

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА К ВОЗМУЩАЮЩИМ ФАКТОРАМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ О ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Антипова Т.Н., д-р техн. наук, профессор кафедры управления качеством и стандартизации Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Технологический университет дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Тихонов В.А., аспирант кафедры управления качеством и стандартизации Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Технологический университет дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Рассмотрены статические прочностные испытания, которые подтверждают качество крупногабаритных изделий, что обеспечивает их надежность и безопасность. Статические испытания крупногабаритных изделий реализуются на универсальных стендах, позволяющих изменять их конфигурацию. Разработана концептуальная модель универсального стенда с гидравлической системой автоматизированного управления нагружением. Обоснована одна из главных характеристик испытательного процесса – сила (нагрузка), механически воздействующая на объект испытаний. В результате экспериментальных исследований доказано, что дестабилизирующие возмущающие факторы приводят к отклонениям сил от заданных значений, что может привести к преждевременному разрушению объекта испытаний и снижению достоверности информации о качестве испытываемого изделия. Обоснованы три основных источника возникновения дестабилизирующих возмущающих факторов и статистический метод – робастного параметрического проектирования, обеспечивающий устойчивость работы испытательного стенда.

Ключевые слова: статические испытания, крупногабаритные изделия, возмущающие воздействия, устойчивость, робастное параметрическое проектирование.

Цитирование: Антипова Т.Н., Тихонов В.А. Исследование устойчивости испытательного стенда к возмущающим факторам для повышения качества информации о прочностных показателях крупногабаритных изделий // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 3 (84). С. 98–104.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка крупногабаритных изделий авиационной, ракетно-космической и др. техники и конструкций включает научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Одним из важнейших этапов в опытно-конструкторских работах являются прочностные испытания изделий (рис. 1), которые проводятся на универсальных переналаживаемых стендах. Испытания подразделяются по характеру воздействий, которые формируются в зависимости от условий и особенностей эксплуатации изделия в определенных расчетных случаях. Расчетный случай – это

наиболее опасная с точки зрения разрушения конструкции комбинация нагрузок, реализующаяся в период активной эксплуатации изделия. К таким испытаниям можно отнести механические, климатические, электромагнитные и т.п.

В статье рассматриваются статические механические испытания, в которых оказываются воздействия на объект испытаний в виде сжатия, растяжения, сдвига, кручения и изгиба. На стадиях опытно-конструкторской работы статическим испытаниям подвергаются в основном макеты крупногабаритных изделий, представляющие собой упрощенную физическую модель и в большинстве случаев повторяющие ге-

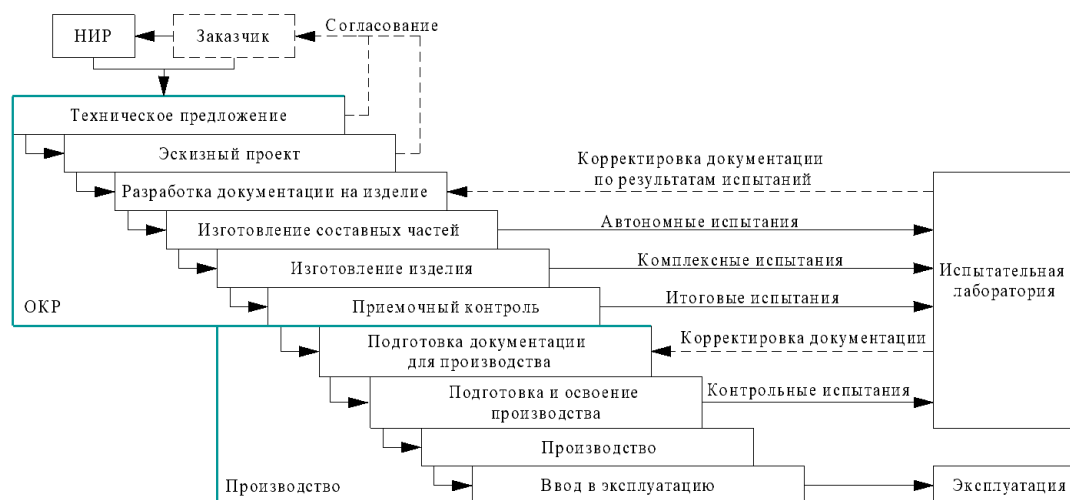


Рис. 1. Схема разработки и производства крупногабаритных изделий

ометрические формы и характеристики силовых элементов конструкции реального изделия или его составных частей [1].

При статических прочностных испытаниях подтверждаются несущая способность и запас прочности конструкции изделия, определяются предельные режимы эксплуатации и работоспособность изделия при имитации нештатных ситуаций, исследуются напряженно-деформированное состояние и перемещения силовых элементов конструкции, проверяются методы расчета прочности конструкции и правильность конструкторских и технологических решений. Благодаря данным испытаниям подтверждается качество изделия, обеспечивающее его надежность и безопасность [2].

