



Научная статья

УДК 004.942

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189166>

EDN: <https://www.elibrary.ru/XIPEYO>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО ВЫКЛАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА С ЧПУ В ПРОЦЕССЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРЫЛА САМОЛЕТА МС-21

В.И. Маринин¹, Г.В. Абраменков², К.А. Лысогорский², А.Г. Савин¹✉, Д.С. Андреев¹

¹Южно-Российский государственный политехнический университет

имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

²Министерство промышленности и торговли Российской Федерации,

г. Москва, Россия

✉ savin_alexandr@mail.ru

Цитирование: Маринин В.И., Абраменков Г.В., Лысогорский К.А., Савин А.Г., Андреев Д.С. Математическое моделирование траекторий движения рабочих органов роботизированного выкладочного комплекса с ЧПУ в процессе автоматизации технологической подготовки производства силовых конструкций крыла самолета МС-21 // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189166>

Аннотация. Развитие аддитивных технологий и повышение степени автоматизации производства изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов требует применения соответствующего автоматизированного оборудования с числовым программным управлением. Последнее влечет за собой необходимость разработки нового специализированного программного и математического обеспечения, в частности, постпроцессоров многокоординатных комплексов. В статье рассматривается решение обратной задачи кинематики роботизированного выкладочного комплекса с числовым программным управлением, предназначенного для производства силовых конструкций крыла самолета МС-21 (стрингеров и лонжеронов). Представлена математическая модель комплекса в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющая выполнять моделирование траектории движения рабочих

органов комплекса и результаты численных экспериментов. Предложенная модель расчёта была программно реализована и использована в специальном программно-математическом обеспечении системы автоматической выкладки сухой углеродной ленты для создания преформ деталей, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов методом высокотемпературной вакуумной инфузии. Качественная валидация модели выполнена в ходе реальных приёмо-сдаточных испытаний и в ходе промышленной эксплуатации программного обеспечения системы автоматической выкладки.

Ключевые слова: математическое моделирование; роботизированный выкладочный комплекс; автоматизированная подготовка управляющих программ; автоматизированная выкладка.

MATHEMATICAL MODELING OF THE TRAJECTORIES OF THE WORKING ELEMENTS' MOTION IN A ROBOTIC LAYING SYSTEM WITH CNC IN THE PROCESS OF AUTOMATING THE TECHNOLOGICAL PREPARATION OF THE PRODUCTION OF LOAD BEARING STRUCTURES FOR THE WING OF THE MS 21 AIRCRAFT

V.I. Marinin¹, G.V. Abramenzov², K.A. Lysogorsky², A.G. Savin^{1✉}, D.S. Andreev¹

¹Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

²Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia

✉ savin_alexandr@mail.ru

Citation: Marinin V.I., Abramenzov G.V., Lysogorsky K.A., Savin A.G., Andreev D.S. Mathematical modeling of the trajectories of the working elements' motion in a robotic laying system with CNC in the process of automating the technological preparation of the production of load-bearing structures for the wing of the MS-21 aircraft // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.).

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189166>

Abstract. The development of additive technologies and the increasing degree of automation in the production of aviation equipment components from polymer composite materials require the use of appropriate automated equipment with numerical control. This entails the need to develop new specialized software and mathematical support, in particular, postprocessors for multi-axis complexes. The article examines the solution to the inverse kinematics problem for a robotic laying complex with numerical control, designed for the production of load-bearing

structures of the wing of the MS-21 aircraft (stringers and spars). A mathematical model of the complex is presented in the form of a system of nonlinear differential equations, which makes it possible to simulate the trajectory of the movement of the complex's working elements and to obtain the results of numerical experiments. The proposed calculation model was implemented in software and used in special software and mathematical support for the system of automatic laying of dry carbon tape for creating preforms of parts manufactured from polymer composite materials using the high-temperature vacuum infusion method. The model was qualitatively validated during real acceptance tests and during the industrial operation of the software for the automatic laying system.

Keywords: mathematical modeling, robotic laying system, automated preparation of control programs, automated laying

