

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 620.178.5.05

DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-3

*А. В. Перов***МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ  
И УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕМП-2***A. V. Perov***IMPROVEMENT OF THE TEMP-2 STAND  
OF ACCELERATIONS AND RATE**

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Работы по модернизации и совершенствованию экспериментально-испытательной базы предприятия ракетно-космической отрасли направлены на поддержание ее на уровне, обеспечивающем решение задач наземной экспериментальной отработки датчиков-преобразующей аппаратуры в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, а также подтверждение соответствия технических характеристик датчиков-преобразующей аппаратуры предъявляемым требованиям. Объектом модернизации является стенд линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2, предназначенный для проведения испытаний датчиков-преобразующей аппаратуры, передачи размера величины линейного ускорения и угловой скорости низкочастотным линейным акселерометрам, датчикам угловых скоростей, гироскопам. **Материалы и методы.** В процессе работы по модернизации проведен анализ технического состояния и дефектация стенда, по результатам которых были определены направления совершенствования стенда, обеспечивающие высокую эффективность, производительность и достоверность процессов испытаний и градуировки датчиков-преобразующей аппаратуры, основываясь на базовых принципах его работы и функционирования, а также за счет применения более современной и совершенной элементной базы. Изготовлены детали и узлы, а также выполнены их монтаж и сборка до рабочего состояния. Проведены пуско-наладочные работы, включающие комплексное опробование, наладку стенда, проведение автономных и типовых испытаний, а также испытаний в целях утверждения типа и подготовку стенда к производственному процессу. **Результаты.** Полученные в ходе работ результаты могут найти применение при разработке и модернизации метрологического обеспечения датчиков-преобразующей аппаратуры, предназначенной для комплектации изделий ракетно-космической техники. **Выводы.** Примененные в данной работе методы позволили значительно улучшить метрологические характеристики модернизируемого стенда, а также снизить экономические затраты на обслуживание и возможное дальнейшее расширение функциональных возможностей стенда в будущем.

**A b s t r a c t. Background.** Improvement and upgrading of the experimental and test base of the enterprise of the rocket and space industry is aimed at maintaining it at a level that ensures the solution of the tasks of ground-based experimental testing of sensor-transforming equipment in conditions close to actual operating conditions, as well as confirming the conformity of the sensor-transforming technical characteristics equipment requirements. The ob-

ject of improvement is the Temp-2 acceleration and rate stand, designed to test sensor-converting equipment, transfer linear acceleration size and angular velocity to low-frequency accelerometers, angular velocity sensors, and gyroscopes. **Materials and methods.** In the course of the modernization work, an analysis of the technical condition and stand fault detection was carried out, the results of which determined the directions for improving the stand, ensuring high efficiency, productivity and reliability of the testing and calibration processes of sensor-transforming equipment, based on the basic principles of its operation and functioning, as well as through the use of more modern and improved element base. Manufacturing of parts and assemblies, as well as their installation and assembly to working condition. Pre-commissioning works were carried out, including comprehensive testing, stand setup, autonomous and type testing, as well as tests for type approval and preparation of the stand for the production process. **Results.** The results of the work can be applied in the development and improvement of the metrological support of sensor-transforming equipment intended for the assembly of rocket and space technology products. **Conclusions.** The methods used in this work allowed to significantly improve the metrological characteristics of the upgraded stand, as well as to reduce the economic costs of maintenance and possible further expansion of the functional capabilities of the stand in the future.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** ракетно-космическая техника, центрифуга, линейное ускорение, угловая скорость, датчико-преобразующая аппаратура, автоматизированный стенд.

**К e y w o r d s:** rocket and space technology, centrifuge, linear acceleration, angular velocity, sensor-converting equipment, automated stand.

