

УДК 62-529

© С. В. Ванцов, В. А. Соколов, О. В. Хомутская, 2020

**КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫМИ РОБОТАМИ**

В статье рассматривается система управления промышленными роботами (ПР), в том числе прецизионными (ППР), представляющая объединение систем различных уровней иерархии управления в единую (интегрированную) систему, дается анализ структурной схемы, анализ исходной математической формулировки задачи управления и, соответственно, принципов построения алгоритмов функционирования таких систем в целом.

Представленные иерархические системы управления могут быть использованы не только для стационарных и мобильных наземных роботизированных комплексов, но и для управления движением одиночных и групповых БПЛА, поскольку и в том, и в другом случае планируется перемещение органа ПР, реализующее поставленную задачу, в пространстве.

Кл. сл.: промышленный робот (ПР), прецизионный промышленный робот (ППР), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), манипулятор ПР, иерархическая структурная схема управления ПР, человек-оператор (Ч-О), цели управления, критерии управления, оптимизация управления

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработана обширная классификация кинематических схем и конструкций промышленных роботов (ПР), в том числе прецизионных (ППР), соответственно, систем управления ПР, ППР и различных технологических процессов с их применением, эффективно разрабатываемых и внедряемых в производства самых разнообразных изделий [1–6].

Однако расширение номенклатуры производимых изделий требует непрерывного совершенствования технологического оборудования, включающего как "механику", так и весь комплекс управляющих устройств: "электрики", электроники, пневматики, гидравлики, оптики и их возможных различных "комплексирований" (комбинаций).

Совершенно очевидно, что это относится также к промышленным роботам и конкретно — к прецизионным роботам, которые становятся незаменимым технологическим оборудованием в производствах микроэлектронной техники, оптической техники и даже совершенно далекой от техники области — микрохирургии. В связи с этим развитие и углубление различных направлений анализа и синтеза конфигурации сложных систем управления такими техническими объектами, как ПР и ППР, непрерывно развивается [7–10].

Общие подходы к управлению ПР применимы в том числе и к, казалось бы, первоначально далекому от управления стационарными и мобильными

роботами задачам организации движения БПЛА. Это определяется тем, что БПЛА по сути реализуют те же принципы построения систем управления. Разница заключается лишь в том, что в алгоритмы управления добавляется еще одна координата, связанная с их пространственным перемещением [11].

В данной статье рассматриваются вопросы анализа и синтеза обобщенных структурных схем, исходной постановки задачи и логики управления техническими объектами, конкретно относящимися к группе ППР, на основе современных подходов теорий систем: с человеком-оператором в контуре (СЧМ), с элементами искусственного интеллекта (СИИ), автоматического управления (САУ) и автоматического регулирования (САР) [112].

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ
И ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ****Классификация структурных схем
систем управления**

Обобщенная структурная схема системы управления принципиально любым техническим объектом (процессом) представлена на рис. 1.

Иерархическая структурная схема системы управления сложными техническими объектами (в том числе несколькими объектами) представлена на рис. 2.



Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления принципно любым техническим объектом (процессом)

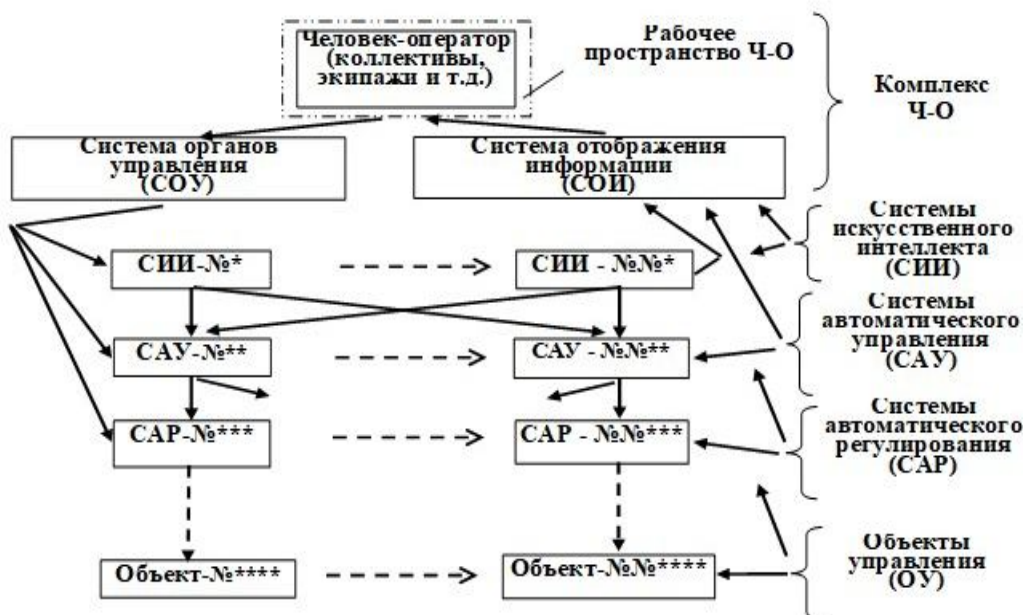


Рис. 2. Обобщенная иерархическая структурная схема системы управления сложными техническими объектами

