

# РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЬНОЙ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ЗАДАЧИ ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ БЕСПИЛОТНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГРУЗОВ

П. И. Алексеевский<sup>1</sup>, О. В. Аксенова<sup>1</sup>, В. Ю. Бодряков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Уральский государственный педагогический университет, Екатеринбург*  
620075, Россия, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 9/9А

## Аннотация

В работе представлена робототехническая реализация практико-ориентированной задачи об оптимальной беспилотной транспортировке грузов. В задаче беспилотная тележка (груженная) должна по заданному режиму (ускорение, движение с постоянной скоростью, торможение) пройти заданный путь за наименьшее время с учетом заданных технических условий (например, если задано ограничение по скорости).

Представлены математическая модель движения объекта и решение соответствующей оптимизационной задачи. Дано описание реализации модели для конкретного устройства, включая предварительные тестовые и калибровочные эксперименты. Проведенная апробация показала широкие педагогические перспективы рассматриваемого подхода при обучении мотивированных школьников и студентов как информационных, так и других направлений подготовки (математика, физика, естественные и инженерные науки).

**Ключевые слова:** беспилотное транспортное средство, БПТС, обучение робототехнике, learning robotics, оптимизационная модель, практико-ориентированная задача, робототехническая реализация.

DOI: 10.32517/0234-0453-2018-33-8-51-60

## Для цитирования:

Алексеевский П. И., Аксенова О. В., Бодряков В. Ю. Робототехническая реализация модельной практико-ориентированной задачи об оптимальной беспилотной транспортировке грузов // Информатика и образование. 2018. № 8. С. 51–60.

**Статья поступила в редакцию:** 16 августа 2018 года.

**Статья принята к печати:** 26 октября 2018 года.

## Сведения об авторах

**Алексеевский Петр Иванович**, ассистент кафедры информатики, информационных технологий и методики обучения информатике Института математики, физики, информатики и технологий Уральского государственного педагогического университета, г. Екатеринбург; u@nyuu.ru

**Аксенова Ольга Владимировна**, ассистент кафедры информатики, информационных технологий и методики обучения информатике Института математики, физики, информатики и технологий Уральского государственного педагогического университета, г. Екатеринбург; aksenova421@yandex.ru

**Бодряков Владимир Юрьевич**, доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой высшей математики и методики обучения математике Института математики, физики, информатики и технологий Уральского государственного педагогического университета, г. Екатеринбург; Bodryakov\_VYu@e1.ru

## Роботизация как магистральный путь в цифровое будущее России

Плотность роботизаций\* в России почти в 70 раз ниже, чем в среднем по миру, выяснила Национальная ассоциация участников рынка робототехники (НАУРР). Если в мире на 10 000 работников в 2015 году приходилось в среднем 69 промышленных роботов, то в России всего один, говорится в исследовании НАУРР (рис. 1) [1]. Лидером рейтинга являются Южная Корея, где на 10 000 работников промышленности приходился 531 промышленный робот, Сингапур (398) и Япония (305). Под промышленным роботом понимается запрограммированный манипулятор, объясняет президент НАУРР Виталий Недельский [1]. Очевидно, если кардинально не пере-

ломить ситуацию, о вхождении России в топ-лист ведущих экономик мира говорить не приходится.

Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях [2] отмечает помимо внешних санкционных ограничений следующие внутренние неблагоприятные факторы, объективно сдерживающие применение промышленных роботов в России:

- отсутствие у российских предприятий не только собственного опыта применения роботов, но даже общего представления о технических и экономических основах роботизированных технологий;
- отсутствие квалифицированных кадров, способных обеспечить эксплуатацию роботов;
- крайняя недостаточность специалистов, способных спроектировать роботизированные ячейки и линии, внедрить роботов и осуществить технологическую подготовку роботизированного производства.

\* Плотность роботизации — количество промышленных роботов на 10 000 работников.

С решения этих ключевых проблем и следует начинать внедрение и освоение робототехники на производстве. Автор обзора [2] делает вывод, что «реалии сегодняшнего дня таковы, что если мы не сократим программное и конструкторско-технологическое отставание по внедрению в производственные процессы роботизированных комплексов в ближайшие 10–15 лет, то отстанем от лидеров мировой индустрии навсегда».

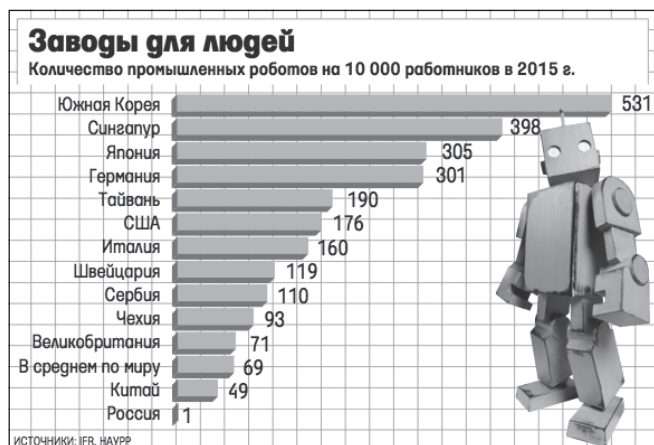


Рис. 1. Сравнительная гистограмма количества промышленных роботов на 10 000 работников в разных странах [1]

Направлениями, которые к 2020 году составят основу рынка промышленной и сервисной робототехники, эксперты лаборатории робототехники Сбербанка считают [3]:

- беспилотный пассажирский транспорт;
- роботы для коммерческих пространств;
- роботы-собеседники (помощники);
- логистические роботы и беспилотный грузовой транспорт;
- коллаборативные роботы;
- промышленные экзоскелеты;
- роботы для сельского хозяйства;
- роботы для обслуживания клиентов;
- роботы для домашних задач (персональные помощники).

В условиях заявленного стратегического курса на всеобъемлющую цифровизацию страны едва ли можно переоценить важность подготовки граждан к жизни в цифровой России будущего и подготовки педагогов, способных соответствующим образом обучать граждан.