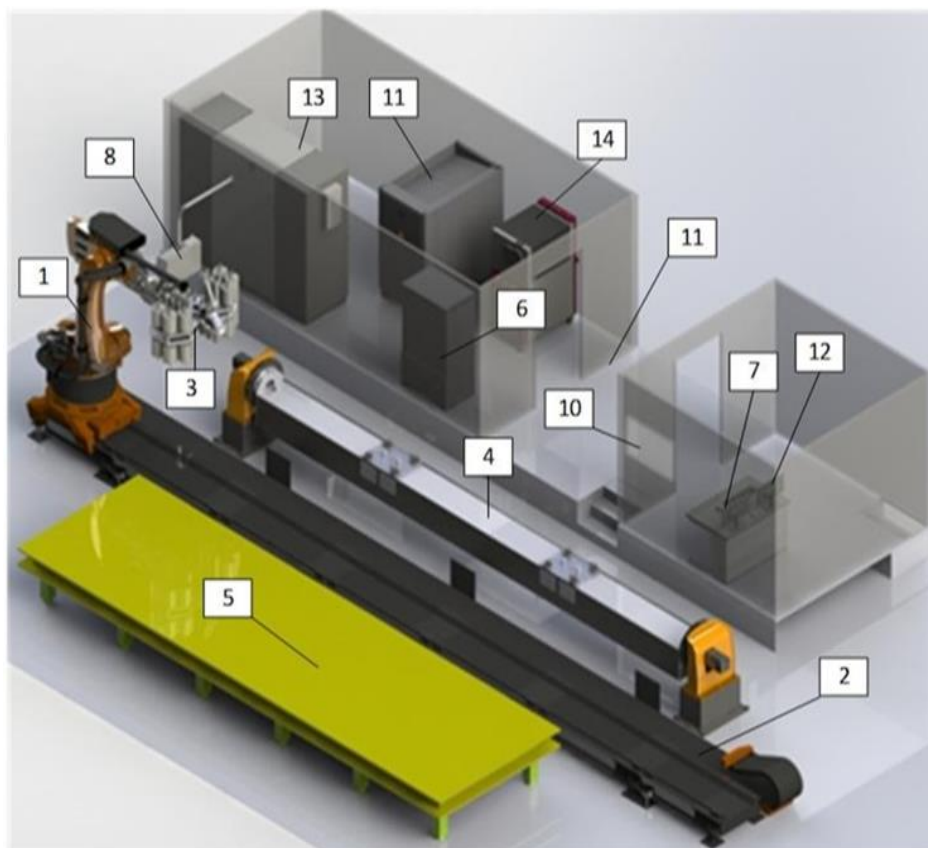
Введение

Интенсивное развитие в России промышленного производства конструкций авиационной, ракетной и специальной техники из полимерных композиционных материалов, повышение степени автоматизации производств, необходимость импортозамещения на предприятиях выходящего из строя морально устаревшего зарубежного оборудования и обеспечение заданного объема выпуска продукции различного назначения со стабильными характеристиками изделий в серии, требует совершенствования технологий производства и соответствующего оборудования.

Для достижения принципиально новых характеристик крыла гражданского самолета МС-21, детали которого на 85% выполнены из полимерных композиционных материалов (ПКМ), потребовалось разработать отечественное специальное технологическое оборудование и программное обеспечение для создания преформ силовых конструкций кессона консолей крыла и центроплана самолёта МС-21 методом автоматизированной выкладки сухой углеродной ленты. Выложенные преформы затем пропитываются термореактивным олигомерным связующим (смолой) методом вакуумной инфузии с последующим отверждением волокнистой заготовки при повышенной температуре в условиях вакуума [1].

Постановка задачи и описание объекта исследования

ЮРГПУ(НПИ) в сотрудничестве с АО «АэроКомпозит» разработали и запустили в эксплуатацию первую российскую многопоточную систему автоматической выкладки на базе промышленного робота (рисунки 1–3), которая эксплуатируется уже в течении трёх лет для опытно-промышленной отработки технологии выкладки и промышленного изготовления преформ обшивок, стрингеров и панелей центроплана самолета МС-21. В системе используется общепромышленный робот, но только сугубо как манипулятор с числовым программным управлением (ЧПУ), не обладающий своими интеллектуальными способностями и отрабатывающий только команды из подготовленной для него управляющей программы.



- 1 – промышленный робот для закрепления и перемещения выкладочной головы;
- 2 – продольная ось для перемещения промышленного робота;
- 3 – выкладочная голова;
- 4 – универсальное поворотное устройство с опорной балкой для закрепления и поворота оснастки для выкладки L – образных и П – образных преформ;
- 5 – стол для калибровки и выкладки плоских преформ (зона выкладки плоских преформ);
- 6 - 14 – оборудование технических помещений

Рисунок 1 – Общий вид разработанной отечественной многопоточной системы автоматической выкладки на базе промышленного робота

Система автоматической выкладки обеспечивает выкладку преформ изделий из ПКМ в соответствии с послойной 3D моделью изделия и требуемым качеством и имеет две рабочие зоны, разделенные линейной осью перемещения (рисунок 3): первая рабочая зона – для установки неподвижной оснастки для

выкладки плоских преформ и преформ малой кривизны (плоских образцов, обшивок); вторая рабочая зона – универсальное поворотное устройство для выкладки преформ П – образной и L – образной формы (стрингеров и лонжеронов).

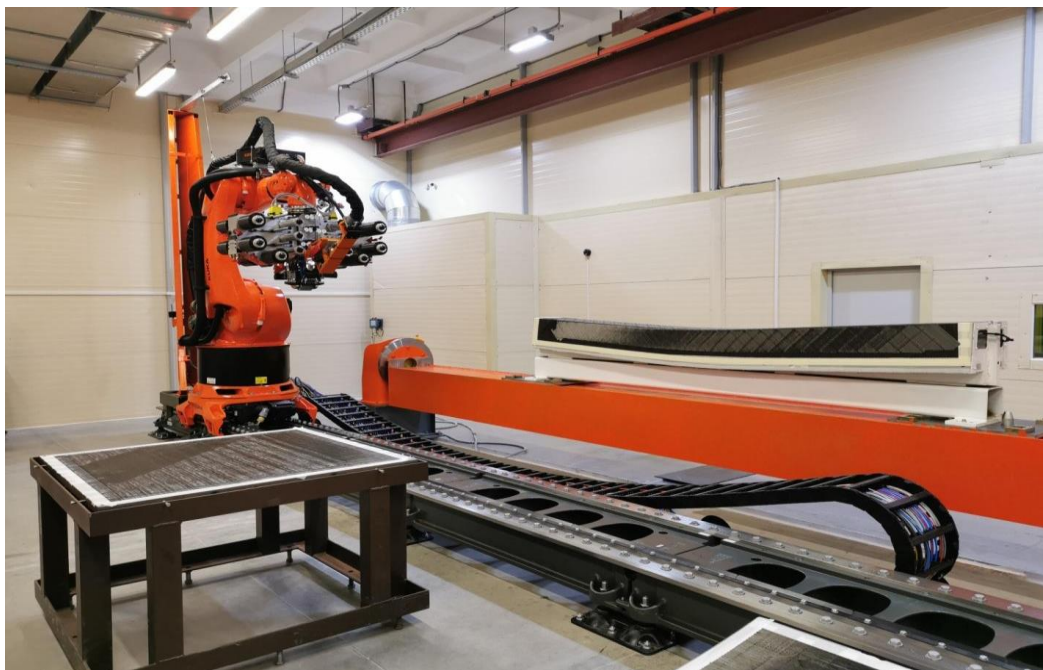


Рисунок 2 – Фотография системы с выложенными преформами демонстраторов панели обшивки кессона крыла и лонжерона

