors, human operator, human-machine system

INTRODUCTION

Precision industrial robots (PIRs) belong to the class of high-precision technological equipment, the accuracy of which is already determined by the values of units and fractions of micrometers.

Further improvement and development of the PIRs is proceeding at an extremely rapid pace.

This is determined by the constant increase in the requirements for positioning accuracy and execution of the robot effector trajectories. An example is the use of an industrial robot (IR) for manufacturing and assembling microelectronic components.

Two groups of factors determine whether these requirements are met, namely:

- factors related to accuracy of manufacturing of robot parts and rigidity of their articulation;
- factors associated with the IR control system.

The first group of factors has practically exhausted their ability to influence the sinfulness of the robot effector positioning. Currently, mechanical production allows manufacturing errors in the dimensions of parts, equal to no more than a fraction of the tolerance fields, determined by the State Regulatory Documentation, and has reached its physical limit.

The second group partially reduces the positioning errors of the robot effectors due to the use of special control schemes. The effectiveness of this approach is

determined by extensive experience in managing complex objects, such as stabilizing reentry spacecraft modules during landing. This approach makes it possible to use the principles of multi-connectivity of the IR control systems, and in some cases to use human operator in the control loop. The issue of increasing the effector positioning accuracy due to application of special control schemes becomes particularly relevant for locomotive IRs, moving relative to extended object of manipulation.

STRUCTURAL ACCURACY ISSUES OF ROBOT MANIPULATOR MECHANISMS

Currently, quite a lot of kinematic systems and, accordingly, design variants of the mechanisms of the IR and PIR manipulators have been developed, and for almost all industrial productions [1, 2].

An example of one of the PIR kinematic schemes is shown in Fig. 1.

Fig. 1. Kinematic diagram of a precision industrial robot with a multi-link control system and a human operator in the control loop
(IR accuracy in multi-link control of all robot links is determined by the difference in target and real positions of gripper)

This scheme illustrates the phenomenon of increasing the total error of sample PIR design, accumulating and increasing from the base to the last link of the kinematic chain of the links of the manipulator, carrying the grip with the PIR working tool [3, 4].

The analysis of such a scheme lets both to evaluate possible real individual accuracy of PIR mechanics without automatic control system in general, and to generate requirements for PIR control systems.

PRECISION ROBOT CONTROL SYSTEMS (structural diagrams)

Control systems of the PIRs are significantly more difficult than control systems of robots for common industrial application since the IR systems are projected generally according to methods of the theory of automatic control and regulation systems (AASs, ACSs), whereas PIR control systems include also systems with elements of artificial intelligence (AISs, AASs, ACSs), and "over-precision" PIRs also include systems with a human operator in the loop as control ones (HMSs) [5, 6].

Despite the differences of all above mentioned systems, following systems (subsystems) are to be considered separately prior to IR and PIR design and control:

- multidimensional;
- multi-link;
- multi-loop;
- systems with a human operator in the loop.

Multidimensionality is characterized by a certain independence of PIR control channels (their autonomy).

Multi-link control of multi-degree mechanisms of manipulators lies in optimization of sequence of manipulator links control, even disconnection of individual channels, forming such a group of links that remain active, that provides minimum error of manipulator grip (working tool) positioning.

Naturally, such a control algorithm is implemented only for complex kinematic schemes of manipulators that allow reducing a number of motion degrees in the course of control process, while maintaining the possibility of implementing a given technological process of manufacturing specific products.

At the same time, the methods for synthesizing such control algorithms can be quite simple, since the degrees of freedom of modern PIRs, as a rule, does not outnumber six, and can be easily modeled on a PC.

In addition, it may be possible to artificially introduce additional degrees of freedom of the manipulators in order to expand the possibilities of optimizing the motion paths of its grip (tool) in order to minimize integral motion and positioning error.

Such technical solutions have already been seen in complex spatial mechanisms: both structures and their control algorithms, e.g. in simulators for manual control of spaceships, in which additional degrees of freedom were introduced into complex spatial mechanisms that simulate the smooth rotation of a spacecraft relative to starry sky simulators [7].