Так, во «втором майском указе» Президент России В. В. Путин ставит задачу «обеспечения ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере» [4]. Для решения стратегических задач данного указа Правительству РФ при реализации национальной программы «Цифровая экономика РФ» надлежит обеспечить к 2024 году не менее чем трехкратное увеличение затрат на развитие цифровой экономики по сравнению с 2017 годом, обеспечить подготовку высококвалифицированных кадров для цифровой экономики, создание сквозных цифровых технологий преимущественно на основе отечественных разработок и т. д. В том числе при разработке национального проекта по созданию безопасных и качественных автомобильных дорог

следует исходить из того, что к 2024 году необходимо обеспечить внедрение автоматизированных и роботизированных технологий организации дорожного движения. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации [5] выделяет в числе приоритетов и перспектив научно-технологического развития следующее: «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

Одновременно, согласно ФГОС среднего общего образования [6], требования к предметным результатам освоения курса математики должны отражать: «сформированность умений моделировать реальные ситуации, исследовать построенные модели, интерпретировать полученный результат», требования к предметным результатам освоения курса информатики должны отражать: «владение навыками алгоритмического мышления и понимание необходимости формального описания алгоритмов; владение навыками и опытом разработки программ в выбранной среде программирования, включая тестирование и отладку программ; владение элементарными навыками формализации прикладной задачи и документирования программ».

Наконец, согласно Профессиональному стандарту педагога [7], в трудовую функцию учителя по модулю «Предметное обучение. Математика» входит «формирование способности к постижению основ математических моделей реального объекта или процесса, готовности к применению моделирования для построения объектов и процессов, определения или предсказания их свойств».

Сказанное выше особенно справедливо для промышленно и технологически насыщенного Уральского региона. Программа Губернатора Свердловской области «Уральская инженерная школа» отмечает имеющийся дефицит в промышленном секторе Свердловской области высококвалифицированных инженерных кадров по ряду специальностей: инженер промышленной электроники, наладчик станков с числовым программным управлением и др. [8]. Однако при этом недостаточна для нужд региональной цифровой экономики доля юных уральцев, проявляющих склонность к углубленному изучению математики, информатики, физики, других предметов естественно-научного цикла. Впрочем, есть и воодушевляющие примеры успешной работы образовательных организаций в рамках «Уральской инженерной школы». Так, в апреле 2018 года десять свердловских команд заняли призовые места в различных направлениях X Всероссийского робототехнического фестиваля «Робофест-2018» [9]. Фестиваль «Робофест-2018» является одним из крупнейших в стране, в 2018 году в нем приняли участие более 700 человек из 74 регионов России, а также из Белоруссии, Казахстана и Узбекистана. Посетили соревнования 25 тысяч гостей. Программа «Робототехника: инженерно-технические кадры инновационной России» реализуется с осени 2008 года Фондом Олега Дерипаски «Вольное Дело» при поддержке Министерства образования и науки РФ [10]. Программа «Робототехника» заявляет своими

целями помощь в формировании инженерно-технического корпуса для российских предприятий, воспитание специалистов, обладающих лидерскими качествами, современным инженерным мышлением, способных решать сложнейшие задачи в высокотехнологичных отраслях экономики страны.

Таким образом, *является актуальной задача комплексного и притом углубленного обучения большого, если не сказать подавляющего, числа молодых людей математике, информатике, физике и другим дисциплинам естественно-научного цикла; обучение навыкам творческого алгоритмического мышления, формирование исследовательских умений, обучение разработке оптимизируемых математических моделей реальных событий и устройств, включая робототехнические, цифровой и натурной реализации этих моделей для конкретных событий и устройств с проверкой адекватности разработанной модели и ее корректировкой (при необходимости).* Назовем эту масштабную задачу *педагогической проблемой цифрового будущего*, а набор педагогических технологий, нацеленных на ее эффективное решение, — *педагогикой цифрового будущего* (Pedagogy of Digital Future — PDF).

В этой связи возникает ряд сопутствующих педагогических задач содержательного и мотивационного плана (Зачем учить? Чему учить? Как учить? и др.), без решения которых продвижение вперед будет сильно затруднено (см., например, [11–16]). Как показывает наш опыт, лабораторные работы по математике с широким привлечением ее внутри- и междисциплинарных связей, в том числе с информатикой, являются эффективным и перспективным инструментом решения указанной задачи [11–14]. Едва ли нужно говорить о том, что в западной педагогической литературе тема обучения основам робототехники (обычно используется термин *learning robotics*) на разных ступенях образования начиная уже с начальной школы (см., например, [17–20]), является одной из доминирующих. Невозможно в ограниченных рамках настоящей журнальной статьи дать хотя бы краткий обзор литературы по learning robotics, это тема отдельного исследования. Укажем лишь, что регулярно публикуются своего рода электронные альманахи, посвященные этой увлекательной теме и содержащие новости, статьи, рекомендации, обсуждения по теме (см., например, [21–24] и др.). Впрочем, отечественная периодика в области ИКТ-педагогики вполне успешно следует мировому тренду. Так, на страницах журнала «Информатика и образование» регулярно появляются статьи, посвященные различным аспектам learning robotics, см. например, [25–31].

Целью данной статьи является демонстрация одного из возможных пропедевтических подходов к решению педагогической проблемы цифрового будущего на примере робототехнической реализации модельной практико-ориентированной задачи об оптимальной беспилотной транспортировке грузов. Целевой аудиторией являются бакалавры педагогического образования с профилями в области математики и/или информатики, которые должны быть подготовлены к решению педагогических задач цифрового будущего, работая после окончания вуза преимущественно в общеобразовательной школе.

## Модель и ее решение

Рассмотрим следующую модельную задачу.

Беспилотная самоходная тележка может двигаться равноускоренно с постоянным ускорением  $a$ , равномерно со скоростью  $v_0$  и равнозамедленно с тем же по модулю ускорением.

Найдите график движения, обеспечивающий минимальное время доставки груза на прямолинейном участке пути длиной  $l$ .

Проведите расчеты для реалистичных значений параметров:  $l = 200$  м,  $v_0 = 10$  м/с,  $a = 1$  м/с<sup>2</sup>.

Студентам предлагается **план действий**:

- 1) построение математической модели, исходя из условий задачи;
- 2) исследование математической модели;
- 3) проведение расчетов.

Сначала необходимо проанализировать условие задачи с учетом известных кинематических законов движения (междисциплинарная связь математики с физикой). Обучающимся необходимо:

- повторить определения и основные законы по теме «Механическое движение»;
- построить математическую модель для рассматриваемой задачи;
- указать оптимизируемую целевую функцию и ее варьируемый(е) параметр(ы);
- указать дополнительные ограничения (в частности, необходимо понимать причину ограничения скорости движения тележки величиной  $v_0$ ).