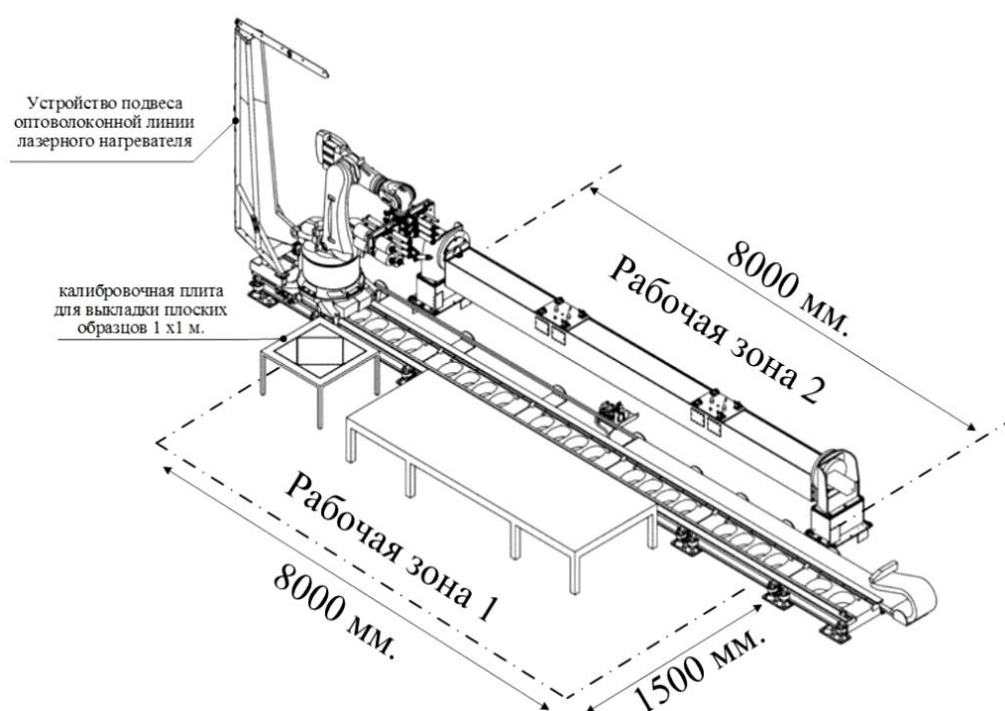


Рисунок 3 – Рабочие зоны разработанной системы автоматической выкладки

В 2025 году разработаны и переданы в эксплуатацию на завод АО «АэроКомпозит» в г. Ульяновск два роботизированных комплекса

автоматизированной выкладки силовых конструкций крыла самолета МС-21 с универсальным позиционирующим устройством оригинальной конструкции для выкладки изделий длиной до 18500 мм. (рисунок 4).



Рисунок 4 – Фотография разработанного роботизированного комплекса автоматизированной выкладки силовых конструкций крыла самолета МС-21 с универсальным позиционирующим устройством

Промышленные роботы в составе комплексов с ЧПУ, позволяют реализовать новые подходы при изготовлении изделий сложной геометрической формы различными материалами. Разработанное для представленных комплексов специальное программное обеспечение – система автоматизированного проектирования (САПР), позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки производства изделий аддитивной технологией выкладки на роботизированных комплексах с ЧПУ.

Основные решаемые в САПР задачи: автоматизация подготовки управляющих программ выкладки для системы ЧПУ комплекса, моделирование процесса выкладки и отладка подготовленной управляющей программы на цифровом двойнике комплекса. Решение этих задач требует создания математической модели комплекса, включающей кинематическую схему для

решения прямой задачи кинематики и систему нелинейных дифференциальных уравнений для решения обратной задачи кинематики [2, 3, 4].

В работе предложена математическая модель, позволяющая решить задачу расчёта координатных перемещений рабочих органов для восьмикоординатных (в части задач обратной кинематики) роботизированных выкладочных комплексов с универсальным поворотным устройством и калибровочным столом при выкладке плоских, П – образных и L – образных преформ.

Существуют различные известные универсальные методы решения обратной задачи кинематики, но одним из их недостатков является отсутствие единственности решения и сходимости алгоритмов [8-10]. Алгоритм решения обратной задачи кинематики, обеспечивающий гарантированное решение, предполагает адаптацию к конкретной модели многокоординатного комплекса [5–7].

Материалы и методы

Разработанная кинематическая схема роботизированного комплекса автоматизированной выкладки, совмещенная с геометрической моделью комплекса приведена на рисунке 5. Рядом с системами координат управляемых звеньев обозначены символьные имена обобщенных координат и указаны направления их поступательного движения или вращения. Переходы между системами координат осуществляются при помощи метода углов Эйлера [5–7].

Комплекс имеет 9 программно-управляемых координат:

- $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ – шесть угловых координат промышленного робота;
- A_8 – угловая координата (универсальное позиционирующее устройство);
- A_7 – линейная координата (линейный модуль, на котором установлен промышленный робот);
- A_9 – координата, содержащая рассчитываемое значение, равное пройденному пути прикаточного вала (не участвует в процессе решения обратной задачи кинематики).

При формировании кинематической схемы комплекса, для каждого звена манипулятора специальным образом формируется ортонормированная система координат и соответствующая ей однородная матрица преобразования A_i , описывающая положение и ориентацию системы координат каждого звена.