Верхний уровень иерархии: группа устройств, с которыми взаимодействует человек-оператор (Ч-О), являющийся главным действующим звеном принципно любой системы управления с человеком-оператором в контуре управления; в состав данной группы устройств входят:

- устройства системы отображения информации (СОИ), представляющей Ч-О всю необходимую в данный момент информацию о функционировании всей системы;

- устройства системы органов управления (СОУ), посредством которых Ч-О непосредственно сам вводит управляющие воздействия в систему.

Средние уровни иерархии:

- группы устройств, представляющие подсистемы, относящиеся к классу систем с элементами искусственного интеллекта (СИИ);

- группы устройств, представляющие подсистемы, относящиеся к классу систем автоматического управления (САУ), синтезированные и функционирующие в соответствии с традиционными методами современной теории автоматического управления (ТАУ).

Нижние уровни иерархии: группы устройств, представляющие подсистемы, относящиеся к классу систем автоматического регулирования (САР), синтезированные и функционирующие в соответствии с традиционными методами современной теории автоматического регулирования (ТАР).

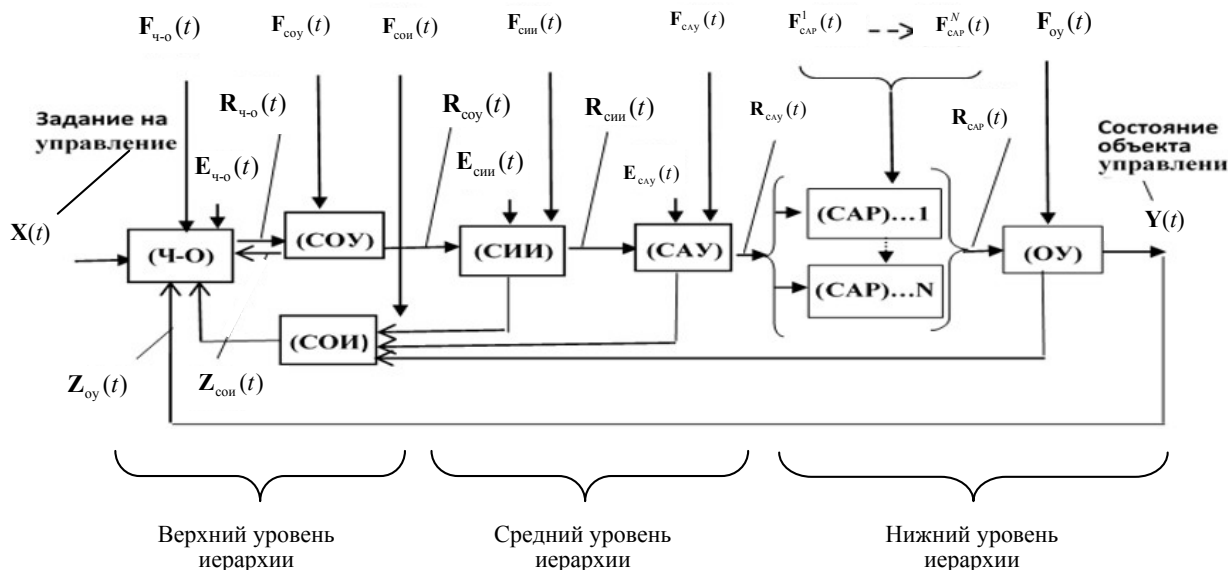


Рис. 3. Обобщенная иерархическая структурная схема системы управления одним объектом

Такое представление об иерархии управления сложными объектами позволяет использовать его не только для управления наземными роботизированными объектами и одиночными БПЛА, но и группами беспилотных летательных аппаратов [13, 134].

Обобщенная иерархическая структурная схема системы управления одним объектом представлена на рис. 3

Обобщенные векторные пространства математических моделей систем управления произвольными объектами

Структурная схема векторного пространства обобщенной системы управления представлена на рис. 1 и содержит:

$X(t)$, $Y(t)$ — соответственно, заданный и действительный векторы состояния объекта управления;

$R(t)$ — вектор управления;

$Z(t)$ — вектор наблюдения;

$E(t)$ — критерий качества управления;

$A(t)$, $Q(t)$, $F(t)$ — векторы внешних воздействий на объект управления и ограничений на управление и на ресурсы.

Традиционная (классическая) постановка задачи управления заключается в формировании вектора управления $R(t)$, обеспечивающего достижение цели управления $Y(t) \Rightarrow X(t)$ при условии обес-

печения экстремума показателя качества управления (критерия) $E(t)$: \max или \min и отвечающего ограничениям $A(t)$, $Q(t)$, $F(t)$, действующим в системе.