Ракетно-космическая техника (РКТ) является одним из самых высокотехнологичных образцов научно-производственной деятельности. Измерительные задачи, решаемые в процессе наземной отработки и эксплуатации изделий РКТ, охватывают практически все физические параметры (давление, температура, линейные ускорения, вибрация, линейные и угловые перемещения, напряжение электрического тока, плотность и температура, характеристики магнитного и гравитационного полей и т.п.). Предъявляемые жесткие требования к качеству и надежности датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА), применяемой для решения измерительных задач в РКТ, приводят к необходимости всестороннего полноценного подтверждения ее характеристик в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Проведение испытаний с целью подтверждения характеристик ДПА является одной из наиболее важных стадий ее производства. При этом следует отметить, что без опережающего развития экспериментально-испытательной базы невозможно выполнять требования по качеству и безопасности [1] в запланированные сроки.

Проблемы переоснащения экспериментально-испытательной базы предприятий ракетно-космической промышленности обусловлены морально устаревшим и физически изношенным оборудованием, недостаточным уровнем и объемом работ по созданию задела в части разработки перспективного испытательного и метрологического оборудования. Состояние стендовой базы предприятий ракетно-космической промышленности требует проведения реконструкции, разработки и приобретения современного высокопроизводительного испытательного оборудования. В условиях значительных финансовых затрат, необходимых для переоснащения экспериментально-испытательной базы предприятий ракетно-космической отрасли, актуальной задачей является модернизация испытательных стендов в части улучшения технических характеристик, повышения точности и достоверности воспроизведения и измерения условий испытаний, в то время как значительная часть оборудования, обеспечивающего наземную отработку РКТ, находится за пределом нормативного срока эксплуатации.

Своевременная модернизация и совершенствование оборудования на предприятии является основой для повышения производительности труда, улучшения экономических показателей, а также расширения технических возможностей и выполнения требований техники безопасности. Именно поэтому актуальной задачей для АО «НИИФИ» явилась модернизация стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 в рамках опытно-конструкторской работы. Стенд Темп-2 применяется для выполнения операций настройки, оценки действи-

тельных значений технических характеристик ДПА, технического освидетельствования средств измерений линейного ускорения, испытаний ДПА при воздействии на них постоянно-го центробежного ускорения.

Темп-2 был разработан Ленинградским политехническим институтом в 1989 г. и представлял из себя высокоточную прецизионную центрифугу, закрепленную на бетонном фундаменте, с подключенными к ней пультом управления скоростью вращения ротора, блока подготовки воздуха, а также комплекта аппаратуры, предназначенной для измерения сигналов и питания испытываемых приборов. Принимая во внимание тот факт, что Темп-2 проектировался со значительным запасом механической прочности, степень изношенности многих его кинематических узлов, как правило, незначительна. В связи с этим модернизация Темп-2 включает в себя прежде всего полную замену электроники на новые, современные и более надежные устройства с возможностью удаленного программного управления по различным каналам связи; ремонт его кинематической системы; установку новых датчиков и блоков измерения, управления и регистрации; дооснащение специальными приспособлениями и измерительными приборами для проведения необходимых испытаний, а также персональным компьютером (ПК) со специальным программным обеспечением (ПО), позволяющим автоматизировать, упростить и ускорить процесс проведения испытаний.

Структурно стенд линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 разделен на три основные части (рис. 1):

- центрифугу, закрепленную на бетонном фундаменте, с механизмом вращения поворотного стола, приводимого в действие с помощью серводвигателя;
- стойку управления, содержащую средства управления и встроенные средства измерений;
- рабочее место оператора, содержащее ПК и внешние средства измерений.

