

УСТРОЙСТВО ДЛЯ БЫСТРОГО МАКЕТИРОВАНИЯ

П. С. ТОПОРКОВ, Ю. В. ФЕДОСОВ, М. Я. АФАНАСЬЕВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: toporkov@idtsoft.ru*

Рассмотрены вопросы построения устройства для быстрого макетирования в составе единой информационной среды, а также управления устройством. Предмет исследования — разработка, наладка и введение в эксплуатацию устройства для быстрого макетирования (прототипирования) электротехнических изделий по экономичной технологии. Сформулированы основные задачи и способы их решения. Проанализирован ряд аналогичных существующих устройств и указаны их преимущества и недостатки. Описаны состав и схема устройства, разъяснены принципы его функционирования. Обоснован выбор используемых материалов.

Ключевые слова: *быстрое макетирование (прототипирование), электротехнические изделия, токопроводящие полимеры, автоматизация производства, управление технологическим оборудованием*

Понятие „многоагентные системы“ и концепция „Индустрия 4.0“ имеют большое значение в развитии современной производственной инфраструктуры [1—9]. Стремление к максимальной автоматизации большинства процессов, составляющих основу функционирования любой производственно-технологической единицы — предприятия, отдела, участка, отражает всеобщую тенденцию внедрения последних научно-технических достижений в хозяйственную деятельность любого социального объекта [10—15]. Это стремление и эта тенденция очевидно рациональны, так как направлены на минимизацию трудоемкости, экономию времени, освобождение человеческих ресурсов, повышение производственных показателей и оптимизацию всех процессов в целом. В то же время использование упомянутых технологий неизбежно влечет за собой серьезное усложнение организации и поддержания работоспособности производственно-технологических комплексов [5—9, 16]. В настоящей статье описывается первый ключевой элемент находящейся в разработке многоагентной системы управления интеллектуальным технологическим оборудованием в составе единой информационной среды, а именно — устройство (установка) для быстрого макетирования электротехнических изделий. На момент написания статьи находится в разработке экономичная технология макетирования электротехнических изделий, которую планируется протестировать и использовать в процессе наладки и ввода в эксплуатацию рассматриваемого устройства.

Устройство относится к области технических средств, осуществляющих быстрое макетирование, и может быть использовано, например, для быстрого макетирования плоскостных электротехнических узлов.

Принципы построения устройств, осуществляющих быстрое макетирование (прототипирование), рассмотрены, в частности, в работах [5, 17—19]. Основу конструкции рассматриваемых устройств составляет горизонтальная рабочая платформа, на которой, при необходимости, может размещаться технологическая подложка, и перемещающийся над ней в горизонтальной плоскости в двух координатах рабочий орган, осуществляющий осаждение на рабочую платформу (или на размещаемую на ней технологическую подложку) макетного материала в соответствии с заданным топологическим рисунком. При этом в случае объемного макетирования рабочая платформа выполняется с обеспечением возможности перемещения в вертикальном направлении, что позволяет формировать трехмерный объект. Все процессы

макетирования осуществляются под управлением компьютера на основе компьютерной геометрической модели, представляющей собой послойное отображение макетируемого объекта.

Схожая задача решалась при использовании известного способа трехмерной печати модели изделия [20]. Для ее решения создается компьютерная 3D-модель изделия, эта модель делится на горизонтальные слои, осуществляется нанесение слоя порошкообразного материала на рабочую платформу, нанесение рисунка сечения на слой порошкообразного материала жидким связующим и послойное отверждение порошкообразного материала. В результате формируется физическая модель изделия.

Решение аналогичной задачи — макетирования трехмерных объектов — представлено в работе [21]. С помощью соответствующих технических средств и в соответствии с набором топологических рисунков, определяемых конфигурациями сечений изготавливаемой модели, осуществляется послойное нанесение и последующее отверждение лучом газового лазера модельного материала с получением требуемой формы модели.

Таким образом, с помощью технических средств, представленных в патентах [20, 21], решается техническая задача макетирования объектов, материал которых имеет однородную структуру.