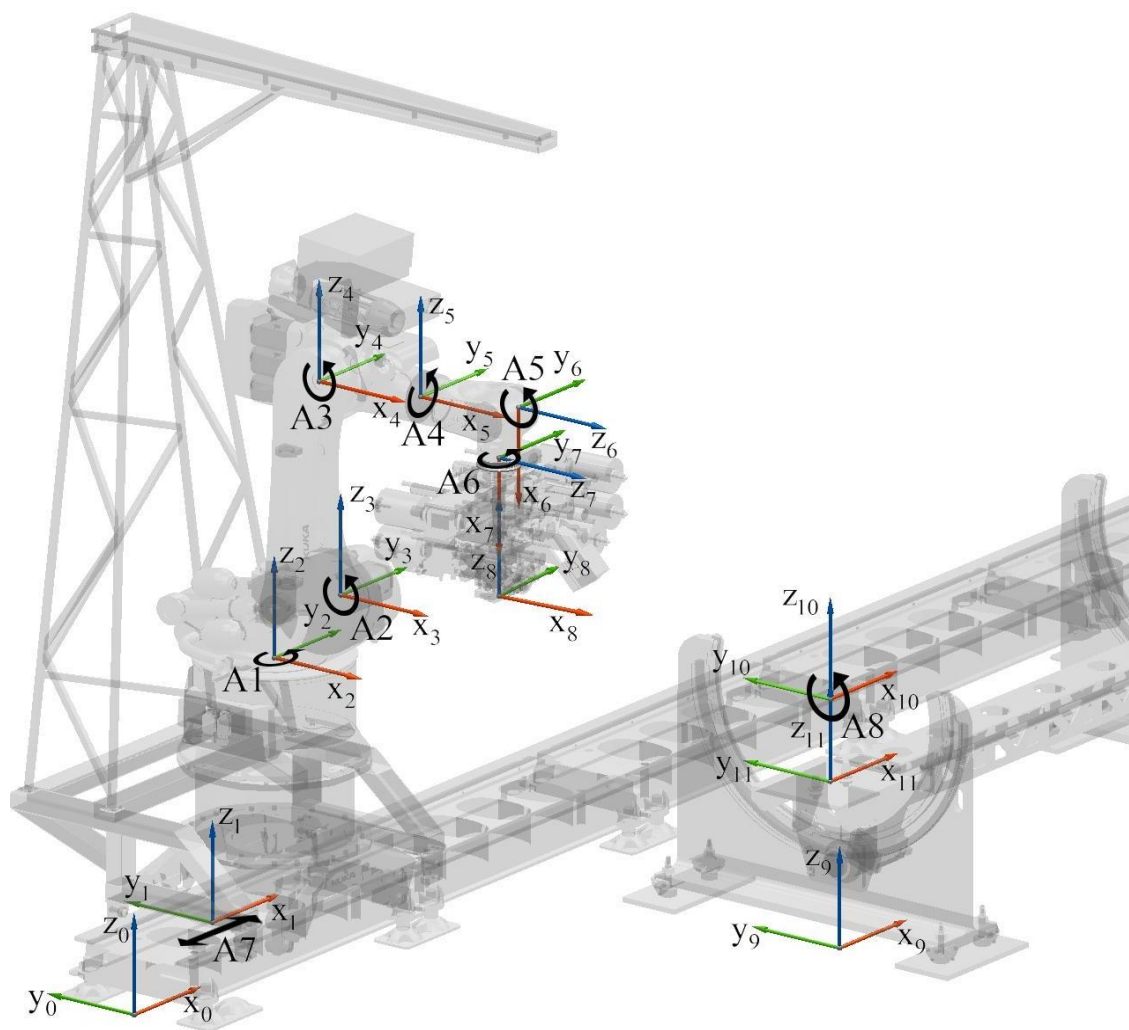


Рисунок 5 – Предлагаемая кинематическая схема роботизированного комплекса

Звенья связаны между собой от основания к выходному звену манипулятора. Под выходным звеном понимается прикаточный вал выкладочной головы, которому назначена система координат (x_8, y_8, z_8) расположенная в центре оси вращения вала. Введем в рассмотрение вектор $\bar{Y} = \bar{Y}(A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7)$ – радиус-вектор выходного звена манипулятора. Однородная матрица 0T_i , определяющая положение i -й системы координат относительно базовой системы координат, представляет собой произведение последовательности однородных матриц преобразования ${}^{i-1}A_i$, имеет вид ${}^0T_i = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i = \prod_{i=1}^i {}^{i-1}A_i$ и позволяет решать прямую задачу кинематики для всего комплекса или конкретного i -го звена [7].

Для решения обратной задачи кинематики и расчета координатных перемещений рабочих органов комплекса предлагается использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T_{11}(A8) \cdot \bar{p}_t - \bar{Y} = \bar{0} \\ \alpha - k_p \cdot \beta = 0 \\ (T_{11}(A8) \cdot \bar{u}_t) \cdot \bar{W} = 0 \\ (T_{11}(A8) \cdot \bar{u}_t) \cdot \bar{F} = 0 \\ (T_{11}(A8) \cdot \bar{f}_t) \cdot \bar{L} = 0 \\ (T_{11}(A8) \cdot \bar{u}_t) \cdot (R(\bar{x}_0, (A8 + k_{eq}) \cdot k_{ef}) \cdot \bar{z}_0) = 0 \end{cases},$$

где $\bar{p}_t$ – некоторая i -я точка траектории выходного звена в системе координат технологической оснастки (x_{11}, y_{11}, z_{11}) , с которой должна быть совмещена по положению система координат (x_8, y_8, z_8) выходного звена роботизированного комплекса;

$\alpha = \arctg\left(\frac{\|\bar{x}_0 \times \bar{P}\|}{\bar{x}_0 \cdot \bar{P}}\right)$ – угол между фронтальным направлением руки манипулятора и осью симметрии линейной направляющей (в проекции на плоскость пола) (рис. 6);

$\beta = \arctg\left(\frac{\|(\bar{Y}-\bar{E}) \times (\bar{S}-\bar{E})\|}{(\bar{Y}-\bar{E}) \cdot (\bar{S}-\bar{E})}\right)$ – угол между двумя отрезками: первый отрезок соединяет «локтевое» сочленение руки манипулятора (x_4, y_4, z_4) с «плечевым» (x_3, y_3, z_3) , второй соединяет «локтевое» сочленение руки манипулятора (x_4, y_4, z_4) с центром системы координат (x_8, y_8, z_8) (рисунк 6);

k_p – некоторый коэффициент соответствия угла раскрытия/сжатия руки манипулятора в «локте» (x_4, y_4, z_4) и угла разворота манипулятора от линейной направляющей;

k_{eq} – коэффициент, определяющий точку равновесия позиционера (границу симметрии отклонений);

k_{ef} – коэффициент, позволяющий определять степень влияния на отклонение вектора $\bar{u}_t$ от вертикали вокруг оси $\bar{x}_0$ в зависимости от значения обобщённой координаты позиционера A8;

$R(\bar{x}_0, (A8 + k_{eq}) \cdot k_{ef})$ – матрица поворота вокруг оси $\bar{x}_0$, формируемая на основе текущего значения обобщённой координаты позиционера A8 и коэффициентов;

