

ИНДУСТРИАЛЬНАЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ЕДИНИЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

А. В. ЧУКИЧЕВ, О. С. ТИМОФЕЕВА, Е. И. ЯБЛОЧНИКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: avchukichev@itmo.ru*

Рассматривается подход к созданию информационно-технологической платформы для проведения исследований по организации производственных процессов с применением технологий индустриальных киберфизических систем. Представлен процесс технологической подготовки производства изделий на литьевых машинах с использованием сменных полимерных формообразующих деталей, полученных на аддитивных установках. Рассмотрены возможности совершенствования физических производственных процессов за счет использования информации, полученной путем мониторинга объектов производственной системы. Отмечены необходимость применения систем имитационного моделирования технологических процессов и возможность их развития путем сбора и анализа цифровых данных на всех этапах подготовки производства.

Ключевые слова: *индустриальные киберфизические системы, промышленный интернет вещей, интегрированная производственная система, литье под давлением, формообразующие детали, аддитивное производство*

Цифровое производство, основанное на единой модели данных об изделиях, процессах и производственных системах, на цифровых методах планирования, моделирования, мониторинга и управления производством — это базовая ступень к созданию индустриальных киберфизических производственных систем [1].

Индустриальные киберфизические системы (ИКФС) являются основой для воплощения концепции Smart Factory в реальность; они представляют собой единую сеть взаимодействующих физических и виртуальных компонентов, организованную в рамках интегрированной модели производственной системы, способной быстро адаптироваться к текущей производственной ситуации. Непрерывный процесс сбора производственных данных позволяет обеспечить системы управления производством актуальными данными, что улучшит качество принимаемых решений на всех уровнях инфраструктуры контроля и управления [2].

Любая производственная система состоит из таких компонентов, как промышленное оборудование и периферийные устройства, программное обеспечение различного назначения, а также технологическое оснащение и сами объекты производства. Все компоненты должны быть идентифицированы, иметь возможность обмениваться информацией и взаимодействовать при выполнении технологических и производственных процессов [3]. Целью создания индустриальной киберфизической платформы является непрерывный сбор комплексных данных об объектах производства, выполняемых процессах и используемых для их реализации ресурсах, а также обработка получаемой информации и формирование баз знаний.

Индустриальные киберфизические системы можно представить в виде трех уровней:

- 1) физический уровень содержит все физические объекты, задействованные в производственной системе;
- 2) виртуальное пространство состоит из взаимосвязанных цифровых двойников объектов. Цифровые двойники записывают исторические данные о физических аналогах и представляют их в облако. Подходы к созданию виртуального пространства рассматриваются в работе [4];

3) облако сервисов содержит различные программные приложения, предоставляемые производителями оборудования и поставщиками услуг.

Такая структура ИКФС представлена в работе [5] на примере взаимодействия станков с ЧПУ с другими компонентами ИКФС.

К технологиям ИКФС можно отнести промышленный интернет вещей (IIoT), облачные технологии, Big Data + В. I. (Business Intelligence), технологии дополненной (AR) и виртуальной (VR) реальности, сервисно-ориентированную архитектуру [6].

В настоящей работе рассматривается технологическая подготовка производства (ТПП) малых серий изделий из термопластичных полимерных материалов (ТПМ) литьем под давлением. Для сокращения сроков ТПП использовались сменные формообразующие детали (ФОД) литьевых форм (сменные вставки), изготовленные из полимерных материалов с применением аддитивных технологий.

Технология литья изделий из полимерного материала под давлением ориентирована, как правило, на массовое производство вследствие высокой стоимости и трудоемкости изготовления технологического оснащения — литьевых форм. Развитие рынка услуг, связанное с разработкой новых ТПМ и тестированием условий их переработки, а также проведение ресурсных испытаний перспективных изделий из штатных материалов в реальных условиях эксплуатации на ранних стадиях ТПП обуславливает необходимость изготовления малых („пилотных“) серий изделий.

При производстве малых серий полимерных изделий важной задачей является выбор материала сменных ФОД, ресурс которых позволит изготовить требуемую партию изделий и не будет при этом избыточным. Появление новых композиционных термостойких полимерных материалов, ориентированных на рынок аддитивного производства, позволяет рассматривать возможность их использования для быстрого изготовления сменных ФОД литьевых форм [7—9]. Внедрение аддитивных технологий в производственный процесс позволяет повысить гибкость производственной системы благодаря расширению спектра используемого производственного оборудования и сокращению времени на подготовку производства.