Эта же техническая задача — макетирование объектов с однородной структурой материала — может быть решена с помощью устройства для быстрого макетирования („rapid prototyping machine“), представленного в [22]. Устройство, принцип построения которого аналогичен вышерассмотренным, представляет собой горизонтально расположенную рабочую платформу с механизмом горизонтального перемещения над ней рабочего органа, оснащенного средствами для нанесения на платформу (или на установленную на ней технологическую подложку) модельного материала и последующего его отверждения. Средство для нанесения на платформу модельного материала — камера с полимерным порошком и механизмом его подачи, а устройство для отверждения полимерного порошка — камера со связующим материалом и механизмом подачи. Рабочая платформа оснащена механизмом перемещения в вертикальном направлении. Все указанные механизмы связаны электрическими цепями с управляющим компьютером, несущим компьютерный образ макетируемого объекта в виде набора горизонтальных сечений.

В ходе работы устройства на рабочую платформу (или на технологическую подложку) наносится слой полимерного порошка, на который затем по заданному топологическому рисунку наносится связующий материал, под действием которого происходит отверждение полимерного порошка с образованием топологического рисунка первого слоя. Затем рабочая платформа сдвигается вниз на расстояние, равное толщине нанесенного слоя, после чего процесс формирования очередного слоя макетируемого объекта повторяется.

Таким образом, данное устройство, как и рассмотренные выше, позволяет решать задачи быстрого макетирования объектов с однородной структурой материала, например корпусных элементов. Недостаток устройства заключается в том, что оно не имеет технических средств, позволяющих макетировать узлы, содержащие разнородные по своему материалу элементы, например электротехнические узлы, содержащие электрические проводники и изолирующие участки.

В открытой печати отсутствует описание устройства, с помощью которого возможно осуществлять быстрое макетирование расширенной группы объектов, включающей в себя плоскостные электротехнические узлы типа кросс-плат, плат для поверхностного монтажа электрорадиоэлементов, плоских соединительных шлейфов. Эта задача решается с помощью предлагаемых технических средств, обеспечивающих возможность создания макета электротехнического изделия, состоящего из проводящих и непроводящих элементов, располагающихся на плоскости в заданной конфигурации.

Предлагаемое устройство для быстрого макетирования (рис. 1) содержит горизонтально расположенную рабочую платформу 1, над которой размещен механизм 2 прецизионного перемещения в горизонтальной плоскости рабочего органа — подвижной каретки 3, оснащенного средствами для нанесения на рабочую платформу 1 модельного материала и последующего его отверждения. В отличие от [22], указанные средства для нанесения и отверждения модельного материала содержат первый управляемый питатель 4, второй управляемый питатель 5 и управляемую лазерную головку 6 (головку лазерного излучателя), выполняющие в данном устройстве функции рабочих инструментов. Питатели 4 и 5 выполнены в виде емкостей с соответствующими соплами 7 и 8 (см. рис. 1, вид А), обеспечивающими возможность регулировать подачу находящегося в них модельного материала. При этом питатель 4 несет в себе модельный полимерный материал с низкой электропроводностью, а питатель 5 — модельный полимерный материал с высокой электропроводностью. Оба модельных полимерных материала обладают способностью затвердевать под действием излучения, создаваемого лазерной головкой 6.