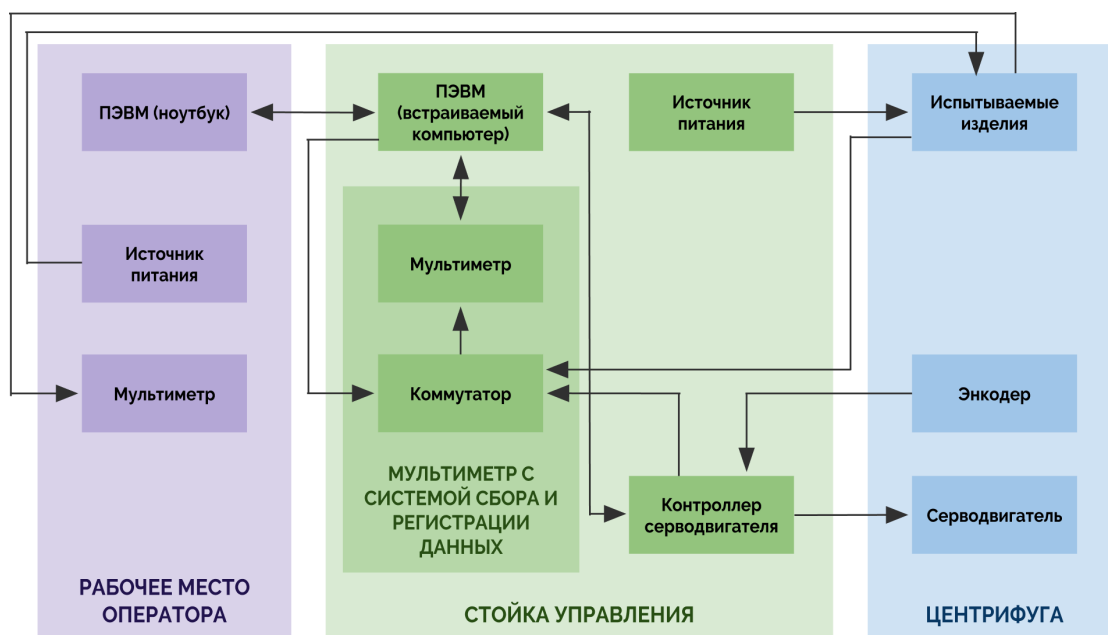


Рис. 1. Структурная схема стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2

Центрифуга стенда является высокоточным прецизионным оборудованием, поэтому сохранение и возможное улучшение точностных характеристик стенда после замены значительной части ключевых узлов в ходе модернизации являлись также одной из приоритетных задач.

Одним из главных принципов, применяемых при модернизации стенда, стало использование унифицированной элементной базы в блочном исполнении всех основных узлов стенда. Применение этого принципа позволило значительно повысить ремонтпригодность стенда, а также увеличило возможность дальнейшего наращивания его функционала без полной замены уже имеющегося оборудования.

Прежде всего в ходе модернизации стенда была произведена замена штатного двигателя постоянного тока на асинхронный серводвигатель переменного тока. Основным недостатком

штатного двигателя являлся частый износ контактных дорожек на роторе, что вызывало сначала ухудшение стабильности работы, а затем и полный его отказ. Замена на другой двигатель постоянного тока могла помимо вышеуказанного недостатка повлечь и другие, такие как низкая помехоустойчивость, сложность в настройке и нестабильность параметров. Современные серводвигатели, управляемые контроллерами с частотными преобразователями, этими недостатками не обладают и являются более предпочтительными благодаря наличию современных шин и удобных протоколов обмена. Кроме того, микроконтроллеры, управляющие частотным преобразователем серводвигателя, позволяют обрабатывать данные за период в несколько десятков микросекунд (еще десять лет назад это время составляло 200 мс), что позволило расширить диапазон регулирования с обратной связью с высокой точностью поддержания скорости во всем диапазоне [2]. Встроенный высокоскоростной коммуникационный интерфейс CANopen позволяет приводу интегрироваться с другими средствами автоматизации наиболее эффективно и рационально. Управление в замкнутом контуре, фильтр подавления резонанса и вибрации, а также функция портальной синхронизации помогают управлять сложным движением, требующим высокой точности и гладкости хода. Контроллер серводвигателя имеет возможность не только быстрого разгона поворотного стола, но и быстрого торможения, что позволяет полностью исключить устаревшую систему тормозных блоков с пневмоприводом. При динамическом торможении кинетическая энергия ротора генератора преобразуется в электрическую, а затем подается на тормозной резистор, где рассеивается в виде тепла.