Как известно, кинематические уравнения движения, т. е. зависимости от времени координаты  $x(t)$  и скорости  $v(t)$ , имеют вид ( $t > t_0$ ):

- равномерное движение:

$$x = x_0 + v_0(t - t_0); \quad v_0 = \text{const}; \quad (1)$$

- равноускоренное (равнозамедленное) движение:

$$x = x_0 + v_0(t - t_0) + (-)\frac{1}{2}a(t - t_0)^2; \\ v = v_0 + a(t - t_0), \quad (2)$$

где:

$t_0$  — начальный момент времени (момент начала движения);

$x_0$  — начальная координата;

$v_0$  — начальная скорость.

По условию задачи все движение беспилотной самоходной тележки можно разделить на три участка (рис. 2):

*участок I*: равноускоренное движение с постоянным ускорением ( $a > 0$ ) в промежутке  $[0, t_1]$ ;

*участок II*: равномерное движение ( $v_0 = \text{const}$ ) в промежутке  $[t_1, t_2]$ ;

*участок III*: равнозамедленное движение с тем же по модулю ускорением ( $a < 0$ ) в промежутке  $[t_2, T]$  до полной остановки.

Нетрудно понять, что при заданных значениях  $a$  и  $v_0$  целевой функцией является полное время движения тележки  $T$ , которое параметрически зависит от моментов времени смены характера движения  $t_1$  и  $t_2$ . При этом задан полный пройденный тележкой

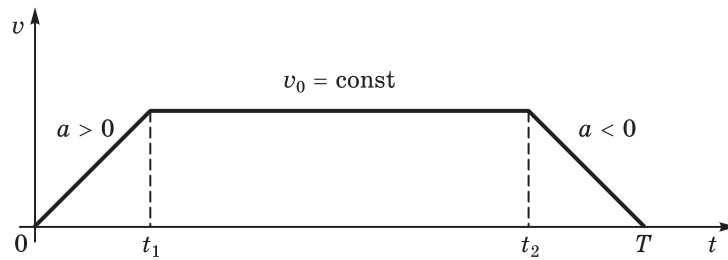


Рис. 2. Модельный график движения беспилотной самоходной тележки

путь  $l$ , это делает задачу условно оптимизируемой. Кроме того, конечные координата и скорость для каждого участка являются соответственно начальной координатой и скоростью для следующего участка пути (принцип непрерывности движения).

**Участок I.** Равноускоренное движение с  $a > 0$  в промежутке  $[0, t_1]$ . Здесь  $t_0 = x_0 = 0$ . Согласно (2), к концу участка I:

$$x_1 = \frac{1}{2}at_1^2; v_0 = at_1. \quad (3)$$

Таким образом, длительность участка разгона составит:

$$t_1 = \frac{v_0}{a}. \quad (4)$$

**Участок II.** Равномерное движение со скоростью  $v_0 = \text{const}$  в промежутке  $[t_1, t_2]$ .

Согласно (1), к концу участка II:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + v_0(t_2 - t_1) = \\ &= \frac{1}{2}at_1^2 + at_1(t_2 - t_1) = v_0t_2 - \frac{v_0^2}{2a}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$v_0 = \text{const}.$$

**Участок III.** Равнозамедленное движение с  $a < 0$  в промежутке  $[t_2, T]$  до полной остановки.

Согласно (2), к концу участка III:

$$\begin{aligned} x_3 &= l = x_2 + v_0(T - t_2) - \frac{1}{2}a(T - t_2)^2; \\ v &= 0 = v_0 - a(T - t_2). \end{aligned} \quad (6)$$

После несложных преобразований в (6) с учетом предшествующих соотношений получаем:

$$\begin{aligned} l &= -\frac{v_0^2}{2a} + v_0T - \frac{1}{2}a(T - t_2)^2; \\ T &= \frac{v_0}{a} + t_2 = t_1 + t_2. \end{aligned} \quad (6a)$$

Из второго уравнения в (6a) следует, что в условиях задачи время торможения равно времени ускорения. Действительно, время торможения (длительность участка III) равно:

$$T - t_2 = \frac{v_0}{a} = t_1.$$

С учетом последнего полное время движения определяется соотношением:

$$T = \frac{l}{v_0} + \frac{v_0}{a}. \quad (7)$$

Развернутый ответ на вопрос задачи можно сформулировать так.

График движения выглядит следующим образом:

**Участок I.** Равноускоренное движение в промежутке  $[0, t_1] = \left[0; \frac{v_0}{a}\right]$  до достижения скорости  $v_0$ .

Пройденный на участке путь:

$$x_1 = \frac{1}{2}at_1^2 = \frac{v_0^2}{2a}.$$

**Участок II.** Равномерное движение в промежутке  $[t_1, t_2] = \left[\frac{v_0}{a}; \frac{l}{v_0}\right]$  со скоростью  $v_0$ .

Пройденный на участке путь:

$$x_2 - x_1 = v_0(t_2 - t_1) - \frac{v_0^2}{2a} = l - \frac{v_0^2}{2a}.$$

**Участок III.** Равнозамедленное движение в промежутке  $[t_2, T] = \left[\frac{l}{v_0}; \frac{l}{v_0} + \frac{v_0}{a}\right]$  до остановки.

Пройденный на участке путь:

$$l - x_2 = \frac{v_0^2}{2a}$$

(такой же, как на участке разгона).

Полная пройденная тележкой дистанция  $l$  будет преодолена за время:

$$T = \frac{l}{v_0} + \frac{v_0}{a}.$$

**Конкретизируем модельные выкладки для заданных в условии числовых параметров задачи.**

**Участок I.** Равноускоренное движение в промежутке  $[0, t_1] = [0; 10]$ , с, до достижения скорости  $v_0 = 10$  м/с. Пройденный на участке путь:  $x_1 = 50$  м.

**Участок II.** Равномерное движение в промежутке  $[t_1, t_2] = [10; 20]$ , с, со скоростью  $v_0$ . Пройденный на участке путь:  $x_2 - x_1 = 100$  м.

**Участок III.** Равнозамедленное движение в промежутке  $[t_2, T] = [20; 30]$ , с, до остановки. Пройденный на участке путь:  $l - x_2 = 50$  м (такой же, как на участке разгона).

Полная пройденная тележкой дистанция  $l = 200$  м будет преодолена за время  $T = 30$  с.