На основе структурной схемы (рис. 3) может быть сформировано векторное пространство иерархической схемы однообъектной системы.

Иерархическая структурная схема векторного пространства однообъектной системы управления:

$X(t)$ — заданный вектор состояния объекта управления;

$Y(t)$ — вектор действительного состояния объекта управления;

$Z_{оу}(t)$, $Z_{сои}(t)$ — векторы наблюдения;

$R_{ч-о}(t)$, $R_{соу}(t)$, $R_{сии}(t)$, $R_{сау}(t)$,

$R_{сау}^I(t)$ — векторы управления;

$E_{ч-о}(t)$, $E_{сии}(t)$, $E_{сау}(t)$ — критерии качества управления;

$F_{ч-о}(t)$, $F_{соу}(t)$, $F_{сои}(t)$, $F_{сии}(t)$, $F_{сау}(t)$,

$F_{сау}^I(t)$, $F_{оу}(t)$ — векторы внешних воздействий на объект управления и управляющие системы (подсистемы).

Применительно к рассматриваемой системе постановка задачи управления заключается в форми-

ровании векторов управления $R_*(t)$, реализующих достижение цели управления $Y(t) \Rightarrow X(t)$ при условии обеспечения экстремумов показателей (критериев) качества управления $E_*(t)$ и отвечающих ограничениям и внешним воздействиям (помехам), действующим в системе.

В соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3, могут быть определены основные направления выбора методов оптимизации рассматриваемой в статье сложной иерархической системы управления ПР (ППР).

ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ППР

Иерархический уровень "человек-оператор"

На данном уровне все управляющие действия $R_{ч-о}(t)$ выполняются человеком-оператором в соответствии:

- с требованиями (и указаниями) технической документации на ПР;
- инструкциями, разработанными для конкретного ПР и конкретного состава технологических операций, которые должны выполняться;
- непрерывно (неизбежно) накапливающимся опытом человека-оператора в процессе конкретной работы в составе рассматриваемой (конкретной) системы.

Иерархический уровень интеллектуальной части системы (СИИ)

В данной задаче (системе) имеет место оптимизация траекторий движения рабочего инструмента, реализуемого посредством приводов манипулятора ПР (ППР), рис. 4.

Теоретически данная задача представляет нахождение в трехмерном пространстве ПР траектории в соответствии с выбранными критериями оптимизации [145].

Возможны следующие варианты формирования движения рабочего инструмента [156–178]:

- на основе опыта формирования траекторий (при наличии накопленного банка траекторий) для аналогичных производственных задач;
- на основе формирования множества случайных точек в трехмерном пространстве координат ПР и далее: методом Монте-Карло определить путь движения от точки к точке в соответствии с выбранными критериями $E_{СИИ}(t)$, например:
 - тах скорости перемещения от точки к точке;
 - min усилия, которое должно быть обеспечено, например, при обработке какой-либо детали с заданной чистотой поверхности;
- метод предварительного имитационного моделирования последовательного пошагового приближения от исходной (начальной) точки к конечной точке.

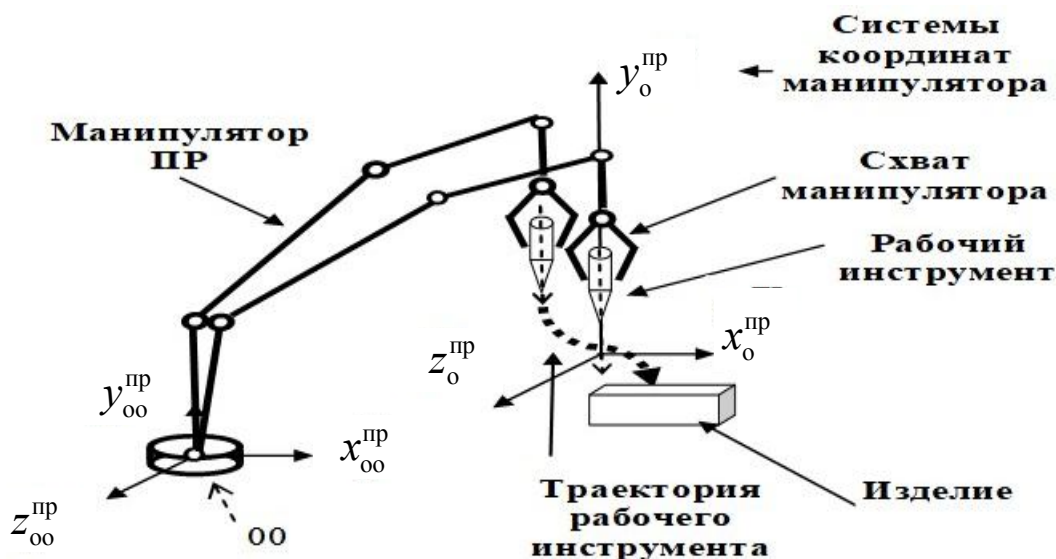


Рис. 4. Иллюстрация формирования траекторий движения

Иерархический уровень систем автоматического управления отдельными звеньями манипулятора ПР

Данная задача представляет реализацию перемещения каждого отдельного звена ПР из одной конкретной точки в другую конкретную точку в соответствии с "классической" формулировкой задачи управления (см. выше) [19–201].