В качестве датчика обратной связи был применен инкрементальный энкодер, который обладает существенными точностными преимуществами по сравнению с ранее установленным импульсным датчиком скорости за счет значительного увеличения разрешающей способности (на несколько порядков), которое достигнуто благодаря увеличению количества меток, нанесенных на диск энкодера, а также применению методов интерполяции выходного сигнала без потерь в точности.

Возможная проблема наложения высокочастотной помехи, возникающей от воздействия контроллера серводвигателя на измерительные сигналы каналов датчиков обратной связи и испытываемых изделий, была решена применением экранированных кабелей на этих каналах, а также установкой сетевого дросселя и высокочастотного сетевого фильтра на входе частотного преобразователя. В целях повышения эксплуатационных характеристик в системе [3], улучшения электромагнитной совместимости оборудования и уменьшения помех был использован радиочастотный фильтр на три фазы. В качестве дополнительной степени защиты измерительных каналов от помех используется сетевой дроссель, который ограничивает скорость нарастания стартового тока в цепи и взаимное влияние коммутационных преобразователей, запитываемых от одного и того же трансформатора. Процесс коммутации в цепях с сетевыми дросселями протекает плавно, коммутационные перенапряжения подавляются. Кроме того, сетевые дроссели предохраняют электрическую цепь от нежелательного влияния преобразователей, ограничивая воздействие всех гармоник сети [4].

Электрическая связь измерительных приборов и источников питания с приборами, установленными на подвижной платформе центрифуги, осуществляется через многоканальное токосъемное устройство. В ходе модернизации стенда штатный ртутный двадцатидвухканальный токосъем был заменен на два высокоскоростных щеточных двенадцатиканальных токосъемных устройства. Ртутный токосъем очень требователен в эксплуатации: требует периодическую замену проводящего вещества (ртути), а также должен эксплуатироваться в хорошо вентилируемых помещениях из-за риска накопления паров ртути, которые могут нанести серьезный вред здоровью персонала. Выбор щеточных токосъемных устройств является наиболее предпочтительным, так как современные модели обладают низким сопротивлением контактов (менее 20 мОм) при низкой динамической нестабильности сопротивления (около 10 мОм) [5].

Согласованность работы всех внутренних систем, обработка массивов данных, а также автоматизация всевозможных процессов и операций, выполняемых при проведении испытаний, обеспечивается специализированным ПО [6]. При выборе среды программирования для подобных задач следует руководствоваться такими критериями оценки продукта, как:

- особенности архитектуры и функциональные возможности (мобильность, масштабируемость, распределенность, сетевые возможности);
- моделирование данных (используемая модель данных, триггеры и хранимые процедуры, средства поиска, предусмотренные типы данных, реализация языка запросов);

- контроль работы системы (контроль использования памяти компьютера, автостройка, режимы отладки);
- производительность (рейтинг TPC, возможности параллельной архитектуры, возможности оптимизирования запросов);
- надежность (восстановление после сбоев, резервное копирование, откат изменений, многоуровневая система защиты);
- стоимость.

Преимуществом по большинству приведенных критериев обладает графическая среда объектно-ориентированного программирования LabVIEW, поэтому в качестве среды разработки был выбран именно этот прикладной программный пакет. LabVIEW поддерживает огромный спектр оборудования различных производителей и имеет в своем составе (либо позволяет добавлять к базовому пакету) многочисленные библиотеки компонентов для:

- подключения внешнего оборудования по наиболее распространенным интерфейсам и протоколам (USB, RS-232, GPIB 488, TCP/IP и пр.);
- удаленного управления процессом испытания;
- генерации и цифровой обработки сигналов;
- применения разнообразных математических методов обработки данных;
- визуализации данных и результатов их обработки (включая трехмерные модели);
- моделирования сложных систем;
- хранения информации в базах данных и генерации отчетов;
- взаимодействия с другими приложениями в рамках COM, DCOM, OLE и пр. [7].