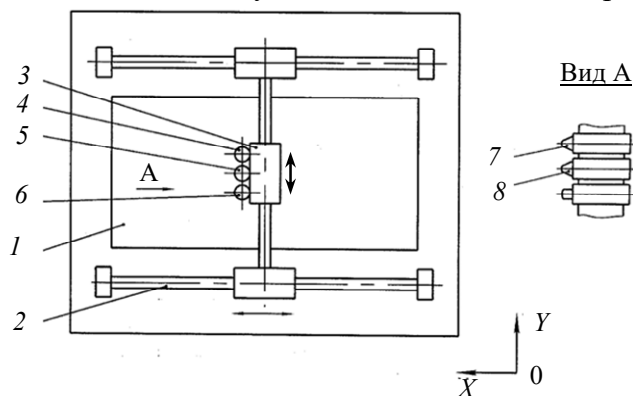


Рис. 1

Структурная схема, отражающая основные функциональные электрические связи устройства (рис. 2), содержит центральный контроллер 9, с которым связаны первый 10 и второй 11 контроллеры двигателей механизма 2 прецизионного перемещения подвижной каретки 3 вдоль осей X и Y (см. рис. 1). Центральный контроллер 9 связан также с исполнительным элементом лазерной головки 6 и с исполнительными элементами сопел 7 и 8 питателей 4 и 5. Кроме этого, с центральным контроллером 9 связан блок 12 датчиков контроля перемещения рабочих инструментов и блок 13 внешних интерфейсов. Необходимое электропитание устройства обеспечивается блоком 14 (конкретные связи блока 14 с энергопотребляющими элементами устройства условно не показаны). Управление работой устройства осуществляется посредством специального программного обеспечения, хранящегося в блоке 15 памяти центрального контроллера 9.

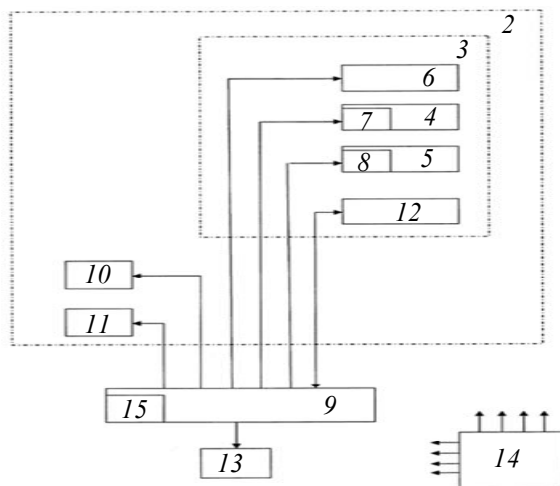


Рис. 2

Работа устройства осуществляется следующим образом.

Блок питания 14 формирует необходимую сетку питающих напряжений, которые поступают на энергопотребляющие элементы устройства. По командам, поступающим с контроллера 9, контроллеры 10 и 11 воздействуют на соответствующие двигатели механизма 2, осуществляя прецизионное перемещение каретки 3 вдоль осей X и Y . Все перемещения каретки 3 контролируются с помощью соответствующих датчиков блока 12. В соответствии с командами контроллера 9 в процессе перемещения каретки 3 производится нанесение полимерного материала с низкой электропроводностью из сопла 7 питателя 4 на рабочую платформу 1. Далее по команде от контроллера 9 производится включение лазерной головки 6. Каретка 3 вновь приводится в движение механизмом 2, обеспечивая под действием лазерного излучения отверждение нанесенного на рабочую платформу 1 полимерного материала с низкой электропроводностью, тем самым формируются изоляционные участки. Далее в соответствии с командами контроллера 9 в процессе последующего перемещения каретки 3 производится нанесение полимерного материала с высокой электропроводностью из сопла 8 питателя 5 на рабочую платформу 1. Затем по команде от контроллера 9 производится включение лазерной головки 6. Каретка 3 вновь приводится в движение механизмом 2, обеспечивая под действием лазерного излучения отверждение нанесенного на рабочую платформу 1 полимерного материала с высокой электропроводностью, тем самым формируются соответствующие электрические проводники и контактные площадки. В процессе работы устройства данные с контроллера 9 поступают на блок 13 внешних интерфейсов для контроля и регистрации.

В качестве материала с высокой электропроводностью планируется использовать токопроводящие полимеры. В работах [23—25] рассмотрены различные варианты электропроводящих полимеров (полиакриламид, полианаалин, политиофен) и показана возможность задавать их свойства, манипулируя параметрами синтеза. В настоящий момент в качестве основного варианта рассматривается политиофен как наиболее доступный в плане исходных материалов и организации технологического процесса синтеза.