В качестве критериев формирования векторов управления могут быть выбраны:

- тах скорости, т.е. минимальное время перемещения между двумя заданными точками;
- тах ускорения, развиваемые приводами;
- \min отклонения (погрешности) от кратчайшего направления, соединяющего начальную и конечную точки.

Реализации задачи управления на уровнях иерархии СИИ и САУ существенно различаются, а именно:

– на иерархическом уровне СИИ решается многомерная задача управления сложным многокоординатным объектом, в которой интегральный вектор управления представлен комплексом "математически" связанных между собой частных векторов управления;

– на иерархическом уровне САУ реализуется комплекс частных (автономных) задач управления, сформулированных на предыдущем уровне (СИИ) и решаемых уже в соответствии с несвязанными между собой векторами управления.

Иерархический уровень систем регулирования (уровень САР)

На данном уровне реализуется конечный этап вывода рабочего инструмента ПР в рабочую точку [22, 23].

Задача оптимизации на этом этапе уже не ставится, т.к. системы, реализующие движение соответствующих звеньев манипулятора, уже являются составными частями ПР, а именно приводами, их технические характеристики известны (быстродействие, точность как в статике, так и в динамике).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ, проведенный в данной статье, показал, что задачи создания системы управления сложными многомерными техническими объектами типа ПР (и ППР) могут быть решены на основе современных подходов к проектированию разных систем: с человеком-оператором в контуре (СЧМ), систем с элементами искусственного интеллекта (СИИ), систем автоматического управления (САУ) и систем автоматического регулирования (САР), что позволит создавать системы управле-

ния производственно-техническими комплексами ПР любой сложности.

Представленные иерархические системы управления применимы не только для стационарных и мобильных наземных роботизированных комплексов, но и для управления движением одиночных и групповых БПЛА, поскольку и в том, и в другом случае решается задача целевого перемещения органа ПР в пространстве.

В статье сами объекты управления ПР (ППР) представлены без учета погрешностей их механики (манипуляторов). Однако при использовании современных подходов рассмотрения манипуляторов как "нежестких" и "многолюфтовых", а также свободно перемещающихся в пространстве механических конструкций задачу можно существенно расширить и рассмотреть управление ПР в любых режимах — как в динамических, так и в статических с требуемой точностью движения и позиционирования.

Анализ принципиальных особенностей, формирование объединенного математического аппарата и реализация совместного функционирования рассмотренных выше иерархических уровней систем управления ПР представляет самостоятельную задачу, в основе которой рассмотренные выше структурные схемы.

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. Klimchik A., Magid E., Pashkevich A. Machining with Serial and Quasi-Serial Industrial Robots: Comparison Analysis and Architecture Limitations // Engineering, Computer Science 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 252–259. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759063
3. Horn C., Kruger J. Feasibility of Connecting Machinery and Robots to Industrial Control Services in The Cloud // 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2016. DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733661
4. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Pashkevich A. Efficiency Evaluation of Robots in Machining Applications Using Industrial Performance Measure // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017. Vol. 48. P. 12–29. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.005
5. Dekle R. Robots and Industrial Labor: Evidence from Japan. 2020. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3670356> DOI: 10.2139/ssrn.3670356