Для стенда были разработаны две единицы программного обеспечения: для встроенного компактного безвентиляторного компьютера, расположенного в стойке управления стендом, и для персонального компьютера, располагающуюся непосредственно на рабочем месте оператора (рис. 2). ПО, установленное на встроенный безвентиляторный компьютер, обеспечивает согласованную работу внутренних систем и приборов стенда, а также осуществляет передачу данных между ними. Взаимодействие ПО с мультиметром и системой сбора данных осуществляется по интерфейсу USB с применением стандартных для приборов такого типа SCPI-команд-запросов; взаимодействие с контроллером серводвигателя осуществляется через USB-COM конвертер с использованием протокола MODBUS ASCII, который позволит осуществлять его параметризацию с высокой скоростью и надежностью. Данное ПО не имеет графического пользовательского интерфейса для взаимодействия с оператором, а коммуникация с ним производится только по широко применяемой технологии проводных локальных сетей Ethernet с использованием сетевого протокола TCP/IP, для чего была разработана собственная система команд-запросов.

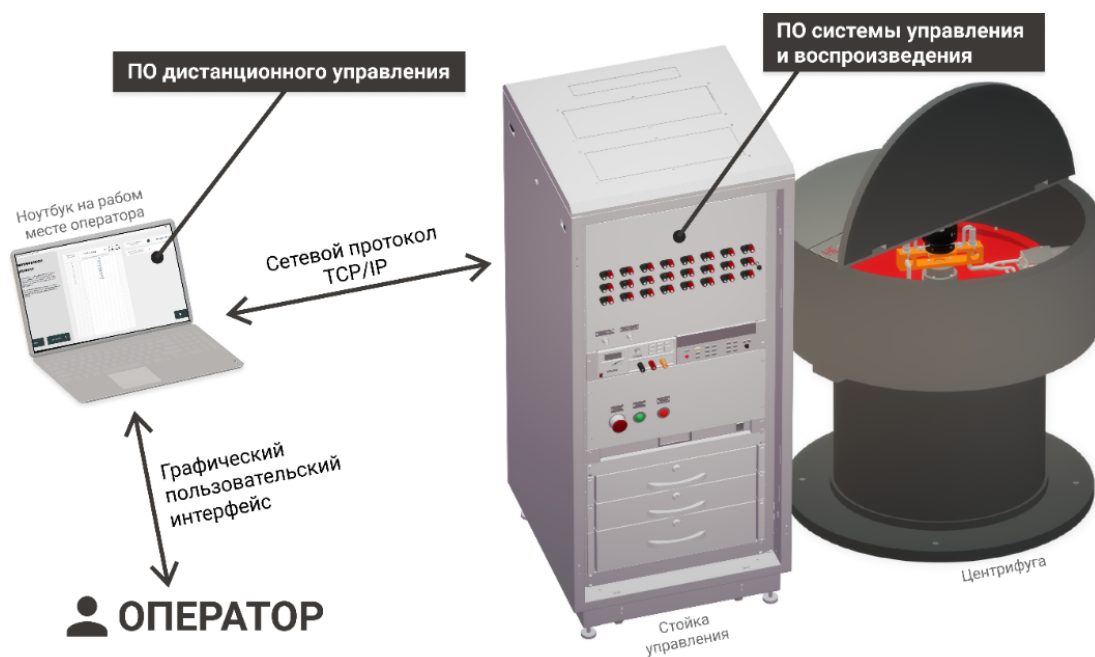


Рис. 2. Взаимодействие компонентов программного обеспечения

При работе со стендом оператор взаимодействует с ПО, установленным на ПК, располагающемся на рабочем месте оператора (рис. 3). Данная программа осуществляет наглядное представление текущей информации о состоянии стенда и испытываемого изделия, позволяет собрать, обобщить и отправить на печать полученную измерительную информацию, а также автоматизировать процессы проведения испытаний по заранее записанным сценариям работы.