Для изучения процесса литья под давлением применялась специально спроектированная переналаживаемая литьевая форма, представляющая собой набор стандартных стальных плит. Быстросменные ФОД (матрица и пуансон), изготавливаемые из полимерных материалов, в том числе с применением аддитивных технологий, устанавливаются в соответствующие полости стальных плит. Подробное описание используемого в эксперименте оборудования и технологического оснащения приведено в работе [10]. Для изготовления сменных ФОД литьевых форм выбраны материалы, обладающие различными свойствами, из которых изготовлены комплекты ФОД с использованием трех различных аддитивных технологий:

— PA2200 (EOS) — модифицированный полиамид PA12 в виде порошка, детали изготавливаются на установке EOSINT Formiga1 10 по SLS-технологии;

— Digital ABS Plus (Stratasys) — имитация ABS, детали получают на установке Stratasys PolyJet из материалов RGD515 Plus и RGD531;

— Accura Bluestone и Accura High Performance Composite (3DSystems) — нанокompозитные полимерные материалы, детали создают на 3D-принтере ProX 800 по SLA-технологии.

Применяемое при проведении исследования программное обеспечение и оборудование представлено в таблице.

№	Этап ТПП	Программное обеспечение / Оборудование
1	Проектирование полимерного изделия	Cimatron
2	Анализ технологичности	MSC Software, Cimatron, Moldex3D R16
3	Проектирование отливки	Cimatron
4	Имитационное моделирование процесса литья	Moldex3D R16
5	Проектирование ФОД	Cimatron

№	Этап ТПП	Программное обеспечение / Оборудование
6	Изготовление ФОД	3DEXPERIENCE Marketplace, Cimatron, HAAS Super Mini Mill, КлиматикПро ТХ-300
7	Контроль ФОД	PC-DMIS, КИМ Dea Global Perfomance 05.07.05, профилометр Hommel Tester T8000
8	Литье под давлением полимерных изделий	ТПА ELEKTRA Evolution 30
9	Контроль полимерных изделий	PC-DMIS, КИМ Dea Global Perfomance 05.07.05, профилометр Hommel Tester T8000
10	Мониторинг, хранение и управление данными	Winnium Cloud

На этапах проектирования полимерного изделия и ФОД литьевой формы, а также при разработке управляющих программ для изготовления ФОД используется САД/САМ-система Cimatron. С использованием этой системы на основе 3D-модели полимерного изделия спроектированы 3D-модель отливки, а также 3D-модели сменных вставок литьевой формы.

Для моделирования процессов на уровне технологической операции литья использовалась САЕ-система Moldex3D. Результатом моделирования являлись следующие виды данных: распределение температур в конструкции, величина остаточных напряжений, наличие пор в материале, наличие и положение линий спая, циклограмма литья.

Еще на этапе моделирования процесса литья для установления его оптимальных параметров крайне важно применять САЕ-системы при проведении экспериментальных исследований с использованием новых материалов, а также при организации мелкосерийного производства изделий литьем под давлением. Ресурс использования полимерной оснастки ограничен, и проведение пробных циклов может сократить количество полученных изделий требуемого качества или просто разрушить полимерную сменную вставку [11—13].

На адекватность расчетных моделей влияет точность описания процессов, в литьевой машине и литьевой форме. Действительные параметры процесса литья можно получить, применяя датчики температуры расплава и давления, установленные в литьевой форме [14], системы мониторинга и анализа данных из литьевой машины.

Создание имитационной модели на уровне производственного процесса средствами системы DELMIA 3DEXPERIENCE позволяет решать следующие задачи: синхронизация совместно работающих устройств на виртуальном уровне, запускающих или останавливающих выполнение заранее заданных программ; оптимизация времени циклов автоматизированных линий; расчет производительности элементов технологической системы и т.д. Состав модели подробно описан в [15].

Имитационные модели могут быть использованы для создания цифровых двойников производственной системы. Для этого необходимо обеспечить сбор данных с датчиков и контроллеров, установленных непосредственно на оборудовании с целью измерения ключевых параметров работы оборудования и обеспечения непрерывности процесса производства. Для этих целей технологическое оборудование, используемое в эксперименте, подключено к платформе ПоТ Winnium [16]. Подключение оборудования требует создания коннекторов, собирающих данные из системы управления станка и передающих их в облачное хранилище.

Мониторинг работы оборудования, применяемого на различных этапах изготовления изделия, позволяет планировать размещение производственных заказов малых серий изделий с учетом реальной загрузки и знаний о времени окончания текущих процессов. Информация о ресурсах и параметрах технологических процессов, необходимых для производства, позволит эффективно планировать подготовку литьевого производства.