6. *Guyonneau R., Mercier F.* IstiABot, An Open Source Mobile Robot for Education and Research // 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo). 2019. P. 131–136. DOI: 10.1109/RoMoCo.2019.8787363
7. *Ванцов С.В.* Роботизация производства: направления и некоторые проблемы // Электроника НТБ. 2020. № 7. С. 176–178.
8. *Костров Б.В., Ручкин В.Н., Фулин В.А.* Искусственный интеллект и робототехника. М.: Диалог-МИФИ, 2008. 224 с.
9. *Klimchik A., Magid E., Pashkevich A.* Design of Experiments for Elastostatic Calibration of Heavy Industrial Robots with Kinematic Parallelogram and Gravity Compensator // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49, no. 12. P. 967–972. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.901
10. *Villania V., Pinib F., Lealib F., Secchi C.* Survey on Human – Robot Collaboration in Industrial Settings: Safety, Intuitive Interfaces and Applications // Mechatronics. 2018. Vol. 55. P. 248–266.
11. *Wang Q., Li J., Hua Q., Zhu Y.* Globally Stable Rigid Formation Control for Multi-Robot Systems // Proceedings of the Thirty-Fourth Chinese Control Conference, Hangzhou, 2015. Google Scholar, 2015. P. 7505–7510.
12. Теория автоматического регулирования. Книга 1. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1967. 770 с.
13. *Kima J., Croft E.A.* Online Near Time-Optimal Trajectory Planning for Industrial Robots // Robotics And Computer-Integrated Manufacturing. 2019. Vol. 58. P. 158–171.
14. *Dudek W., Wegierek M., Karwowski J., Szykiewicz W., Winiarski T.* Task Harmonisation for A Single-Task Robot Controller // 12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) / K. Kozłowski, Ed. IEEE. 2019. P. 86–91.
15. *Mohnkea Ch., Reinkobera S., Uhlmann E.* Constructive Methods to Reduce Thermal Influences on The Accuracy of Industrial Robots // Procedia Manufacturing. 2019. Vol. 33. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.004
16. *Martinova L.I., Sokolov S.S., Nikishechkin P.A.* Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots // International Conference in Swarm Intelligence ICSI 2015: Advances in Swarm and Computational Intelligence. 2015. P. 200–207. DOI: 10.1007/978-3-319-20472-7_22
17. *Bingol M.C., Aydogmus O.* Performing Predefined Tasks Using the Human-Robot Interaction on Speech Recognition for An Industrial Robot // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2020. Vol. 95. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103903
18. *Filaretov V., Yukhimets D., Mursalimov E.* The Universal Onboard Information-Control System for Mobile Robots // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 737–745. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.427
19. *Bahloul A., Tliba S., Chitour Y.* Dynamic Parameters Identification of An Industrial Robot With And Without Payload // Ifac-Papersonline. 2018. Vol. 51, is. 15. P. 443–448. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.185
20. *Petukhov A., Steshina L., Kurasov P., Tanryverdiev I.* Decision Support System for Assessment of Vocational Aptitude of Man-Machine Systems Operators // 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems (IS). 2016. P. 672–679. DOI: 10.1109/IS.2016.7737383
21. *Zhao Y.M., Lin Y., Xi F., Guo S.* Calibration-Based Iterative Learning Control For Path Tracking of Industrial Robots // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62, no. 5. P. 2921–2929. DOI: 10.1109/TIE.2014.2364800
22. *Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Pashkevich A.* Comparison Study of Industrial Robots for High-Speed Machining // Mechatronics and Robotics Engineering for Advanced and Intelligent Manufacturing. 2017. P. 135–149. DOI: 10.1007/978-3-319-33581-0_11
23. *Stebulyanina M.M., Kovshovb E.E., Kuvshinnikovb V.S.* Interval Quadratic Connected Control Systems in Industrial Robotics and Mechatronics // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 579–585. DOI: 10.1016/j.procs.2019.02.096

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Контакты: Хомутская Ольга Владиславовна,
khomutskayaov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 24.12.2020

COMPREHENSIVE CONTROL SYSTEM FOR INDUSTRIAL ROBOTS

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

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russian Federation

The article considers the control system for industrial robots (IR), including precision robots (PIR), representing the integration of systems of different levels of the control hierarchy into a single (integrated) system. There are the analyzes of the structural diagram and the original mathematical formulation of the control task and, accordingly, the principles of constructing algorithms for the functioning of such systems as a whole are given. It is shown that the expansion of the range of manufactured products requires continuous improvement of technological equipment, including both "mechanics" and the entire complex of control devices: electrics, electronics, pneumatics, hydraulics, optics and their possible various "complexes" (combinations).

The presented hierarchical control systems can be used not only for stationary and mobile ground-based robotic systems, but also for controlling the movement of single and group UAVs, since in both cases it is necessary to move the IR unit in space to fulfill the assigned task.

Keywords: industrial robot (IR), precision industrial robot (PIR), unmanned aerial vehicles (UAVs), IR manipulator, hierarchical structural diagram of IR control, human operator (HO), control objectives, control criteria, control optimization

INTRODUCTION

Currently, an extensive classification of kinematic diagrams and designs of industrial robots (IR) has been developed, including precision (PIR), respectively, control systems for IRs, PIRs and various technological processes for their use, effectively developed and implemented in the production of a wide variety of products [1–6].

However, the expansion of the range of manufactured products requires continuous improvement of technological equipment, including both mechanics and the entire complex of control devices: electrics, electronics, pneumatics, hydraulics, optics and their possible various combinations.

It is quite obvious that this also applies to industrial robots and, in particular, to precision robots, which are becoming indispensable technological equipment in the production of microelectronic technology, optical technology and even a field rather far from technology — microsurgery. In this regard, the development and deepening of various areas of analysis and synthesis of the configuration of complex control systems for such technical objects as IRs and PIRs are constantly developing [7–10].

General approaches to the control of IR can be applied, including to the tasks of organizing the movement of UAVs, which seem to be initially far from the control of stationary and mobile robots. This is due to the fact that UAVs essentially implement the same principles of building control systems. The only difference is that one more coordinate, associated with their spatial movement [11], is added to the control algorithms.