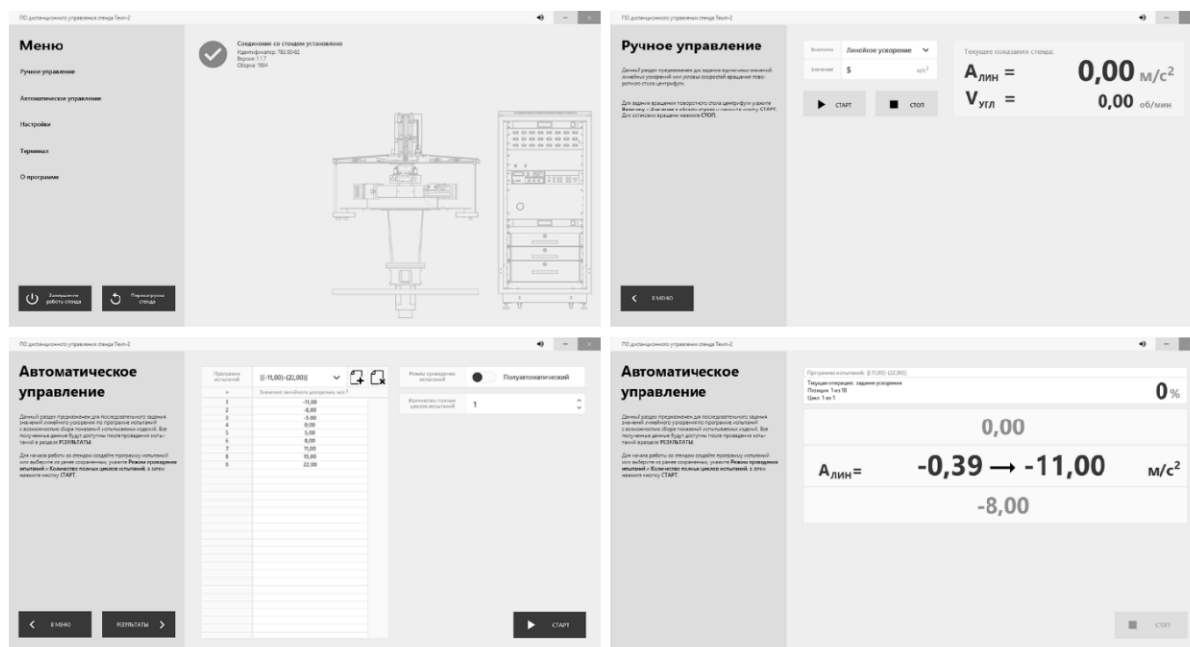


Рис. 3. Графический пользовательский интерфейс некоторых окон программного обеспечения дистанционного управления стенда Темп-2

Технические характеристики стенда до и после модернизации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики стенда Темп-2

Наименование технической характеристики	Значение характеристики	
	до модернизации	после модернизации
Диапазон воспроизведения линейных ускорений, $\text{м/с}^2$	5–1500	5–1800*
Диапазон воспроизведения угловых скоростей, $\text{рад/с}$	3–70	3–70
Дискретизация задания и воспроизведения ускорения, $\text{м/с}^2$	не более 0,05	0,03
Относительная среднеквадратическая погрешность воспроизведения линейных ускорений, %, не более:		
– в диапазоне от 5 до 10 $\text{м/с}^2$	не более 1	не более 1
– в диапазоне от 10 до 100 $\text{м/с}^2$	не более 0,3	не более 0,2
– в диапазоне от 100 до 1500 $\text{м/с}^2$	не более 0,05	не более 0,03
Масса контейнера с испытываемыми изделиями, кг	не более 2	не более 2
Время выхода центрифуги на режим максимального ускорения, с	не более 70	не более 30
Время до полной остановки с режима максимального ускорения, с	не более 60	не более 30
Вывод центрифуги на заданный оператором режим ускорения	вручную	автоматически
Число каналов токосъема	22	24
Нестабильность сопротивления канала токосъема, Ом	не более 0,05	не более 0,05

П р и м е ч а н и е. \*До 1800  $\text{м/с}^2$  в режиме воспроизведения угловой скорости и до 1500  $\text{м/с}^2$  в режиме воспроизведения линейных ускорений.