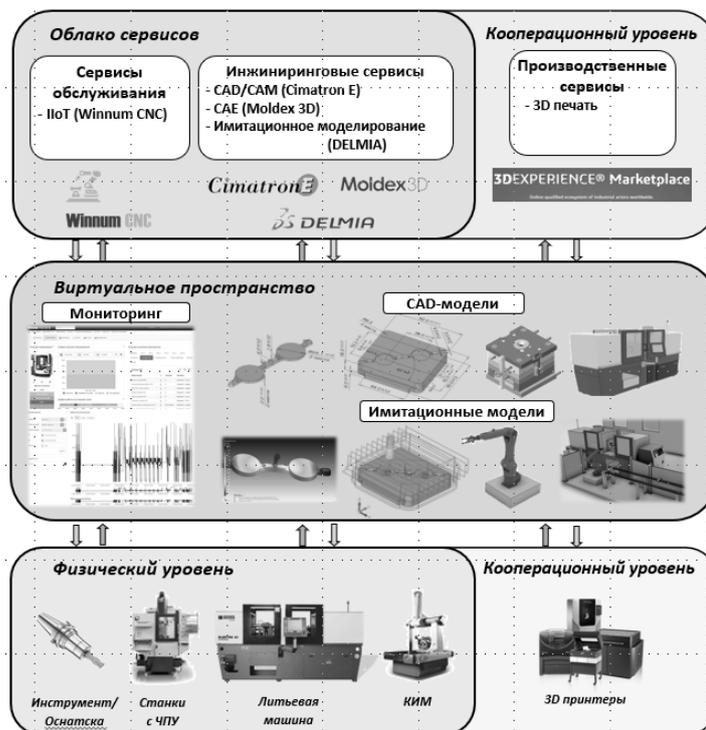
Для описания характеристик объектов может быть достаточно возможностей PDM-систем, но такие данные о реальном состоянии и текущем местоположении, необходимые для эффективной организации процессов, требуют применения технологий идентификации и онлайн-мониторинга. В случае повторного заказа на изделия можно использовать имеющийся

на складе комплект сменных ФОД, если достаточно оставшегося эксплуатационного ресурса, информация о котором должна содержаться в облаке.

Средствами платформы Winnum с применением различных технологий автоматической идентификации могут быть организованы электронная идентификация и отслеживание местонахождения и перемещений разнотипных объектов, в том числе изделий. В этом случае для идентификации сменных вставок использовались устройства, применяющие технологию Near Field Communication (NFC): термостойкая (температура эксплуатации до 110 °С) корпусированная PPS-метка NTAG213 диаметром 24 мм и метка-наклейка NTAG213 диаметром 30 мм (до 60 °С). Проведенные эксперименты подтвердили возможность использования NFC-меток в процессах литья полимерных изделий, при этом контролировались температура поверхностей ФОД и состояние меток после каждого цикла.

Каждая NFC-метка содержит запись, состоящую из четырех информационных полей: номер производственного заказа, ID комплекта сменных вставок, их эксплуатационный ресурс и ссылку на расположенный в облаке Winnum файл с историей изготовления и правилами эксплуатации. Работа со сменными ФОД, оснащенными NFC-метками, обеспечивает выбор наладчиком нужного комплекта сменных полимерных ФОД к универсальной литьевой форме. Кроме того, наладчик сможет получить всю информацию, необходимую для подготовки к работе: технологию сборки, режимы литья, визуальные материалы по настройке оборудования.

Интеграция цифровых моделей производственных ресурсов и процессов совместно с технологиями мониторинга и планирования позволила сформировать производственную платформу на основе уровневой концепции ИКФС. На рисунке представлены облако сервисов, виртуальное пространство и физический уровень разработанной индустриальной киберфизической платформы.



Необходимость в специальных 3D-принтерах для печати ФОД приводит к появлению кооперационного уровня. Для заказа комплектов ФОД из полимерных материалов целесообразно использовать облачный сервис. Актуальность и преимущества подобного взаимодействия с поставщиками производственных сервисов отмечены в работе [17]. В настоящей работе использовался облачный сервис 3DEXPERIENCE Marketplace.