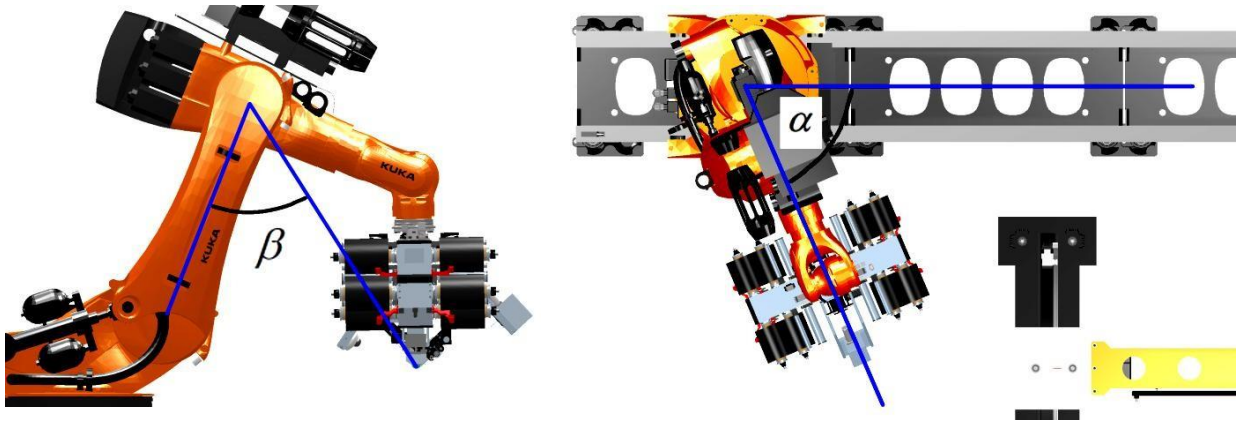


Рисунок 6 – Иллюстрация углов α и β

$\bar{u}_t$ – вектор, определяющий ориентацию выкладочной головы при движении над поверхностью (его направление совпадает с вектором нормали к поверхности в точке $\bar{p}_t$) (рисунок 7);

$\bar{f}_t$ – вектор, определяющий ориентацию выкладочной головы при движении над поверхностью (его направление совпадает с вектором касательной к линии укладки в точке $\bar{p}_t$) (рисунок 7);

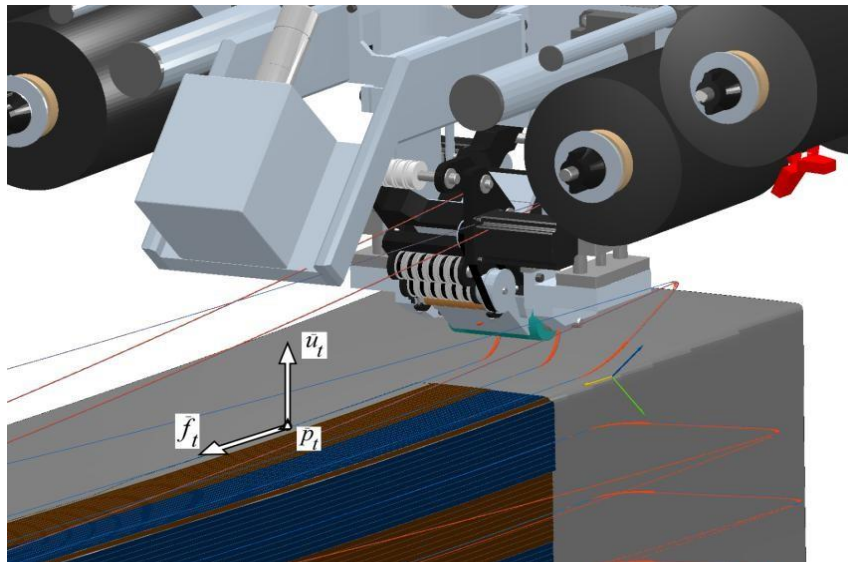


Рисунок 7 – Иллюстрация точки траектории движения выходного звена

$\bar{W} = T_6(A1_1, A2, A3, A4, A5, A7) \cdot \bar{e}_z$ и $\bar{F} = T_7(A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7) \cdot \bar{e}_z$ – вектора, определяющие направления ортов $\bar{k}$ систем координат шестого и седьмого звеньев манипулятора соответственно в базовой системе координат;

$\bar{L} = T_8(A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7) \cdot \bar{e}_y$ – радиус-вектор, направленный вдоль оси прикаточного вала выкладочной головы;

$\bar{P} = T_1(A1, A7) \cdot \bar{e}_x$ – вектор, направленный вдоль линейной направляющей манипулятора;

$\bar{E} = T_4(A1, A2, A3, A7) \cdot \bar{e}$ – радиус-вектор четвертого звена манипулятора;

$\bar{S} = T_3(A1, A2, A7) \cdot \bar{e}$ – радиус-вектор третьего звена манипулятора;

$\bar{e}$ – радиус-вектор, имеющий в однородной системе координат значение (0; 0; 0; 1);

$\bar{e}_x$ – вектор, имеющий в однородной системе координат значение (1; 0; 0; 0);

$\bar{e}_y$ – вектор, имеющий в однородной системе координат значение (0; 1; 0; 0);

$\bar{e}_z$ – вектор, имеющий в однородной системе координат значение (0; 0; 1; 0).

Первое векторное уравнение позволяет вычислить значения сразу трёх из восьми обобщённых координат роботизированного комплекса, однозначно определяющих положение системы координат выходного звена в пространстве.

Второе уравнение связывает поворот робота на подвижной платформе со степенью раскрытия/сжатия руки робота в «локтевом» сочленении (x_4, y_4, z_4) с целью исключения столкновения выкладочной головы с основанием робота [15,16]. Благодаря этому уравнению подвижная платформа смещает основание робота в сторону в случае приближении к нему выкладочной головы.

Третье, четвёртое и пятое уравнения ориентируют выкладочную голову в целевой точке траектории так, чтобы вертикальная ось вращения головы была коллинеарна вектору, определяющему направление «вверх» $\bar{u}_t$, а фронтальная сторона выкладочной головы была развёрнута в направлении «вперёд» $\bar{f}_t$.