**Замечание 1.** Обучающиеся должны уметь объяснить, почему решение оптимизационной задачи о минимальном времени  $T$  движения тележки однозначно определяется заданными параметрами  $l$ ,  $v_0$  и  $a$  и формально задача перестает быть оптимизационной.

**Замечание 2.** Обучающиеся должны заметить, что полное время движения  $T$  в (7) состоит из двух слагаемых, одно из которых уменьшается, а другое возрастает с увеличением  $v_0$ . Следовательно, если рассматривать скорость равномерного движения  $v_0$  как параметр задачи (при заданных  $l$  и  $a$ ), то для некоторой скорости  $v_{0,m}$  можно получить абсолютный минимум  $T_m$  во времени движения  $T$ . Новая постановка вопроса вновь делает задачу оптимизационной.

Как известно, сумма вида  $y(x) = a/x + x/b$ , где  $a, b = \text{const} > 0$ , достигает минимума  $y_m = \sqrt{a/b}$  при равенстве слагаемых, т. е. при  $x_m = \sqrt{ab}$ . Применительно к задаче о беспилотной перевозке грузов минимальное время движения  $T_m = 2\sqrt{l/a}$  будет достигнуто при условии  $v_0 = v_m = \sqrt{la}$ . Для заданных числовых значений это составит  $T_m = 2\sqrt{200} \approx 28,2$  с при  $v_0 = v_m = 14,1$  м/с. Таким образом, время доставки груза при снятии ограничения на скорость равномерного движения  $v_0$  может быть еще снижено. Допустимость снятия ограничения на  $v_0$  определяется техническими реалиями конкретной ситуации, но наличие резерва для оптимизации очевидно и является существенной особенностью модели.

**Замечание 3.** Обучающиеся должны уметь описать характер движения тележки и в последнем случае, когда требование  $v_0 = \text{const}$  снято. Здесь разгонный участок длительностью  $t_1 = v_0/a = \sqrt{l/a}$  по достижении максимальной скорости  $v_m = \sqrt{la}$  сразу сменяется участком торможения, ибо  $t_2 = T - t_1 = \sqrt{l/a} = t_1$ .

Несомненна практическая важность этой задачи, которая моделирует, например, роботизированную доставку полуфабриката из одного цеха завода в другой, когда, скажем, по соображениям безопасности или технологическим условиям производственные участки должны быть территориально отделены. Для построения математической модели и ее теоретического решения достаточно самых общих представлений о равномерном и равнопеременном механическом движении; это соответствует уровню девятого класса средней школы или более раннему (в школах с углубленным изучением предметов естественно-научного цикла). При всем том, однако, для доведения решения до ясных конкретных результатов требуются вдумчивость, настойчивость, достаточно глубокое понимание законов механического движения. В задаче обучающиеся имеют возможность получить уникальный опыт сопоставления результатов расчетов по модели с соответствующей робототехнической реализацией (см. далее).

Для усиления мотивации и разнообразия педагог может варьировать условия задачи в широких пределах, работая уже с классом аналогичных задач общей тематики. Например, можно рассматривать не одну, а две тележки, одна из которых имеет меньшее ускорение, но большую допустимую скорость движения. Или можно рассмотреть вполне реалистичную ситуацию круглосуточного производства, когда в течение некоторого периода суток ограничение по скорости равномерного движения тележки имеется, а в другой период оно снято, и т. д.

## Реализация модели

Для натурной (робототехнической) реализации модели была использована платформа с четырьмя двигателями постоянного тока, управляемая отладочной платой Arduino Mega 2560 R3 с применением драйверной платы Adafruit Motor Shield V1.0. Для питания робота использован лабораторный блок питания, настроенный на выходное напряжение 7 вольт. Измерение скорости робота осуществлялось путем подсчета числа оборотов колеса с помощью оптического энкодера по известной длине окружности колеса.

При реализации модели следует учесть реальные возможности конкретной роботизированной платформы. Используемая в эксперименте платформа не предполагает возможности управления ускорением, позволяя напрямую задавать лишь уровень напряжения на двигателях. Скорость вращения вала электродвигателя зависит от множества параметров, точные значения которых для конкретного двигателя могут быть неизвестны при отсутствии технической документации. На зависимость скорости от напряжения также влияют такие параметры, как масса робота, количество параллельно работающих двигателей, степень износа деталей двигателя и др. Вследствие этого вместо расчета напряжения, необходимого для движения с заданной скоростью, с учетом всех параметров предполагается вывести эмпирическую зависимость между значениями, устанавливаемыми роботом, и реальными значениями скорости.

Управление скоростью двигателя на используемой в эксперименте платформе осуществляется путем задания степени заполнения управляющего ШИМ-сигнала. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ) — это один из способов управления нагрузкой, при котором в данном случае уровень напряжения на обмотках двигателя пропорционален длительности импульсов при постоянной их частоте. Степенью заполнения будем называть отношение длины импульса к периоду сигнала. Среднее напряжение на двигателе, таким образом, будет пропорционально заданной степени заполнения, которая задается путем установки некоторого целочисленного значения в регистре OC1A контроллера ATmega2560. В эксперименте осуществляется измерение скорости вращения двигателей при различных значениях регистра с шагом 10. Результаты измерений приведены в таблице 1, длина окружности колеса — 0,215 м. Графическое представление результатов измерений приведено на рисунке 3.

Для экспериментальной реализации рассмотренной математической модели была разработана программа, осуществляющая настройку ШИМ в заданные моменты времени для изменения текущей