This article discusses the issues of analysis and synthesis of generalized structural diagrams, the initial

formulation of the problem and the logic of control of technical objects specifically related to the PIRs, based on modern approaches of systems theories: with a human operator in a circuit (man-machine system), with elements of artificial intelligence (AI system), automatic control (AC system) and automatic regulation (AR system) [12].

ANALYSIS OF STRUCTURAL SCHEMES AND PRINCIPLES OF DESIGN OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

Classification of structural schemes of control systems

A generalized block diagram of a control system for any fundamentally technical object (process) is shown in Fig. 1.

A hierarchical structural diagram of the control system for complex technical objects (including several ones) is shown in Fig. 2.

The top level of hierarchy: a group of devices with which a human operator interacts (here and further English/Russian abbreviations HO/Ч-O), who is the main operating link in principle of any control system with a human operator in the control loop; this group of devices includes:

- devices of the information display system IDS/COИ, presenting HO/Ч-O all the information necessary at the moment about the functioning of the entire system;

- devices of the control tool system CTS/COY, by means of them HO/Ч-O directly introduces control actions into the system.

Fig. 1. Generalized block diagram of the control system in any technical object (process)**Fig. 2.** Generalized hierarchical structural diagram of the control system for complex technical objects**Middle levels of the hierarchy:**

– groups of devices representing subsystems belonging to the class of systems with elements of artificial intelligence (AIS/СИИ);

– groups of devices representing subsystems belonging to the class of automatic control systems (ACS/САУ), synthesized and functioning in accordance with the traditional methods of the modern theory of automatic control (ТАС/ТАУ).

Lower levels of the hierarchy: groups of devices representing subsystems belonging to the class of automatic regulation systems (ARS/САР), synthesized and functioning in accordance with the traditional methods of the modern theory of automatic control (ТАС).

Such an idea of the hierarchy of control of complex objects makes it possible to use it not only for controlling ground robotic objects and single UAVs,

but also for groups of unmanned aerial vehicles [13, 14].

The generalized hierarchical structural diagram of the control system for one object is shown in Fig. 3.

**Generalized vector spaces
of mathematical models
of control systems for arbitrary objects**

The block diagram of the vector space of the generalized control system is shown in Fig. 1 and contains:

$\mathbf{X}(t)$, $\mathbf{Y}(t)$ — respectively, assigned and actual vectors of the state of the controlled object (СО/ОУ);

$\mathbf{R}(t)$ — control vector;

$\mathbf{Z}(t)$ — observation vector;

$\mathbf{E}(t)$ — criterion of management quality;

Fig. 3. Generalized hierarchical block diagram of a single object control system

$\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{F}(t)$ — vectors of external influences on the controlled object and restrictions on control and resources.

The traditional (classical) formulation of the control problem consists in the formation of a control vector $\mathbf{R}(t)$, that ensures the achievement of the control goal $\mathbf{Y}(t) \Rightarrow \mathbf{X}(t)$ provided that the extremum of the control quality indicator (criterion) $\mathbf{E}(t)$: is ensured: max or min and corresponding to the constraints $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{Q}(t)$, $\mathbf{F}(t)$, acting in the system. On the basis of the structural diagram (Fig. 3), the vector space of hierarchical scheme of a single-object system can be formed.

Hierarchical structural diagram of the vector space of a single-object control system:

$\mathbf{X}(t)$ — assigned vector of the controlled object state;

$\mathbf{Y}(t)$ — vector of the actual state of the controlled object;

$\mathbf{Z}_{\text{ОУ}}(t)$, $\mathbf{Z}_{\text{СОИ}}(t)$ — observation vectors;

$\mathbf{R}_{\text{ЧО}}(t)$, $\mathbf{R}_{\text{СОУ}}(t)$, $\mathbf{R}_{\text{СИИ}}(t)$, $\mathbf{R}_{\text{САУ}}(t)$,

$\mathbf{R}_{\text{САР}}(t)$ — control vectors;

$\mathbf{E}_{\text{ЧО}}(t)$, $\mathbf{E}_{\text{СИИ}}(t)$, $\mathbf{E}_{\text{САУ}}(t)$ — control quality criteria;

$\mathbf{F}_{\text{ЧО}}(t)$, $\mathbf{F}_{\text{СОУ}}(t)$, $\mathbf{F}_{\text{СОИ}}(t)$, $\mathbf{F}_{\text{СИИ}}(t)$, $\mathbf{F}_{\text{САУ}}(t)$,

$\mathbf{F}_{\text{САР}}(t)$, $\mathbf{F}_{\text{ОУ}}(t)$ — vectors of external influences on the controlled object and control systems (subsystems).

With regard to the system under consideration, the formulation of the control problem consists in the formation of control vectors $\mathbf{R}_*(t)$, that secure the achievement of the control goal $\mathbf{Y}(t) \Rightarrow \mathbf{X}(t)$, provided that the extrema of the control quality indicators (criteria) $\mathbf{E}_*(t)$ are ensured and that meet the constraints and external influences (noise) acting in the system.