Шестое уравнение системы позволяет вычислить ориентацию технологической оснастки. Траектория рабочего инструмента в некоторых своих точках содержит такие векторы «вверх» $\bar{u}_t$, которые совпадают с векторами нормалей к поверхности в расчетных точках выкладки. Поскольку выкладка производится на поверхность оснастки сверху, вектор «вверх» $\bar{u}_t$ в целевой точке траектории инструмента должен стремиться к коллинеарности с вертикальной осью базовой системы координат $\bar{e}_y$. Однако в силу ограниченности диапазона вращения универсального поворотного устройства коллинеарность с

вертикальной осью не всегда возможна, и вектор $\bar{u}_t$ тем больше должен отклоняться от вертикали, чем больше наклонена оснастка при помощи универсального поворотного устройства.

Предлагаемая система состоит из шести уравнений с восемью неизвестными обобщёнными координатами и решается численным способом. В результате дифференцирования и численного решения представленной системы нелинейных уравнений находятся необходимые значения изменений обобщенных координат комплекса, соответствующие относительным координатным перемещениям рабочих органов. Результаты моделирования траекторий движения рабочих органов на разных комплексах и для разных форм поверхностей силовых конструкций крыла показаны на рисунке 8.

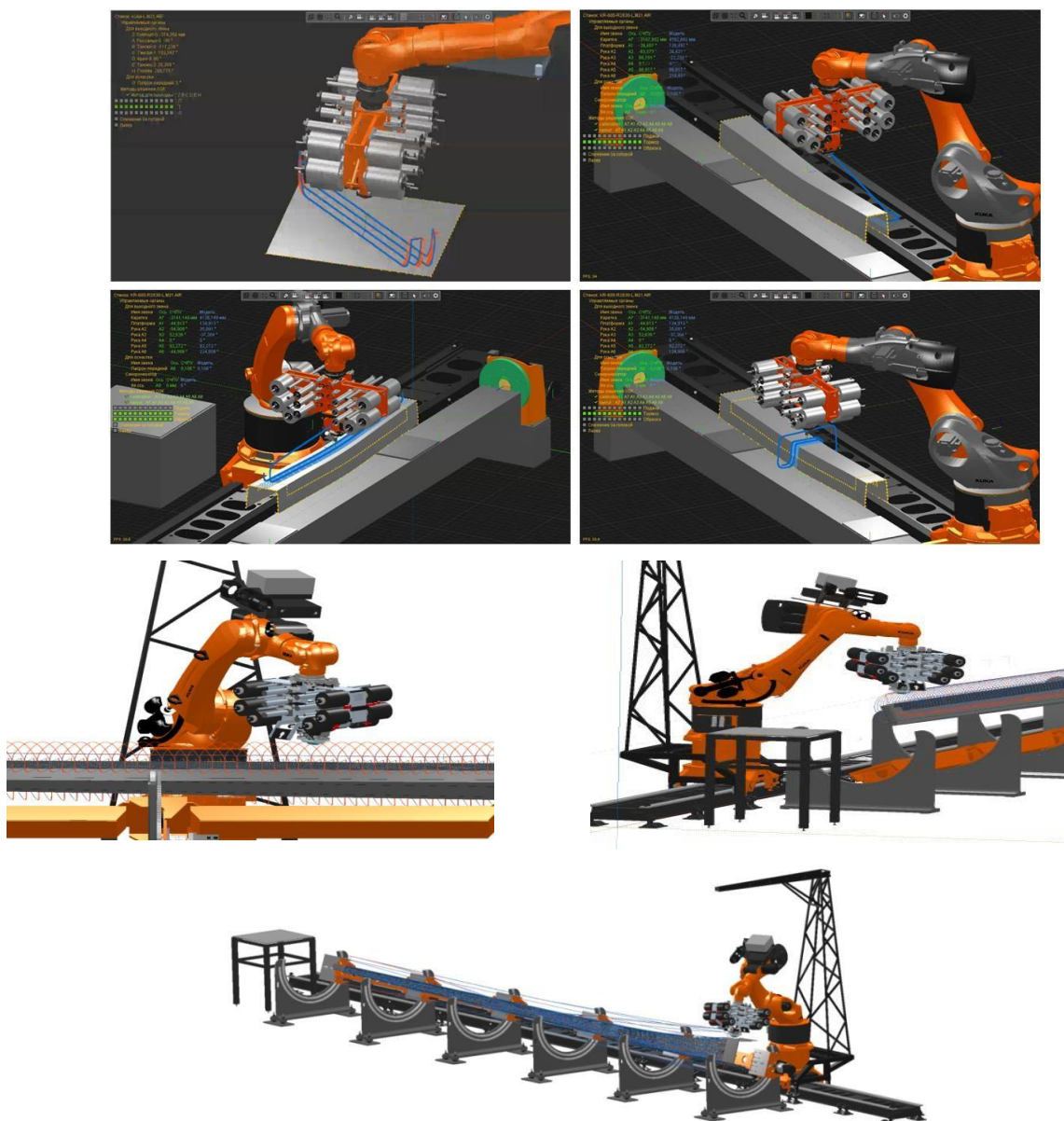


Рисунок 8 – Результаты моделирования в разработанной САПР ViusCAM AFP, полученные при использовании предлагаемой математической модели

Результаты и их обсуждение

Для нахождения сглаженных и оптимальных по производительности законов движения рабочих органов роботизированного комплекса используется метод динамического программирования. В качестве критериев оптимальной производительности выступают максимальные скорости и ускорения реальных приводов манипулятора [11-14].