Multi-loop control is characterized by introduction of correcting information into control loops by each channel. The information is on derivatives from the functions of the given tool paths: speed (1st derivative), acceleration (2nd derivative), and also, possibly, acceleration gradient (3rd derivative) [8].

Such algorithms (introduction of higher derivatives) were already seen in the algorithms for manual control of spacecraft simulators, since the sensitivity of the human operator body (aircraft and spacecraft pilots) to the acceleration gradient (3rd derivative) was discovered when they were randomly rotated relative to the center of mass. The situation of introduction of derivatives of higher orders — 4th, 5th, etc — in the PIR control is possible in the future.

Transient processes arising from the workpath of the robot links are crucial in ensuring the IR accuracy.

Implementation of the stated principles leads to an ability to control such transient processes.

Examples of transient processes in such systems are shown in Fig. 2, 3, 4.

Fig. 2. Illustration of transient processes in PIR drives without feedback under typical (single step) impact

Fig. 3. Illustration of transient processes in PIR drives with positioning feedback under typical (single step) impact

Fig. 4. Illustration of transient processes in PIR drives under typical (single step) impact when derivatives are introduced into control signal

Systems with human operator in the loop are characterized by the formation of a loop with human operator (group of operators) in parallel to the loops of automatic control of manipulators (see Fig. 1). The human operator of the loop performs the following functions:

- first, control of the accuracy of movement and positioning of the manipulator grip (with the working tool) during the implementation of the given technological process;
- secondly, performing more accurate manipulator control actions due to the use of high-precision optical systems as sensors for evaluating the quality of movement and positioning.

This requires the use of high-precision digital sensors of motion, speed, acceleration in PIR design. In general, their use leads to effective and accurate control of the PIR manipulators in space.

Examples illustrating constructions and technical characteristics of precision digital sensors (encoders in modern terminology) of linear and angular movements of links of PIR manipulators are given in [9, 10].

As a result of the analysis of the technical characteristics of these sensors, it becomes clear that the modern level of PIR accuracy is already approaching the directions of "nanotechnology" in the fields of PIR mechanics and control, taking into account the introduction of higher derivatives of control functions to control signals, and under condition of the use of digital sensors with the number of bits of order $\gg 21$ and resolution $\ll 1$ arcseconds, i.e. with characteristics significantly greater than those of sensors for the simplest algorithms of positional control only ($\ll 20$ bits, with a resolution of $\gg \gg 1$ arcsecond).

Today, the industry produces digital linear displacement sensors (encoders), the accuracy and resolution of which reach several tens of nanometers. Similarly, the resolution of angular encoders has reached the arc second fraction range (≈ 0.0020625).

FEATURES OF MANIPULATOR DRIVE CONTROL EQUIPMENT WITH HIGH-BIT DIGITAL SENSORS

The first feature of using high-bit digital sensors is the need to strictly coordinate the speed parameters of the manipulator grip path (with the working tool) with technological modes and processes of human-operator control of PIR functioning as a whole.

This is due to the extremely small values of the working steps of the PIR manipulator grip, the small duration of the sampling cycles of the motion paths, the low values of the "creeping" speeds in many processes, sometimes not even perceived by the human operator's eye without modern high-precision opt-

ical means (see examples of systems with a human operator in the loop above).

Let us consider an example of calculation of parameters of motion speed of the PIR grip (working member) for a specific process:

- the given operating speed of manipulator grip motion (required by the assignment for the technological process) — 1 mm/s;
- bit depth of sensors (encoders of angular motions) of manipulator drives — 20 bits (1 296 000 bin. units); scale interval ≈ 1 arcsecond;
- step (discreteness) of the process path — 1 nm;
- frequency of master control generator of sensor positioning — 1 GHz;
- thus, the final speed is equal to displacement of 1 nm in 1 sampling step, i.e. corresponds to the given working tool speed of 1 mm/s.

This example illustrates the possibility of displacement with nanometer-scale error of effector motion using the appropriate sensors and at reasonable technological speed.

The second feature is the introduction of higher-order (1st, 2nd, possibly 3rd) derivatives in control loops, that requires the use of digital sensors with an increased number of bits (beyond the amount that is necessary only for the simplest task — positioning the manipulator, without taking into account the quality of transients).