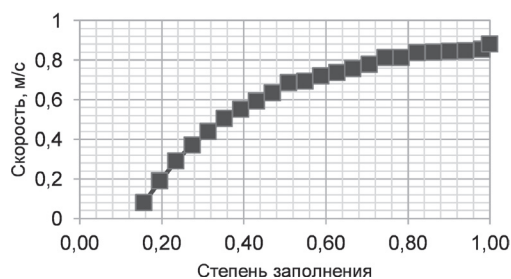


Рис. 3. Зависимость скорости тележки от степени заполнения ШИМ-сигнала

Таблица 1

**Экспериментальные значения скорости вращения двигателя при различных значениях степени заполнения**

| Степень заполнения ПИМ | OC1A | Кол-во оборотов колеса | Время, с |       |       |         | Частота вращения колеса, об/с | Скорость, м/с |
|------------------------|------|------------------------|----------|-------|-------|---------|-------------------------------|---------------|
|                        |      |                        | I        | II    | III   | Среднее |                               |               |
| 0,00                   | 0    | —                      | —        | —     | —     | —       | Не вращается                  | —             |
| 0,04                   | 10   | —                      | —        | —     | —     | —       | Не вращается                  | —             |
| 0,08                   | 20   | —                      | —        | —     | —     | —       | Не вращается                  | —             |
| 0,12                   | 30   | —                      | —        | —     | —     | —       | Не вращается                  | —             |
| 0,16                   | 40   | 50                     | 127,1    | 135,2 | 135,5 | 132,6   | 0,3771                        | 0,0811        |
| 0,20                   | 50   | 50                     | 58,4     | 56,7  | 55,7  | 56,9    | 0,8782                        | 0,1888        |
| 0,24                   | 60   | 50                     | 37,8     | 36,9  | 36,6  | 37,1    | 1,3477                        | 0,2898        |
| 0,27                   | 70   | 50                     | 29,1     | 28,9  | 28,9  | 29,0    | 1,7261                        | 0,3711        |
| 0,31                   | 80   | 50                     | 25,0     | 24,3  | 24,2  | 24,5    | 2,0408                        | 0,4388        |
| 0,35                   | 90   | 50                     | 21,5     | 21,1  | 21,2  | 21,3    | 2,3511                        | 0,5055        |
| 0,39                   | 100  | 100                    | 39,5     | 38,9  | 38,6  | 39,0    | 2,5641                        | 0,5513        |
| 0,43                   | 110  | 100                    | 36,7     | 36,1  | 36,0  | 36,3    | 2,7574                        | 0,5928        |
| 0,47                   | 120  | 100                    | 34,4     | 33,6  | 33,7  | 33,9    | 2,9499                        | 0,6342        |
| 0,51                   | 130  | 100                    | 32,0     | 31,4  | 30,8  | 31,4    | 3,1847                        | 0,6847        |
| 0,55                   | 140  | 100                    | 31,7     | 31,1  | 30,4  | 31,1    | 3,2189                        | 0,6921        |
| 0,59                   | 150  | 100                    | 29,8     | 29,8  | 29,9  | 29,8    | 3,3520                        | 0,7207        |
| 0,63                   | 160  | 100                    | 29,0     | 29,4  | 29,1  | 29,2    | 3,4286                        | 0,7371        |
| 0,67                   | 170  | 150                    | 42,9     | 42,5  | 42,5  | 42,6    | 3,5184                        | 0,7565        |
| 0,71                   | 180  | 150                    | 41,7     | 41,3  | 41,1  | 41,4    | 3,6261                        | 0,7796        |
| 0,75                   | 190  | 150                    | 40,0     | 39,6  | 39,6  | 39,7    | 3,7752                        | 0,8117        |
| 0,78                   | 200  | 200                    | 52,8     | 53,4  | 52,6  | 52,9    | 3,7783                        | 0,8123        |
| 0,82                   | 210  | 200                    | 50,5     | 51,5  | 51,9  | 51,3    | 3,8986                        | 0,8382        |
| 0,86                   | 220  | 200                    | 51,1     | 51,4  | 51,2  | 51,2    | 3,9037                        | 0,8393        |
| 0,90                   | 230  | 200                    | 51,0     | 51,1  | 50,8  | 51,0    | 3,9241                        | 0,8437        |
| 0,94                   | 240  | 200                    | 50,6     | 51,2  | 50,5  | 50,8    | 3,9396                        | 0,8470        |
| 0,98                   | 250  | 200                    | 50,4     | 50,3  | 50,1  | 50,3    | 3,9788                        | 0,8554        |
| 1,00                   | 255  | 200                    | 49,2     | 48,8  | 48,6  | 48,9    | 4,0928                        | 0,8799        |

Таблица 2

**Параметры программы, использованной в ходе эксперимента**

| Согласно математической модели        |           | С учетом возможностей робота                           |        |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|--------|
| Начальная (конечная) скорость, м/с    | 0,0 (0,0) | Начальная (конечная) скорость, % от макс.              | 0 (0)  |
| Скорость на основном участке, м/с     | 0,80      | Скорость на основном участке, % от макс.               | 91     |
| Расстояние, м                         | 20,00     | Шагов ускорения, $\Delta v = 1\%$                      | 91     |
| Ускорение, м/с <sup>2</sup>           | 0,20      | Шагов торможения, $\Delta v = -1\%$                    | 91     |
| Время разгона, с                      | 4,00      | Период изменения скорости при разгоне (торможении), мс | 44     |
| Время движения на основном участке, с | 21,00     | Время на основном участке, с                           | 20,992 |
| Время торможения, с                   | 4,00      | Время в пути, с                                        | 29,000 |
| Общее время движения, с               | 29,00     | Относительное расхождение времени                      | 0,000  |
| Разгонный участок, м                  | 1,60      | Пройденный путь, м                                     | 20,015 |
| Основной участок, м                   | 16,80     | Оборотов колеса за весь путь                           | 93,02  |
| Тормозной участок, м                  | 1,60      | Относительное расхождение пути, %                      | 0,076  |

скорости в соответствии с математической моделью. Задаваемые значения модельных параметров были адаптированы к техническим характеристикам робота. Необходимые для работы программы параметры и результаты работы программы представлены в таблице 2.

Путем интерполяции полученных в результате измерений данных была получена таблица соответствия скорости (в процентах от максимальной) значениям регистра ОС1А. Максимальная скорость движения робота в ходе измерений составила 0,8799 м/с.

Ввиду невозможности плавной регулировки скорости робота на использованной в эксперименте платформе осуществляется дискретное изменение параметров ШИМ через равные промежутки времени. Учет времени осуществляется средствами аппаратного таймера в составе микроконтроллера.

## Результаты и обсуждение

Графики движения робота в ходе эксперимента представлены на рисунках 4–6. Видно практически полное совпадение результатов расчетов по математической модели с натурной робототехнической реализацией модельного процесса.

Прямолинейное движение робота осуществлялось в коридоре студенческого общежития; пройденный фактический путь до остановки измерялся с помощью рулетки, полное время движения — секундомером.