Научно-исследовательская инновационная платформа, оснащенная современным оборудованием и автоматизированными системами и использующая технологии и методы ИКФС для получения знаний о новых материалах и технологиях, а также о цифровых производственных процессах, может занять важное место в структуре полимерной отрасли. Настоящая статья посвящена индустриальной киберфизической платформе для разработки, исследования и демонстрации новых процессов в сфере производства малых серий полимерных изделий литьем под давлением. Обеспечение доступа ко всему объему конструкторско-технологической информации на уровне производственных подразделений, применение технологий идентификации и прослеживаемости позволит передавать данные о реальном состоянии производственной системы на облачный уровень управления и планирования производственных процессов. Чтобы гарантировать передачу в производственную систему обоснованных конструкторско-технологических решений, необходимо применять средства моделирования на всех этапах, в том числе использовать 3D-имитационную модель производственной системы, постепенно приближая ее уровень к цифровому двойнику.

Дальнейшая работа будет направлена на развитие платформы в направлениях организации и управления виртуальным пространством, включения функций MES (Manufacturing Execution System, система управления производственными процессами) на основе использования технологий идентификации и прослеживаемости, а также организации межмашинного взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reiner A.* Industrie 4.0 — Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production // Technological Innovations in the Product Development. 19th Intern. Seminar on High Technology. Piracicaba, Brasil, October 9th, 2014.
2. *Azaiez S., Boc M., Cudennec L.* et al. Towards Flexibility in Future Industrial Manufacturing: A Global Framework for Self-Organization of Production Cells // The 2nd Intern. Workshop on Recent Advances on Machine-to-Machine Communication. Procedia Computer Science. 2016. Vol. 83. P. 1268—1273.
3. *Colombo A. W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F., and Lastra J.* Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems. Cham: Springer International Publishing, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1.
4. *Kashevnik A., Teslya N., Yablochnikov E., Arckhipov V., Kipriianov K.* Development of a prototype Cyber Physical Production System with help of Smart-M3 // 42nd Conf. of the Industrial Electronics Society, IECON 2016. P. 4890—4895.
5. *Liu C., Xu X.* Cyber-physical machine tool—the Era of Machine Tool 4.0 // The 50th CIRP Conf. on Manufacturing Systems. Taichung, Taiwan, 2017.
6. Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries / The Boston Consulting Group, Inc. [Электронный ресурс]: <https://www.bcgperspectives.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm80-185183.pdf>.
7. *Vogeler F., Verspreet J. & Geyskens K.* Breakout analysis of plastic material jetted moulds for injection moulding // Intern. Conf. on Polymers and Moulds Innovations - PMI2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.researchgate.net/publication/327843901>>.
8. *Poehler F. M., Bauer S., Feucht T.* 3D Printing Form-building Parts in Moulds for Small-scale Production // Gedruckte Spritzgiessformen für kleine Stueckzahlen// Kunststoffe. 2018. Bd 108, N 11. P. 4—9.
9. *Kampker A., Trieb J., Alves B., Kawollek S. and Ayvaz P.* Potential analysis of additive manufacturing technologies for fabrication of polymer tools for injection moulding – A comparative study // 2018 IEEE Intern. Conf. on Advanced Manufacturing (ICAM). Yunlin, 2018. P. 49—52. DOI: 10.1109/AMCON.2018.8614915.
10. *Timofeeva O., Andreev Y., Yablochnikov E.* Simulation of injection molding process and 3D-printing of forming parts for small-batch production // IEEE 17th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN). 2019. P. 1631—1637.

11. Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (1): CAE Technology Development and Process Evolution [Электронный ресурс]: <<https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-filling-simulation-and-smart-manufacturing-under-industry-1-cae-technology-development-and-process-evolution/>>.
12. Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (2): Smart Injection Machines & Their Adjustment Principles [Электронный ресурс]: <<https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-filling-simulation-and-smart-manufacturing-under-industry-4-0-2-smart-injection-machines-their-adjustment-principles/>>.
13. Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., Ivashin S. Integration of different computer-aided systems in product designing and process planning on digital manufacturing // 11th CIRP Conf. on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Procedia CIRP. 2018. Vol. 67. P. 476—481.
14. Rytka C., Kristiansen P. M., Neyer A. Iso- and variothermal injection compression moulding of polymer micro- and nanostructures for optical and medical applications // J. of Micromechanics and Microengineering. 2015. Vol. 25. Art. no. 065008. P. 1—16.
15. Demkovich N., Yablochnikov E., Abaev G. Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems // IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). 2018. P. 291—296.
16. Абрамян К. В., Андреев Ю. С., Горбенко А. А., Третьяков С. Д., Юрьева Р. А. Разработка информационно-технологической платформы цифрового производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 149—156.
17. Dazhong Wu, Rosena D. W., Lihui Wang, Schaefer D. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation // Computer-Aided Design. 2015. Vol. 59. P. 1—14.