Таким образом, с помощью предлагаемого устройства осуществляется создание требуемого макета плоскостного электротехнического узла, например макета кросс-платы, макета платы для поверхностного монтажа электрорадиоэлементов, макета плоского соединительного шлейфа или макета другого аналогичного по идеологии построения плоскостного электротехнического изделия. Подключение устройства к единой информационной среде с многоагентной системой управления дает возможность интеграции его в общий процесс жизненного цикла изделия (от возникновения идеи и создания трехмерной модели до получения физического образца с необходимыми свойствами), а также предоставляет гибкие возможности управления, например удаленный запуск макетирования, удаленное управление количеством производимых изделий, возможность производства без участия человека путем поступающих из распределенных пунктов управления команд на изготовление определенного числа макетов, оперативные изменения в моделях и сериях готовых изделий, гибко и без задержки вносимые в технологический процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестакова И. Г. Новая темпоральность цифровой цивилизации: будущее уже наступило // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2019. Т. 10, № 2. С. 20—29. DOI: 10.18721/JHSS.10202.
2. Цифровая экономика и Индустрия 4.0: новые вызовы // Тр. науч.-практ. конф. с международным участием / Под ред. А. В. Бабкина. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 573 с.
3. Сабитов О. 7 ключевых технологий Индустрии 4.0: от машинного обучения до 3D-печати // СМИ Хайтек. 2020 [Электронный ресурс]: <<https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>>, 12.07.2020.

4. Сермягин Д. AR – технология будущего // Платформа vc.ru. 2020 [Электронный ресурс]: <<https://vc.ru/future/107108-ar-tehnologiya-budushchego-nachalo-cikla-statey-posvyashchennyh-eto-y-proryvnoy-tehnologii>>, 13.07.2020.
5. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) / Центр междисциплинарных исследований им. С. П. Курдюмова „Сретенский Клуб“. 2015 [Электронный ресурс]: <<http://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnyye-sistemy-obzor>>, 14.07.2020.
6. *Chao-Yang Chena, Wei-Hua Gui, Zhi-Hong Guan, Ru-Liang Wang, Shao Wu Zhou.* Adaptive neural control for a class of stochastic nonlinear systems with unknown parameters, unknown nonlinear functions and stochastic disturbances // *Neurocomputing*. 2017. P. 1—9.
7. *Qin Shi, Xiaowei Cui, Sihao Zhao, Shuang Xu, Mingquan Lu.* BLAS: broadcast relative localization and clock synchronization for dynamic dense multiagent systems // *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 2020. DOI: 10.1109/TAES.2020.2979640.
8. *Paggi H., Lara J. A., Soriano J.* Structures generated in a multiagent system performing information fusion in peer-to-peer resource-constrained networks // *Neural Computing and Applications*. 2020. N 32(4). DOI:10.1007/s00521-018-3818-1.
9. *Colombo L. J., Dimarogonas D. V.* Symmetry reduction in optimal control of multiagent systems on lie groups // *IEEE Trans. on Automatic Control*. 2020. Vol. 65 (11). P. 4973—4980.
10. Денисов Д. Введение ив концепцию „Интернета вещей“ // Портал Nag.Ru. 2020 г. [Электронный ресурс]: <<https://nag.ru/material/38920>>, 12.07.2020.
11. *Kritzinger W., Karner M., Traar G, Henjes J., Sihn W.* Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // *IFAC PapersOnLine*. 2018 [Электронный ресурс]: <https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_274125.pdf>, 14.07.2020
12. Яблочников Е. И. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 92 с.
13. Яблочников Е. И. Методологические основы построения АСТПП. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 84 с.
14. Андреев Ю. С., Третьяков С. Д. Промышленный интернет вещей. СПб: Ун-т ИТМО, 2019. 54 с.
15. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Андреев Ю. С. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. СПб: Ун-т ИТМО, 2018. 116 с.
16. Грибовский А. А., Щеколдин А. И. Аддитивные технологии и быстрое производство в приборостроении. СПб: Ун-т ИТМО, 2018. 48 с.
17. Князева А. Г. Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий // Сб. тез. V Всерос. науч. семинара, 5—6 дек. 2019, Томск [Электронные текст. данные]. Томск: 2019. 108 с.
18. *Gibson I., Rosen D., Stucker B.* 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. N. Y.: Springer Science & Business Media, 2015. 498 p.
19. *Lipson H., Kurman M.* Fabricated: The New World of 3D Printing. Indianapolis, IN : Wiley, 2013. 302 p.
20. Пат. 2 535 704 РФ, МПК В22F 7/00(2006.01), В22F 3/00(2006.01), В29С 67/00(2006.01), В32В 18/00(2006.01) Способ трехмерной печати огнеупорных изделий / Л. М. Аксельрод, М. Ю. Турчин, И. Н. Минниханов. 20.12.2014.
21. Пат. 2 459 704 С2 РФ, МПК В29С 67/00 (2006.01). Способ изготовления трехмерного объекта / Ф. Йохен. 10.04.2011.
22. Pat. 1253379. Method and apparatus for rapid prototyping using computer-printer aided to object realization / *Wei-Hsian Lai, Chun-I Cheng, Sen-Yung Lee* et al.: Publ. 2005, oct.
23. Осовская И. И., Новикова А. А. Термопласты. Новейшие достижения в технологии и переработке полимеров. Кейсы и тесты: Учеб. пособие. СПб: СПбГУПТД, 2019. 134 с.
24. *Vlasov P. V., Smirnov M. A., Dmitriev I. Yu., Saprykina N. N.* Electrochemical activity and structure of new composite systems based on crosslinked polyacrylamide and polyaniline // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2014. N 87(4). P. 491—495.