The total number of bits in this case will be determined depending on the methods of digital differentiation, but, in any case, it will be more than necessary for simple positioning, and this will lead to the complication of both algorithmic and design solutions.

CONCLUSION

Analysis of modern structures of manipulator mechanisms and control systems of PIR enables to formulate the following conclusions.

1. Modern designs of PIR "mechanics" have reached the level corresponding to the highest accuracy standards indicated in the tables of tolerances and fits of the USTF used in machine-building and instrument-making industries.

2. The achieved results are confirmed by the publications of technical data on the creation of complexes of both the corresponding structures of manipulators and the control systems of PIR as a whole.

3. An analysis of the pace of development of technologies for the PIR design and production uncovers the prospects for the further development of the engineering and instrument industries, both in terms of transition to achieve even higher accuracy of PIR design and control, and in the direction of expanding and using various types of regulatory documentation (including tables of tolerances and fits specified above)

with data already in the fields of nanometry: expansion of measurement ranges of linear and angular values, time segments (nanometers, nanoseconds), thousandths of arc second, etc.

Thus, in this work, the problem of accuracy of robots is considered from various standpoints, taking into account the latest theoretical and practical achievements and moreover, with real examples from different fields of science and technology in terms of PIR design and control.

REFERENCES

1. Burdakov S.F., D'yachenko V.A., Timofeev A.N. *Proektirovanie manipulyatorov promyshlennyykh robotov i robotizirovannykh kompleksov: Ucheb. posobie dlya stud. Vuzov* [Designing manipulators of industrial robots and robotic complexes: Textbook for students. universities]. Moscow, Higher School Publ., 1986. 264 p. (In Russ.).
2. Bulgakov A.G., Vorob'ev V.A. *Promyshlennyye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie* [A. Industrial robots. Kinematics, dynamics, control and management]. Moscow, SOLON-PRESS Publ., 2011. 488 p. (In Russ.).
3. Syrovatchenko P.V. *Spravochnik technologa-priborostroitelya. T. 1* [Handbook of an instrument-making technologist. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 607 p. (In Russ.).
4. Skorochodov E.A., eds. *Spravochnik technologa-priborostroitelya. T. 2* [Handbook of an instrument-making technologist. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 463 p. (In Russ.).
5. Solodovnikov V.V., eds. *Technicheskaya kibernetika: Seriya inzhenernykh monografiy. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kniga 1. Matematicheskoe opisanie, analiz ustoychivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Technical cybernetics: A series of engineering monographs. The theory of automatic regulation. Book 1. Mathematical description, analysis of stability and quality of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 770 p. (In Russ.).
6. Lomov B.F. *Spravochnik po inzhenernoy psichologii* [Handbook of engineering psychology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 368 p. (In Russ.).
7. [Simulator of space flight conditions T-27]. *Astronavtika i raketodinamika* [Astronautics and rocket dynamics], 1966, is. 44. (In Russ.).
8. *Ozenka vozmozhnosti zaschity operazionnogo bloka oftal'mologicheskogo zentra, razmeschenogo na teplochode "PETR PERVYY", ot sudovoy kachki i vibratsionnykh vozdeystviy* [Assessment of the possibility of protecting the operating unit of the ophthalmological center located on the ship "PETER the GREAT" from ship pitching and vibration effects]. NIIAC Publ., 1990. (In Russ.).
9. *K voprosu o tochnosti uglovyykh enkoderov. Technicheskoe izdanie otdela preobrazovateley lineynykh i uglovyykh peremescheniy* [On the issue of the accuracy of angular encoders-Technical publication of the Department of linear and angular displacement converters] URL: <http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf> (In Russ.).
10. *Primery primeneniya datchikov lineynykh peremescheniy* [Examples of linear motion sensors]. (In Russ.). URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/mitutoyo/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3_Mitutoyo_o_2017_2019_%D0%A0%D1%83%D1%81_10.pdf

Contacts: Chomutskaya Ol'ga Vladislavovna,
kchomutskayaov@gmail.com

Article received by the editorial office on 09.09.2021