Сведения об авторах

- Артёмий Валерьевич Чукичев** — аспирант; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Ольга Сергеевна Тимофеева** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: otimofeeva@itmo.ru
- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: yablochnikov@itmo.ru

Поступила в редакцию
04.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: Чукичев А. В., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Индустриальная киберфизическая платформа для единичного производства полимерных изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 840—846.

**INDUSTRIAL CYBER-PHYSICAL PLATFORM
FOR SMALL SERIES PRODUCTION OF POLYMER PARTS**

A. V. Chukichev, O. S. Timofeeva, E. I. Yablochnikov

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: avchukichev@itmo.ru*

An approach to the creation of an information technology platform for conducting research on organization of production processes using technologies of industrial cyber-physical systems is considered. The process of technological preparation of the products production with injection molding machines using replaceable polymer forming parts made by additive installations is presented. Possibilities of improving physical production processes by using information obtained by monitoring of the production system objects are analyzed. The necessity of using systems for simulation modeling of technological processes and the possibility of their development by collecting and analyzing digital data at all stages of production preparation are noted.

Keywords: industrial cyber-physical system engineering, industrial internet of things, information technology platform, injection molding, polymer forming parts, additive manufacturing

REFERENCES

1. Reiner A. *Technological Innovations in the Product Development. 19th International Seminar on High Technology*, Piracicaba, Brasil, October 9th, 2014.

2. Azaiez S., Boc M., Cudennec L. et al. *The 2nd International Workshop on Recent Advances on Machine-to-Machine Communication*, Procedia Computer Science, 2016, vol. 83, pp. 1268–1273.
3. Colombo A.W., Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R., Jammes F. and Lastra J. *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems*, Cham, Springer International Publishing, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-05624-1.
4. Kashevnik A., Teslya N., Yablochnikov E., Arckhipov V., Kipriianov K. *42nd Conference of the Industrial Electronics Society*, IECON 2016, pp. 4890–4895.
5. Liu C., Xu X. *The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Taichung, Taiwan, 2017.
6. *Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*, The Boston Consulting Group, Inc, https://www.bcgperspectives.com/Images/Industry_40_Future_of_Productivity_April_2015_tcm80-185183.pdf.
7. Vogeler F., Verspreet J. & Geyskens K. *International Conference on Polymers and Moulds Innovations - PMI2018*, <https://www.researchgate.net/publication/327843901>
8. Poehler F.M., Bauer S., Feucht T. *Kunststoffe*, 2018, no. 11(108), pp. 4–9.
9. Kampker A., Triebs J., Alves B., Kawollek S. and Ayzaz P. *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, Yunlin, 2018, pp. 49–52. DOI: 10.1109/AMCON.2018.8614915.
10. Timofeeva O., Andreev Y., Yablochnikov E. *IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2019, pp. 1631–1637.
11. *Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (1): CAE Technology Development and Process Evolution*, <https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-filling-simulationand-smart-manufacturing-under-industry-1-cae-technology-development-and-process-evolution/>.
12. *Mold Filling Simulation and Smart Manufacturing under Industry 4.0 (2): Smart Injection Machines & Their Adjustment Principles*, <https://www.moldex3d.com/en/blog/top-story/mold-fillingsimulation-and-smart-manufacturing-under-industry-4-0-2-smart-injection-machines-their-adjustment-principles/>.
13. Kutin A., Dolgov V., Sedykh M., Ivashin S. *11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Procedia CIRP, 2018, vol. 67, pp. 476–481.
14. Rytka C., Kristiansen P.M., Neyer A. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, vol. 25, art. no. 065008, pp. 1–16.
15. Demkovich N., Yablochnikov E., Abaev G. *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 291–296.
16. Abramyan K.V., Andreev Yu.S., Gorbenko A.A., Tretyakov S.D., Yureva R.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 2(63), pp. 149–156. (in Russ.)
17. Dazhong Wua, Rosena D.W., Lihui Wangb, Schaefer D. *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 59, pp. 1–14.

Data on authors

- Artemiy V. Chukichev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avchukichev@itmo.ru
- Olga S. Timofeeva** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: otimofeeva@itmo.ru
- Eugeny I. Yablochnikov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: yablochnikov@itmo.ru

For citation: Chukichev A. V., Timofeeva O. S., Yablochnikov E. I. Industrial cyber-physical platform for small series production of polymer parts. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 9. P. 840–846 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-840-846