Отметим увлекательность комплексного решения задачи на всех этапах:

- формулировка математической модели и ее решение;
- сборка беспилотной самоходной тележки;

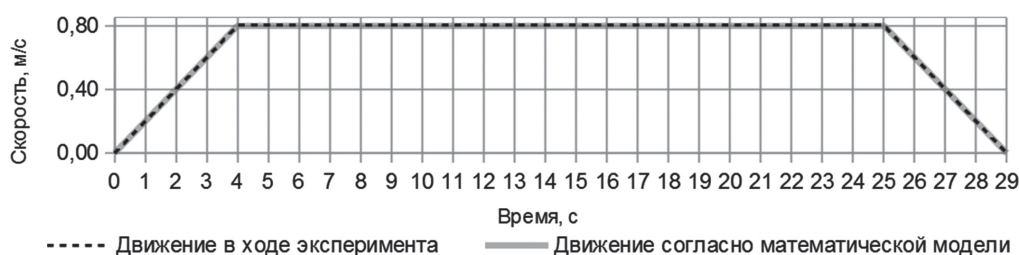


Рис. 4. Скоростной график движения робота  $v(t)$

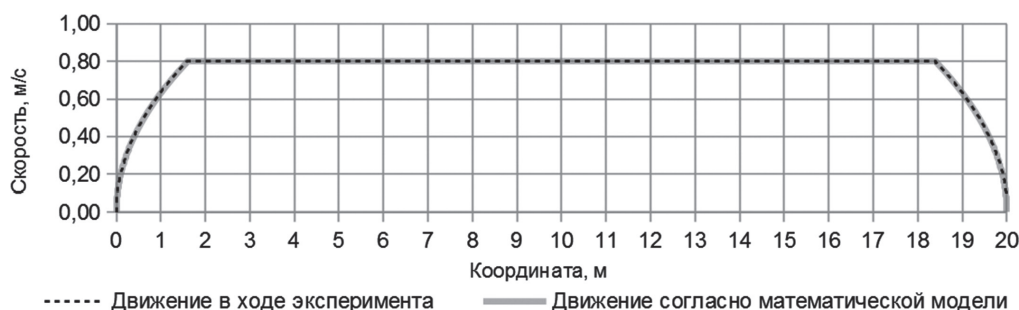


Рис. 5. Координатное изменение скорости робота  $v(x)$

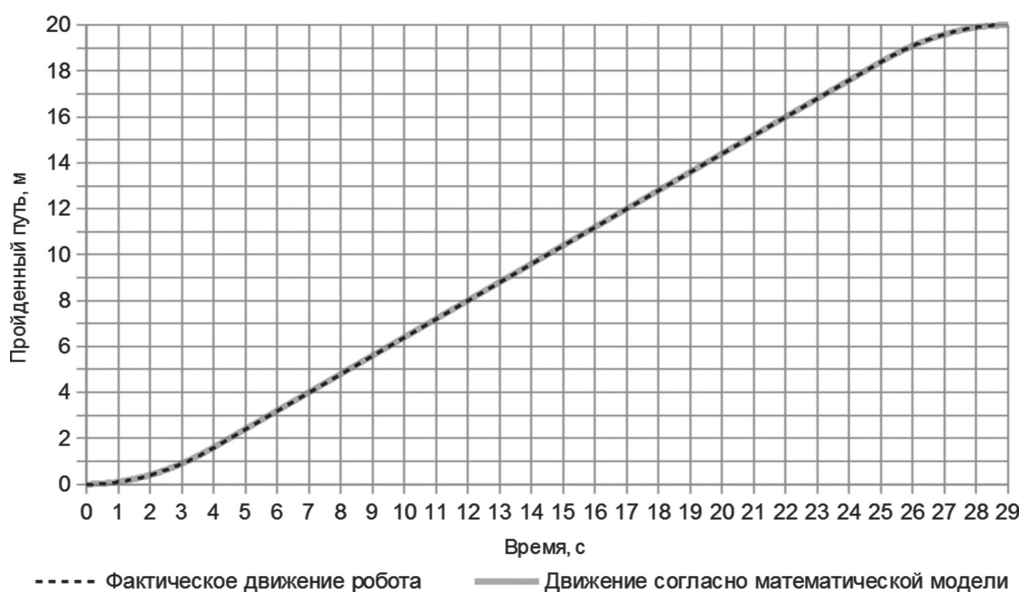


Рис. 6. Координатный график движения робота  $x(t)$

- апробация устройства с юстировкой исполнительных механизмов;
- наконец, «полевые» испытания модели со сравнением расчетных модельных и фактически реализованных параметров.

При описанном комплексном решении задачи был фактически **реализован полный цикл научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР)** — от постановки и решения теоретической оптимизационной задачи по беспилотной перевозке грузов за минимальное время при заданных ограничениях (элементы научно-исследовательской работы) до натурной реализации, юстировки и испытания конкретного робототехнического устройства, созданного для реализации модели (элементы опытно-конструкторской работы).

### Педагогические приложения модельных задач с робототехнической реализацией

Наш опыт позволяет сделать вывод о том, что даже при использовании сравнительно недорогих учебных робототехнических компонентов возможно ставить вполне серьезные, «взрослые» практико-ориентированные задачи, строить математические модели, решать их и материально воплощать в виде конкретного исполнительного робототехнического устройства.

Педагогические перспективы апробированного подхода трудно переоценить. Аналогичные задачи можно ставить и решать фактически без ограничения по возрасту обучающихся, формируя и развивая компоненты их инженерных цифровых компетенций. Решение таких задач можно выполнять и индивидуально, но более эффективной будет работа команды юных инженеров. В тех случаях, когда решение математической модели окажется сложным для учащихся основной школы, в команду можно привлечь учащихся старших классов, студентов вузов, педагогов.

На основании подобных задач можно устраивать индивидуальные или командные состязания («баттлы») в духе востребованных ныне соревнований World Skills. При этом оценочными критериями могут быть:

- адекватность постановки математической модели и ее решения;
- адекватная аппаратная реализация модели из предложенных компонентов;
- точность исполнения робототехническим устройством модели и достижения поставленных в решаемой задаче целей.

Так, в случае нашей конкретной задачи об оптимальной беспилотной перевозке грузов, могут быть критериально оценены следующие параметры:

- правильность формулирования и решения математической модели (в частности, обучающиеся должны знать кинематические законы равномерного и равнопеременного движения; понимать вытекающие из непрерывности движения требования «сшивки» координат и скоростей на границах сопряженных участков пути; получить равенство по времени и протяженности участков торможения и ускорения и т. п.);

- правильность и адекватность сборки конкретного исполнительного устройства с учетом задач, которые устройству предстоит решить в соответствии с моделью (разгон со стартовой позиции до заданной скорости, прямолинейное движение с постоянной скоростью, торможение, остановка в расчетный момент времени в заданном конечном пункте);
- испытание созданного робототехнического устройства с сопоставлением фактических протоколно фиксируемых параметров режима движения устройства с расчетом по модели и т. д.;
- установление причин несоответствия расчетов по модели с данными объективного контроля, предложение и реализация корректирующих изменений в устройстве, удостоверение в их результативности.