In accordance with the structural diagram shown in Fig. 3, the main directions of the choice of optimization methods of the complex hierarchical control system of the IR (PIR) considered in the article can be determined.

POSSIBLE OPTIMIZATION METHODS OF HIERARCHICAL CONTROL SYSTEM OF PIR

Hierarchical level "human-operator"

At this level, all control actions $\mathbf{R}_{\text{ч.о}}(t)$ are performed by a human operator in accordance with:

- requirements (and instructions) of technical documentation for IR;
- instructions developed for a specific IR and a specific composition of technological operations to be performed;
- continuously (inevitably) accumulating experience of a human operator in the process of a specific work within the considered (specific) system.

Fig. 4. Illustration of the formation of trajectories

- based on the experience of forming trajectories (in terms of the presence of accumulated data of trajectories) for similar production tasks;
- based on the formation of a set of random points in a 3-dimensional space of IR coordinates and further using the Monte Carlo method, to determine the path of movement from point to point in accordance with the selected criteria $\mathbf{E}_{\text{СИИ}}(t)$, for example:
 - max speed of movement from point to point;
 - min effort that must be provided, for example, when processing any part with a given surface finish;
- based on the method of preliminary simulation modeling of sequential step-by-step approach from the initial (starting) point to the end point.

Hierarchical level of systems of automatic control of individual links of IR manipulator

This task represents the implementation of the movement of each individual link of the IR from one specific point to another specific point in accordance with the "classical" formulation of the control problem (see above) [19–21].

The criteria for the formation of control vectors can be selected:

- max speed, ie minimum travel time between two specified points;
- max acceleration developed by drives;
- min deviation (error) from the shortest direction connecting the start and end points.

Implementation of control task at the levels of the hierarchy of the AIS/СИИ and ACS/САУ differ significantly, namely:

- at the hierarchical level of the AIS/СИИ, a multidimensional control task for a complex multi-

Hierarchical level of the intelligent part of the system (AIS/СИИ)

In this problem (system), there is an optimization of the trajectories of the working tool, implemented by means of the drives of the manipulator of IR (PIR), Fig. 4.

Theoretically, this task represents the finding of the trajectory in the 3-dimensional space of the IR in accordance with the selected optimization criteria [15].

The following options for the formation of the movement of the working tool are possible [16–18]:

coordinate object is being solved, in this task the integral control vector is represented by a complex of "mathematically" interconnected private control vectors;

- at the hierarchical level of the ACS/САУ, a complex of independent (autonomous) control tasks is being implemented, formulated at the previous level (SAI) and being solved yet in accordance with unrelated control vectors.

Hierarchical level of systems regulation (ARS/CAP level)

At the final stage, the output of the IR working tool to the working point is executed [22, 23]. The optimization problem at this stage is no longer posed, since the systems that implement the movement of the corresponding links of the manipulator are already integral parts of the IR, namely drives, their technical characteristics are known (speed, accuracy both in statics and in dynamics).

CONCLUSION

The analysis carried out in this article has shown that the tasks of creating a control system for complex multidimensional technical objects such as IR (and PIR) can be solved on the basis of modern approaches to the design of different systems: with a human operator in a loop (MMS/СЧМ), systems with elements of artificial intelligence (AIS/СИИ), automatic control systems (ACS/САУ) and automatic regulation systems (ARS/CAP), that will make it possible to create control systems for production and technical complexes of IR of any complexity.

The presented hierarchical control systems are applicable not only for stationary and mobile ground-based robotic systems, but also for controlling

the movement of single and group UAVs, since in both cases the problem of moving IR's operating unit in space is being solved.

In the article, the objects under control by IR (PIR) are presented without taking into account the errors of their mechanics (manipulators). However, when using modern approaches to considering manipulators as "non-rigid" and "multi-gap", as well as freely moving mechanical structures in space, the problem can be significantly expanded and consider the IR control in any modes — both dynamic and static with the required accuracy of movement and positioning.

The analysis of the fundamental features, the formation of a united mathematical apparatus and the implementation of the joint functioning of the above hierarchical levels of control systems of IR is an independent task, based on the structural schemes considered above.

The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of Russia, topic number FSFF-2020-0015.