Согласно приведенным в табл. 1 данным, относительная погрешность почти на всем рабочем диапазоне стенда и временные параметры выхода на режим максимального ускорения после модернизации значительно улучшились за счет применения более совершенной элементной базы. Использование ПО на базе графической среды объектно-ориентированного программирования LabVIEW в процессе испытаний позволило снизить вероятность субъективной погрешности, вносимой оператором, повысить производительность испытаний датчиков в несколько раз, значительно сократить время проведения испытаний. Кроме того, применение унифицированного и блочного принципов построения элементной базы при модернизации позволит в перспективе существенно снизить экономические и трудовые затраты при ремонте и обслуживании стенда.

#### Библиографический список

1. Ярославцева, Д. А. Пример внедрения интеллектуальных информационно-измерительных систем на объектах стартовых комплексов космодрома / Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 24–31.
2. Каталог продукции ООО «ИНТЕХНИКС». – URL: <http://www.intechnics.ru/article14.htm> (дата обращения: 24.06.2018).
3. Каталог продукции АО «Системы реального времени». – URL: [http://www.rts.ua/catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtry-ems\\_388.pdf](http://www.rts.ua/catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtry-ems_388.pdf) (дата обращения: 19.10.2018).
4. Каталог продукции САА. – URL: <https://www.saa.su/Manual/DELTAСетевые%20дрроссели%20Delta/ТехТехничес%20данные%20Трехфазные.pdf> (дата обращения: 19.10.2018).
5. Каталог продукции Senring Electronics Co. Limited. – URL: <http://senring.ru/product/sng038-12> (дата обращения: 24.06.2018).
6. Бастрыгин, К. И. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 18–25.
7. Виноградова, Н. А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW : учеб. пособие / Н. А. Виноградова, Я. И. Листратов, Е. В. Свиридов. – Москва : Изд-во МЭИ, 2015. – С. 240.

#### References

1. Yaroslavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 1 (23), pp. 24–31. [In Russian]
2. *Katalog produktzii OOO «INTEKHNIKS»* [Catalogue of products of LLC "INTEKHNIKS"]. Available at: <http://www.intechnics.ru/article14.htm> (accessed Jun. 24, 2018). [In Russian]
3. *Katalog produktzii AO «Sistemy real'nogo vremeni»* [Catalogue of products of JSC "Real time systems"]. Available at: [http://www.rts.ua/catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtry-ems\\_388.pdf](http://www.rts.ua/catalog/delta/pdf3/radiochastotnye-filtry-ems_388.pdf) (accessed Oct. 19, 2018). [In Russian]
4. *Katalog produktzii SAA* [Catalogue of products of CAA]. Available at: <https://www.saa.su/Manual/DELTASetevye%20drosseli%20Delta/TekhTekhniches%20dannye%20Trekhfaznye.pdf> (accessed Oct. 19, 2018). [In Russian]
5. *Katalog produktzii Senring Electronics Co. Limited* [Catalogue of products of Senring Electronics Co. Limited]. Available at: <http://senring.ru/product/sng038-12> (accessed Jun. 24, 2018). [In Russian]
6. Bastrygin K. I., Trofimov A. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 18–25. [In Russian]
7. Vinogradova N. A., Listratov Ya. I., Sviridov E. V. *Razrabotka prikladnogo programmnogo obespecheniya v srede LabVIEW: ucheb. posobie* [Development of application software in LabVIEW environment : tutorial]. Moscow: Izd-vo MEI, 2015, p. 240. [In Russian]

**Перов Александр Владимирович**

инженер-конструктор,

Научно-исследовательский институт

физических измерений

(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: [perov.alex.v@gmail.com](mailto:perov.alex.v@gmail.com)

**Perov Alexander Vladimirovich**

design engineer,

Scientific-research Institute

of physical measurements

(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Перов, А. В. Модернизация стенда линейных ускорений и угловых скоростей Темп-2 / А. В. Перов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 22–29. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-3.