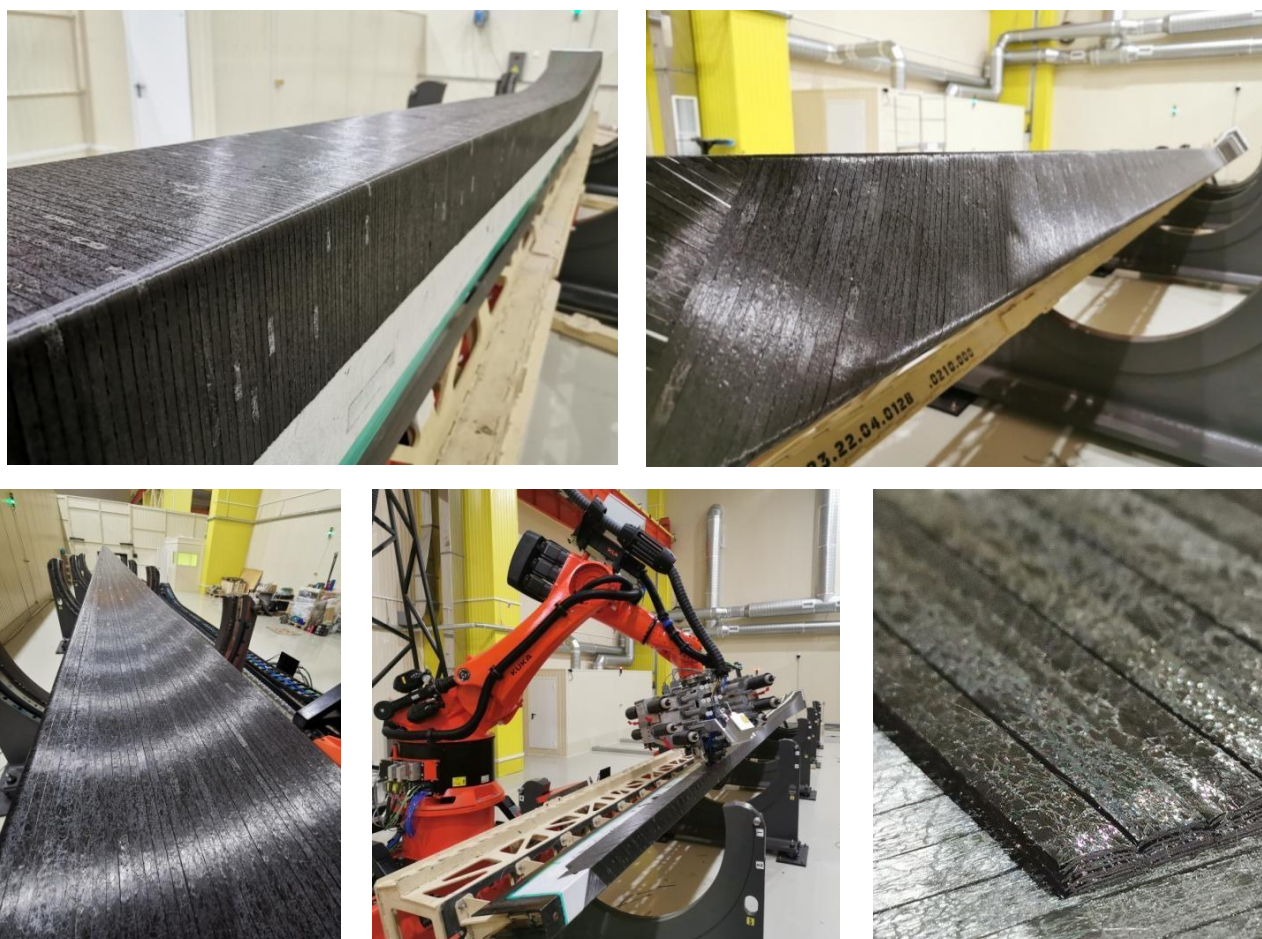


Рисунок 9 – Фотографии результатов выкладки слоёв с разной ориентацией лент (0° , 90° , $\pm 45^\circ$) силовых конструкций крыла самолета МС-21 на роботизированных комплексах при отработке управляющих программ, подготовленных с использованием предлагаемой модели

Адекватность предлагаемой модели проверена в ходе реальных приёмосдаточных испытаний и промышленной эксплуатации при подготовке управляющих программ выкладки для отечественных роботизированных комплексов автоматизированной выкладки сухой углеродной лентой плоских и П-образных преформ на созданной научно-производственной базе предприятия АО «АэроКомпозит» и заводе АО «АэроКомпозит – Ульяновск» (рис. 9).

Заключение

В работе рассмотрено математическое моделирование траекторий движения рабочих органов восьмикоординатного (в части задач обратной кинематики) роботизированного выкладочного комплекса для производства силовых конструкций крыла самолета МС-21. Предложена система нелинейных дифференциальных уравнений для решения обратной задачи кинематики, обеспечивающая однозначное определение обобщенных координат. Отличием предлагаемой математической модели является наличие уравнений, позволяющих предотвратить столкновение выкладочной головы с исполнительными органами робота за счет адаптивной связи угла поворота основания робота с углом в «локтевом» сочленении, а также осуществлять контроль значения угловой координаты универсального позиционирующего устройства.

На основе разработанной модели создано программное обеспечение и цифровые двойники комплексов (включены в состав отечественной САПР ViusCAM AFP), позволившие автоматизировать технологическую подготовку и отладку управляющих программ выкладки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Савин С.П., Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, №4(2), – 2012, – С. 686-693.
2. Gong C, You Y (2006) Analytic method of automatic tow placement robot inverse kinematics problem. J Mech Eng Autom 2006(01):1-3.
3. Kanzhong Yao, Yanjuan Zhu (2019) Kinematics numerical inverse solution algorithm for arm type AFP machine based on DH Modeling. Proceedings of 2019 Chinese intelligent systems conference CISC 2019: pp 151-158.

4. Савин А.Г. Автоматизация синтеза виртуальных моделей технологического оборудования в системах автоматизированного программирования многокоординатных станков с ЧПУ // Инженерный вестник Дона. – 2017, Т. 44. – №1 (44). – С. 40., URL: https://www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD_101_Savin.pdf_768a8a8d9d.pdf
5. Воробьёв В.И. Механика промышленных роботов: Учебное пособие для вузов: в 3 кн. Кн. 1: Кинематика и динамика. М.: Высш. шк., 1988. 304 с.
6. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 400 с.
7. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
8. Лесков А.Г., Калеватых И.А. Экспериментальные исследования алгоритмов управления связанным движением двурукого манипуляционного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2012. – № 4. – С. 33–43.
9. Артемов К.А. Алгоритмы адаптивного реактивного и проактивного гибридного управления манипуляционными роботами : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2022.
10. Головин В.А., Яковлев К.С. Примитивы движения робота в задаче планирования траектории с кинематическими ограничениями // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22, № 6. – С. 1354–1386.
11. Pham Q.C., Stasse O. Time-optimal path parameterization for redundantly actuated robots: A numerical integration approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, Vol. 20, No. 6, P. 3257–3263.
12. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, P. 3248–3253.
13. Zhang T., Zhang M., Zou Y. Time-optimal and smooth trajectory planning for robot manipulators // International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, Vol. 19, No. 1, P. 521–531.