25. Liu R. C., Liu Z. P. Polythiophene: Synthesis in aqueous medium and controllable morphology // Chinese Science Bulletin. 2009. N 54(12). P. 2028—2032. DOI:10.1007/s11434-009-0217-0.

Сведения об авторах

- Павел Сергеевич Топорков** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: toporkov@idtsoft.ru
- Юрий Валерьевич Федосов** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: yf01@yandex.ru
- Максим Яковлевич Афанасьев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: myafanasyev@itmo.ru

Поступила в редакцию
12.05.2021 г.

Ссылка для цитирования: Топорков П. С., Федосов Ю. В., Афанасьев М. Я. Устройство для быстрого макетирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 767—773.

DEVICE FOR RAPID PROTOTYPING

P. S. Toporkov, Yu. V. Fedosov, M. Ya. Afanasyev

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: toporkov@idtsoft.ru

The issues of creation and control of a device for rapid prototyping as a part of unified information environment are considered. The research is aimed at development, adjustment and commissioning of a device for rapid prototyping of electrical products using a rational technology. The main tasks and methods of their solution are formulated. Several similar existing devices are analyzed, and their advantages and disadvantages are indicated. The device composition and diagram are described, the principles of its functioning are explained. The choice of materials used is substantiated.

Keywords: rapid prototyping, electrical products, conductive polymers, production automation, technological equipment management