В 2018/2019 учебном году мы планируем апробировать рассмотренный подход на массовой учебной аудитории из студентов УрГПУ, обучающихся по математическому и информационному направлениям подготовки. Цель этого педагогического эксперимента — оценка возможности включения подобных задач в регулярный педагогический процесс подготовки будущих учителей.

### Заключение

Представленная робототехническая реализация практико-ориентированной задачи об оптимальной беспилотной транспортировке грузов показала широкие педагогические перспективы подхода при обучении мотивированных школьников и студентов как информационных, так и других направлений подготовки (математика, физика, естественные и инженерные науки). Постановка и решение подобных задач могут с успехом формировать и развивать инженерные цифровые компетенции обучающихся, а также служить дополнительным мотиватором к изучению дисциплин математического и естественно-научного циклов. Обобщая, можно сказать, что постановка и решение таких междисциплинарных задач призваны стать частью педагогики цифрового будущего России.

### Список использованных источников

1. Роботы не приживаются на российских заводах // Ведомости. 13 ноября 2016 года. <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2016/11/14/664697-roboti-ne-prizhivayutsya>
2. Ежелев В. Промышленная робототехника в России. Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях // Умное производство. 2018. Вып. 41. [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=395&group](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=395&group)
3. Промышленные роботы // Бизнес-конференция TADVISER. [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Промышленные\\_роботы](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Промышленные_роботы)
4. Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». <https://rg.ru/2018/05/08/president-ukaz204-site-dok.html>
5. Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449>

6. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования (в ред. Приказа Минобрнауки России от 29.06.2017 № 613). [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_131131/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_131131/)

7. Профессиональный стандарт «Педагог (педагогическая деятельность в дошкольном, начальном общем, основном общем, среднем общем образовании) (воспитатель, учитель)». Утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 18 октября 2013 года № 544н. <http://www.rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/129>

8. Указ Губернатора Свердловской области «О комплексной программе “Уральская инженерная школа”» от 6 октября 2014 года № 453-УГ. <http://www.pravo.gov66.ru/2564/>

9. Юные инженеры Свердловской области завоевали призовые места на всероссийских робототехнических соревнованиях // Официальный сайт Правительства Свердловской области. 16.04.2018. <http://www.midural.ru/news/list/document129514/>

10. Программа «Робототехника» // ПРОФЕСТ. <http://www.russianrobefest.ru/programma-robototekhnika/>

11. Аксенова О. В., Бодряков В. Ю. Использование ИКТ для развития творческих умений студентов в процессе выполнения учебно-исследовательских заданий // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (г. Кемерово, 12–13 октября 2017 года). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2017. С. 20–22.

12. Аксенова О. В., Бодряков В. Ю., Быков А. А., Топова Н. В. Оптимизационная задача о провисании цепной линии // Актуальные вопросы преподавания математики, информатики и информационных технологий. 2018. № 3. С. 123–130.

13. Аксенова О. В., Бодряков В. Ю. Натурный эксперимент с применением средств ИКТ и мобильных устройств как инструмент формирования исследовательских умений студентов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Информатизация образования». 2018. Т. 15. № 4.

14. Аксенова О. В., Бодряков В. Ю. Лабораторные работы по математике с применением ИКТ как инструмент формирования исследовательских умений студентов педагогического вуза // Состояние и перспективы развития ИТ-образования: Сборник докладов и научных статей Всероссийской научно-практической конференции (посвящается 50-летию Чувашского государственного университета имени И. Н. Ульянова) (г. Чебоксары, 16–18 ноября 2017 года). Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2018. С. 175–181.

15. Бодряков В. Ю., Воронина Л. В. Проблемы качества математического образования в педагогическом вузе и пути их решения // Педагогическое образование в России. 2018. № 2. С. 15–27.

16. Кузовкова А. А., Мамалыга Р. Ф., Бодряков В. Ю. Формирование познавательного интереса к математике у обучающихся в классах гуманитарно-эстетической направленности // Математика в школе. 2018. № 2. С. 35–42.

17. Alimisis D., Arlegui J., Fava N., Frangou S., Ionita S., Menegatti E., Monfalcon S., Moro M., Papanikolaou K., Pina A. Introducing robotics to teachers and schools: experiences from the TERECOP project // Proceedings for Constructionism. 2010. Vol. 1. P. 1–10.

18. Edwards A., Edwards C., Spence P. R., Harris C., Gambino A. Robots in the classroom: differences in students' perceptions of credibility and learning between “teacher as robot” and “robot as teacher” // Computers in Human Behavior. 2016. Vol. 65. P. 627–634.

19. Karahoca D., Karahoca A., Uzunboylub H. Robotics teaching in primary school education by project based learning for supporting science and technology courses // Procedia Computer Science. 2011. Vol. 3. P. 1425–1431.

20. Mikropoulos T. A., Bellou I. Educational robotics as mindtools // Themes in Science and Technology Education. 2013. Vol. 6. No. 1. P. 5–14.

21. IEEE Spectrum. Robotics News & Articles. <https://spectrum.ieee.org/robotics>

22. Robohub. Connecting the robotics community to the world. <https://robohub.org/>

23. Robotics — News, Reviews, Features // New Atlas. <https://newatlas.com/robotics/>

24. Robotics News // ScienceDaily. [https://www.sciencedaily.com/news/computers\\_math/robotics/](https://www.sciencedaily.com/news/computers_math/robotics/)

25. Богданова Д. А. Социальные роботы и дети // Информатика и образование. 2018. № 4. С. 56–60.

26. Брыксина О. Ф., Тараканова Е. Н., Лучин Р. М. Образовательная робототехника в педагогическом вузе: из опыта использования кибернетического конструктора ТРИК // Информатика и образование. 2015. № 6. С. 48–52.

27. Григорьев С. Г., Курносенко М. В. Магистратура «Мехатроника, робототехника и электроника в образовании» как подготовка педагогов предметной области «Математика и информатика» // Информатика и образование. 2016. № 10. С. 53–55.