14. Haghshenas H., Hansson A., Norrlöf M. Time-optimal path tracking for cooperative manipulators: A convex optimization approach // Control Engineering Practice, 2023, Vol. 140, P. 105668.
15. Bastos Jr G., Franco E. Dynamic tube model predictive control for a class of soft manipulators with fluidic actuation // International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2025, Vol. 35, No. 7, P. 2780–2799.
16. Luo Y. et al. Robust tube-based MPC with smooth computation for dexterous robot manipulation // Science China Information Sciences, 2024, Vol. 67, No. 11, P. 1–17.

References

1. Savin S.P., Application of modern polymer composite materials in the airframe design of aircraft of the MS-21 family // Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, vol. 14, no. 4(2), 2012, pp. 686–693.
2. Gong C, You Y (2006) Analytic method of automatic tow placement robot inverse kinematics problem. J Mech Eng Autom 2006(01):1–3.
3. Kanzhong Yao, Yanjuan Zhu (2019) Kinematics numerical inverse solution algorithm for arm type AFP machine based on DH Modeling. Proceedings of 2019 Chinese intelligent systems conference CISC 2019: pp 151- 158.
4. Savin A. G. Automation of the synthesis of virtual models of technological equipment in computer-aided programming systems for multi-axis CNC machines //Engineering Bulletin of the Don, 2017, vol. 44, no. 1(44). P. 40., URL: https://www.ivdon.ru/back_media/uploads/article/pdf/IVD_101_Savin.pdf_768a8a8d9d.pdf
5. Vorobyov V.I. Mechanics of Industrial Robots: A Textbook for Universities: in 3 books. Book 1: Kinematics and Dynamics. Moscow: Vysshaya Shkola, 1988. 304 p.
6. Popov E.P., Vereshchagin A.F., Zenkevich S.L. Manipulating Robots: Dynamics and Algorithms. Moscow: Nauka, 1978. 400 p.
7. Fu K., Gonzalez R., Li K. Robotics: translated from English. Moscow: Mir, 1989. 624 p.
8. Leskov A.G., Kalevatykh I.A. Experimental studies of control algorithms for the coordinated motion of a dual-arm robotic manipulator // Herald of the Bauman Moscow

State Technical University. Series «Instrument Engineering», 2012, No. 4, P. 33–43.

9. Artemov K.A. Algorithms for adaptive reactive and proactive hybrid control of robotic manipulators : Cand. Sc. (Eng.) Thesis. – Moscow, 2022.

10. Golovin V.A., Yakovlev K.S. Robot motion primitives in the trajectory planning problem with kinematic constraints // Informatics and Automation, 2023, Vol. 22, No. 6, P. 1354–1386.

11. Pham Q.C., Stasse O. Time-optimal path parameterization for redundantly actuated robots: A numerical integration approach // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, Vol. 20, No. 6, P. 3257–3263.

12. Haschke R., Weitnauer E., Ritter H. On-line planning of time-optimal, jerk-limited trajectories // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, P. 3248–3253.

13. Zhang T., Zhang M., Zou Y. Time-optimal and smooth trajectory planning for robot manipulators // International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, Vol. 19, No. 1, P. 521–531.

14. Haghshenas H., Hansson A., Norrlöf M. Time-optimal path tracking for cooperative manipulators: A convex optimization approach // Control Engineering Practice, 2023, Vol. 140, P. 105668.

15. Bastos Jr G., Franco E. Dynamic tube model predictive control for a class of soft manipulators with fluidic actuation // International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2025, Vol. 35, No. 7, P. 2780–2799.

16. Luo Y. et al. Robust tube-based MPC with smooth computation for dexterous robot manipulation // Science China Information Sciences, 2024, Vol. 67, No. 11, P. 1–17.

Информация об авторах

Владимир Иванович Маринин, кандидат технических наук, профессор, Заслуженный конструктор Российской Федерации, Директор, Научно-исследовательский институт Вычислительных, информационных и управляющих систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; e-mail: marinin_vi@npi-tu.ru

Геннадий Владимирович Абраменков, кандидат экономических наук, Заместитель Министра промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России), г. Москва, Россия

Кирилл Алексеевич Лысогорский, Первый Заместитель министра промышленности и торговли Российской Федерации, (Минпромторг России), г. Москва, Россия

Александр Геннадьевич Савин, кандидат технических наук, доцент, Ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт вычислительных, информационных и управляющих систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; Author ID РИНЦ 642283; e-mail: savin_alexandr@mail.ru

Дмитрий Станиславович Андреев, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт вычислительных, информационных и управляющих систем Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; Author ID РИНЦ 1232105; e-mail: dmistand@mail.ru

Information about the authors

Vladimir I. Marinin, Candidate of Technical Sciences, Professor, Honored Designer of the Russian Federation, Director, Scientific Research Institute of Computing, Information and Control Systems of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia; e-mail: marinin_vi@npi-tu.ru

Gennady V. Abramnikov, Candidate of Economic Sciences, Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation (Ministry of Industry and Trade of Russia), Moscow, Russia

Kirill A. Lysogorsky, First Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation (Ministry of Industry and Trade of Russia), Moscow, Russia

Alexander G. Savin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Computing, Information and Control Systems of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia; Author ID RISC 642283; e-mail: savin_alexandr@mail.ru

Dmitry S. Andreev, Senior Researcher, Scientific Research Institute of Computing, Information and Control Systems of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia; Author ID RSCI 1232105; e-mail: dmistand@mail.ru

Получено 07 апреля 2026 ● Принято к публикации 20 мая 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 07 April 2026 ● Accepted 20 May 2026 ● Published 31 August 2026