REFERENCES

- Burdakov S.F., Dyachenko V.A., Timofeev A.N. *Proektirovanie manipulyatorov promyshlennykh robotov i robotizirovannykh kompleksov: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov* [Design of manipulators of industrial robots and robotic complexes: Education book]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 264 p. (In Russ.).
- Klimchik A., Magid E., Pashkevich A. Machining with Serial and Quasi-Serial Industrial Robots: Comparison Analysis and Architecture Limitations. *Engineering, Computer Science 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 252–259. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759063
- Horn C., Kruger J. Feasibility of Connecting Machinery and Robots to Industrial Control Services in the Cloud. *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2016. DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733661
- Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Pashkevich A. Efficiency Evaluation of Robots in Machining Applications Using Industrial Performance Measure. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 48, pp. 12–29. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.005
- Dekle R. *Robots and Industrial Labor: Evidence from Japan*, 2020. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3670356>. DOI: 10.2139/ssrn.3670356
- Guyonneau R., Mercier F. Istiobot. An Open Source Mobile Robot for Education and Research. *12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*, 2019, pp. 131–136. DOI: 10.1109/RoMoCo.2019.8787363
- Vantsov S.V. [Production robotization: directions and some issues]. *Elektronika NTB* [Electronics: Science, Technology, Business], 2020, no. 7, pp. 176–178. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.198.7.176.178 (In Russ.).
- Kostrov B.V., Ruchkin V.N., Fulin V.A. *Iskusstvennyy intellekt i robototekhnika* [Artificial Intelligence and Robotics]. Moscow, Dialog-MIFI, 2008. 224 p. (In Russ.).
- Klimchik A., Magid E., Pashkevich A. Design of Experiments for Elastostatic Calibration of Heavy Industrial Robots with Kinematic Parallelogram and Gravity Compensator. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 12, pp. 967–972. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.901
- Villania V., Pinib F., Lealib F., Secchi C. Survey on Human – Robot Collaboration in Industrial Settings: Safety, Intuitive Interfaces and Applications. *Mechatronics*, 2018, vol. 55, pp. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009
- Wang Q., Li J., Hua Q., Zhu Y. Globally Stable Rigid Formation Control for Multi-Robot Systems. *Proceedings of the Thirty-Fourth Chinese Control Conference, Hangzhou*, 2015. Google Scholar, 2015, pp. 7 505–7 510. DOI: 10.1109/ChiCC.2015.7260829
- Solodovnikov V.V., ed. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kniga 1. Matematicheskoe opisanie, analiz ustojchivosti i kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Automatic regulation theory. Book 1. Mathematical description, stability and quality analysis of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 770 p. (In Russ.).
- Kima J., Croft E.A. Online Near Time-Optimal Trajectory Planning for Industrial Robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, vol. 58, pp. 158–171. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.02.009
- Dudek W., Wegierek M., Karwowski J., Szykiewicz W., Winiarski T., K. Kozłowski, ed. Task Harmonisation for A Single-Task Robot Controller. *12th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo) IEEE*, 2019, pp. 86–91. DOI: 10.1109/RoMoCo.2019.8787385
- Mohnke Ch., Reinkobera S., Uhlmann E. Constructive Methods to Reduce Thermal Influences on the Accuracy of Industrial Robots. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 33, pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.004
- Martinova L.I., Sokolov S.S., Nikishechkin P.A. Tools for Monitoring and Parameter Visualization in Computer Control Systems of Industrial Robots. *International Conference in Swarm Intelligence ICSI 2015: Advances in Swarm and Computational Intelligence*, 2015, pp. 200–207. DOI: 10.1007/978-3-319-20472-7_22
- Bingol M.C., Aydogmus O. Performing Predefined Tasks Using the Human-Robot Interaction on Speech Recognition for An Industrial Robot. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, vol. 95. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103903
- Filaretov V., Yukhimets D., Mursalimov E. The Universal Onboard Information-Control System for Mobile Robots. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 737–745. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.427
- Bahloul A., Tliba S., Chitour Y. Dynamic Parameters Identification of An Industrial Robot With And Without Payload. *Ifac-Papersonline*, 2018, vol. 51, is. 15, pp. 443–448. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.185
- Petukhov A., Steshina L., Kurasov P., Tanryverdiev I. Decision Support System for Assessment of Vocational Aptitude of Man-Machine Systems Operators. *2016 IEEE*

- 8th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, 2016, pp. 672–679. DOI: 10.1109/IS.2016.7737383
21. Zhao Y.M., Lin Y., Xi F., Guo S. Calibration-Based Iterative Learning Control For Path Tracking of Industrial Robots. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 2921–2929. DOI: 10.1109/TIE.2014.2364800
22. Klimchik A., Ambiehl A., Garnier S., Furet B., Pashkevich A. Comparison Study of Industrial Robots for High-Speed Machining. *Mechatronics and Robotics Engineering for Advanced and Intelligent Manufacturing*, 2017, pp. 135–149. DOI: 10.1007/978-3-319-33581-0_11
23. Stebulyanina M.M., Kovshovb E.E., Kuvshinnikovb V.S. Interval Quadratic Connected Control Systems in Industrial Robotics and Mechatronics. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 150, pp. 579–585. DOI: 10.1016/j.procs.2019.02.096

Contacts: *Chomutskaya Olga Vladislavovna*,
khomutskayaov@gmail.com

Article received by the editorial office on 24.12.2020