28. Немцова О. С. Методические особенности реализации элективного курса по робототехнике на базе комплекта LEGO MINDSTORMS NXT 2.0 // Информатика и образование. 2013. № 7. С. 74–76.

29. Самылкина Н. Н. Проектный подход к организации внеурочной деятельности в основной школе средствами образовательной робототехники // Информатика и образование. 2017. № 8. С. 18–24.

30. Трактирникова А. И. Использование LEGO-технологий для формирования проектно-конструкторской компетентности учащихся // Информатика и образование. 2014. № 5. С. 60–65.

31. Филиппов В. И. Модель организации внеурочной деятельности по робототехнике в основной школе // Информатика и образование. 2017. № 4. С. 28–38.

## ROBOTIC IMPLEMENTATION OF THE MODEL PRACTICE ORIENTED PROBLEM OF OPTIMAL UNMANNED CARGO TRANSPORTATION

P. I. Alekseevsky<sup>1</sup>, O. V. Akseanova<sup>1</sup>, V. Yu. Bodryakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural State Pedagogical University, Ekaterinburg  
620075, Russia, Ekaterinburg, ul. Karl Liebknecht, 9/9A

### Abstract

The article presents the robotic implementation of the practice oriented problem of optimal unmanned cargo transportation. In the problem it is necessary for unmanned cargo track to go through the specified path in the shortest possible time (taking into

account the specified technical conditions (for example, the speed limitation) according to the predefined conditions (acceleration, constant speed, braking).

A mathematical model of moving the object and the solution of the corresponding optimization problem are presented. A description of the implementation of the model for a particular device is given, including preliminary test and calibration experiments. The conducted approbation showed wide pedagogical perspectives of the approach when teaching motivated schoolchildren and students of both information and other directions of learning (mathematics, physics, natural and engineering sciences).

**Keywords:** unmanned vehicle, learning robotics, optimization model, practice oriented problem, robotic implementation.

**DOI:** 10.32517/0234-0453-2018-33-8-51-60

**For citation:**

*Alekseevsky P. I., Aksenova O. V., Bodryakov V. Yu. Robototekhnicheskaya realizatsiya model'noj praktiko-orientirovannoj zadachi ob optimal'noj bespilotnoj transportirovke грузов [Robotic implementation of the model practice oriented problem of optimal unmanned cargo transportation]. *Informatika i obrazovanie — Informatics and Education*, 2018, no. 8, p. 51–60. (In Russian.)*

**Received:** August 16, 2018.

**Accepted:** October 26, 2018.

**About the authors**

**Petr I. Alekseevsky**, Assistant at the Department of Informatics, Information Technologies and Methods of Teaching Informatics in Institute of Mathematics, Physics, Informatics and Technologies of Ural State Pedagogical University, Ekaterinburg; u@nyuu.ru

**Olga V. Aksenova**, Assistant at the Department of Informatics, Information Technologies and Methods of Teaching Informatics in Institute of Mathematics, Physics, Informatics and Technologies of Ural State Pedagogical University, Ekaterinburg; aksenova421@yandex.ru

**Vladimir Yu. Bodryakov**, Advanced Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Mathematics Teaching Methods in Institute of Mathematics, Physics, Informatics and Technologies of Ural State Pedagogical University, Ekaterinburg; Bodryakov\_VYu@e1.ru

## НОВОСТИ

### HP представила технологию 3D-печати металлических изделий

HP Inc. на выставке International Manufacturing Technology Show (IMTS) 2018 представила технологию 3D-печати HP Metal Jet для крупносерийного производства металлических изделий промышленного качества. HP Metal Jet обеспечивает многократный прирост производительности (до 50 раз) при значительно более низкой себестоимости готового изделия по сравнению с другими методами 3D-печати. Эту технологию готовятся применять ведущие промышленные производители GKN Powder Metallurgy и Parmatech для массового изготовления деталей к своим изделиям.

HP Metal Jet — революционная технология струйной печати связующим веществом с точностью до одного объемного пикселя, в которой нашел воплощение 30-летний опыт компании HP в производстве печатающих головок и инновационных химических материалов для печати. С областью печати 430×320×200 мм, четырехкратной избыточностью сопел (дюзов) и двукратным количеством печатных линеек, со значительно меньшей потребностью в связующем веществе на единицу массы изделия технология HP Metal Jet обеспечивает большую производительность и надежность при низких единовременных и эксплуатационных расходах по сравнению с другими технологиями 3D-печати металлами. Применение HP Metal Jet начнется с изготовления готовых деталей из нержавеющей стали; они будут обладать степенью изотропии не ниже (или даже выше) той, которая требуется от стали согласно стандартам ASTM и MPIF.

Впервые в истории отрасли HP вступает в партнерские отношения с GKN Powder Metallurgy: на предприятиях GKN Powder Metallurgy будет использоваться технология HP Metal Jet для производства функциональных металлических деталей для ведущих мировых производителей, в том числе Volkswagen и Wilo.

Компания Volkswagen, один из крупнейших и наиболее открытых к инновациям мировых автопроизводителей, уже встраивает технологию HP Metal Jet в свои долгосрочные стратегии проектирования и процессы производства. Благодаря сотрудничеству между Volkswagen, GKN Powder Metallurgy и HP компании удалось быстро оценить перспективность массового производства таких персонализируемых деталей, как индивидуальные брелоки для ключей и наружные таблички с именем владельца. Кроме того, в многолетних планах Volkswagen по использованию HP Metal Jet — производство функциональных частей, к конструкции которых предъявляются высокие требования, например, рычагов переключения передач и корпусов зеркал. По мере того как в производство запускаются новые технологические платформы, например, электромобили, на технологию HP Metal Jet возлагают большие надежды: в частности, она должна помочь в выпуске облегченных (без ущерба безопасности) металлических деталей.

Компания GKN Powder Metallurgy также использует преимущества технологии HP Metal Jet: она производит недорогие детали с улучшенными гидравлическими характеристиками, которые поставляет компании Wilo — мировому лидеру в производстве насосов и решений для насосного оборудования. Wilo надеется использовать технологию HP Metal Jet для получения первичных деталей гидравлической системы, например, рабочих колес, диффузоров и корпусов насосов.

HP вносит свой вклад и в производство медицинских товаров: для этого HP в партнерстве с Parmatech (принадлежит компании ATW Company) будет расширять массовое производство деталей по технологии Metal Jet для ряда клиентов: OKAY Industries, Primo Medical Group и других.

(По материалам CNews)