REFERENCES

1. Shestakova I.G. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* (St. Petersburg State Polytechnical University Journal), 2019, no. 2(10), pp. 20–29, DOI: 10.18721/JHSS.10202. (in Russ.)
2. Babkin A.V., ed. *Tsifrovaya ekonomika i Industriya 4.0: novyye vyzovy* (Digital Economy and Industry 4.0: New Challenges), Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation, St. Petersburg, 2018, 573 p. (in Russ.)
3. <https://hightech.fm/2020/03/19/industry-4-0>. (in Russ.)
4. <https://vc.ru/future/107108-ar-tehnologiya-budushchego-nachalo-cikla-statey-posvyashchennyh-etoy-proryvnoy-tehnologii>. (in Russ.)
5. <http://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor>. (in Russ.)
6. Chao-Yang Chena, Wei-Hua Gui, Zhi-Hong Guan, Ru-Liang Wang, Shao Wu Zhou, *Neurocomputing*, 2017, pp. 1–9.
7. Qin Shi, Xiaowei Cui, Sihao Zhao, Shuang Xu, Mingquan Lu, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, DOI: 10.1109/TAES.2020.2979640.
8. Paggi H., Lara J.A., Soriano J. *Neural Computing and Applications*, 2020, no. 4(32), DOI:10.1007/s00521-018-3818-1.
9. Colombo L.J., Dimarogonas D.V. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2020, no. 11(65), pp. 4973–4980.
10. <https://nag.ru/material/38920>. (in Russ.)
11. Kritzinger W., Karner M., Traar G, Henjes J., Sihn W. *IFAC PapersOnLine*, 2018, https://publik.tuwien.ac.at/files/publik_274125.pdf.
12. Yablochnikov E.I. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v priborostroyenii* (Automation of Technological Preparation of Production in Instrument Making), St. Petersburg, 2002, 92 p. (in Russ.)
13. Yablochnikov E.I. *Metodologicheskiye osnovy postroyeniya ASTPP* (Methodological Foundations of Building ASTPP), St. Petersburg, 2005, 84 p. (in Russ.)
14. Andreev Yu.S., Tretyakov S.D. *Promyshlenny internet veshchey* (Industrial Internet of Things), St. Petersburg, 2019, 54 p. (in Russ.)
15. Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Andreev Yu.S. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v priborostroyenii* (Automation of Technological Preparation of Production in Instrument Making), St. Petersburg, 2018, 116 p. (in Russ.)

16. Gribovskiy A.A., Schekoldin A.I. *Additivnyye tekhnologii i bystroye proizvodstvo v priborostroyenii* (Additive Technologies and Fast Production in Instrument Making), St. Petersburg, 2018, 48 p. (in Russ.)
17. Knyazeva A.G. *Collection of Abstracts of the V All-Russian Scientific Seminar*, December 5–6, 2019, Tomsk, 2019, 108 p. (in Russ.)
18. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, NY, Springer Science & Business Media, 2015, 498 p.
19. Lipson H., Kurman M. *Fabricated: The New World of 3D Printing*, Indianapolis, Wiley, 2013, 302 p.
20. Patent RU2 535 704, B22F 7/00(2006.01), B22F 3/00(2006.01), B29C 67/00(2006.01), B32B 18/00(2006.01), *Method of 3d Printing on Refractory Articles*, Aksel'rod L.M., Turchin M.J., Minnikhanov I.N., Application 2013118068/05, 18.04.2013, Priority 18.04.2013, Published 20.12.2014. (in Russ.)
21. Patent RU 2 459 704 C2, B29C 67/00 (2006.01), *Method of Making 3d Object*, Jokhen F., Published 10.04.2011. (in Russ.)
22. Patent 1253379, *Method and apparatus for rapid prototyping using computer-printer aided to object realization*, A1Wei-Hsian Lai, Chun-I Cheng, Sen-Yung Lee, Muh-Rong Wang, Chun Shan Wang, Chuh-Yung Chen, Chieh-Li Chen, Chen Hsieh, Sheng-Jye Hwang, Cheng-Chien Wang, Tzong-Shyng Leu, Published 2005-10-13.
23. Osovskaya I.I., Novikova A.A. *Termoplasty. Noveyshiye dostizheniya v tekhnologii i pererabotke polimerov. Keysy i testy* (Thermoplastics. The latest Advances in Polymer Technology and Processing. Cases and Tests), St. Petersburg, 2019, 134 p. (in Russ.)
24. Vlasov P.V., Smirnov M.A., Dmitriev I.Yu., Saprykina N.N. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, no. 4(87), pp. 491–495.
25. Liu R.C., Liu Z.P. *Chinese Science Bulletin*, 2009, no. 12(54), pp. 2028–2032. DOI:10.1007/s11434-009-0217-0.

Data on authors

- Pavel S. Toporkov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: toporkov@idtsoft.ru
- Yuriy V. Fedosov** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: yf01@yandex.ru
- Maxim Ya. Afanasyev** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: myafanasyev@itmo.ru

For citation: Toporkov P. S., Fedosov Yu. V., Afanasyev M. Ya. Device for rapid prototyping. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 9. P. 767–773 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-767-773