На стадии опытно-конструкторской работы проводятся статические испытания с целью проверки прочности изделия и типа взаимодействия между составными частями изделия (автономные и/или комплексные испытания). По результатам испытаний либо изделие допускается к серийному производству, либо выполняется корректировка технической документации, после которой проводятся доводочные испытания. На доводочных испытаниях проводится оценка влияния вносимых в конструкцию изделия изменений для достижения заданных показателей качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Статические испытания крупногабаритных изделий реализуются на универсальных стендах. Отличительной особенностью универсальных стендов является изменение конфигурации экспериментальных установок для различных расчетных случаев при натурных испытаниях макетов. В состав экспериментальной установки входят унифицированные элементы стенда (силовой пол и стены, силовые колонны, ложементы, силовые кольца и т.п.), обеспечивающие реализацию заданных силовых факторов нагруже-

ния объекта испытаний и учитывающие габаритные характеристики макета. Состав и характеристики используемых элементов (средств) могут варьироваться в зависимости от уровня и условий механического силового воздействия на объект испытаний [1, 3]. На рис. 2 представлена модель универсального стенда с гидравлической системой автоматизированного управления нагружением для проведения испытаний на прочность.

Принцип работы модели универсального стенда состоит в следующем. Автоматизированная система управления нагружением подает сигнал в управляющий орган – сервоклапан (СК), который обеспечивает необходимое давление в гидроцилиндре (ГЦ) через маслопровод. При повышении давления в рабочей полости гидроцилиндра пропорционально увеличивается усилие, которое через силопередающую оснастку механически воздействует на объект испытаний. Датчики силы (ДС), преобразователь перемещения (ПП) и датчик давления (ДД) фиксируют изменения, воз-

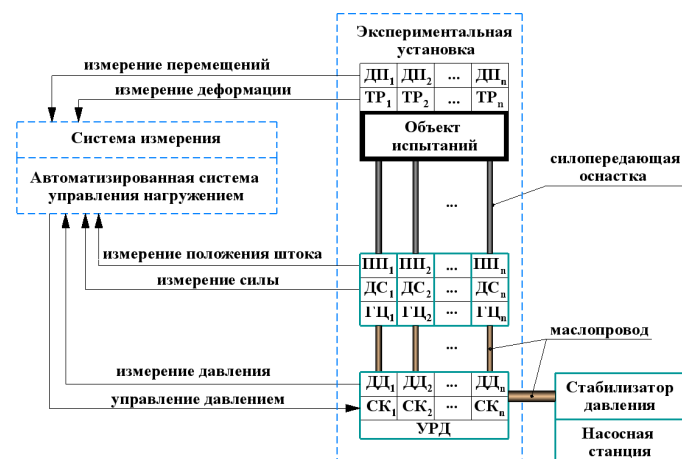


Рис. 2. Модель универсального стенда с гидравлической системой автоматизированного управления нагружением

никающие при управлении гидроцилиндром, и передают сигнал по обратной связи в автоматизированную систему управления нагружением. Параллельно измерительная система записывает значения с датчиков перемещений (ДП) и тензорезисторов (ТР), которые установлены на испытательном макете. В качестве примера на рис. 3 представлена схема силовой цепочки для точечного приложения растягивающей нагрузки. Силовая цепочка включает элементы силопередающей оснастки, гидроцилиндр двухстороннего действия и датчик силы для обратной связи.

Статические испытания включают следующие два основных метода механического приложения нагрузок:

1. **Поэтапное нагружение** – последовательное поэтапное нагружение объекта испытаний силами с выдержкой на каждом этапе (уровне) нагружения. На каждом

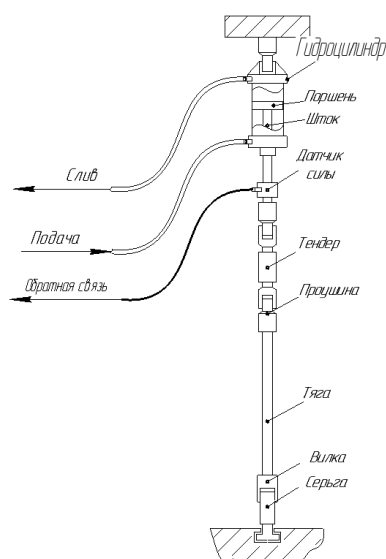


Рис. 3. Схема силовой цепочки

этапе нагрузки увеличиваются до заданных расчетных значений или до разрушения.

2. **Циклическое нагружение** – переменное циклическое нагружение объекта испытаний с заданным количеством циклов, частотой нагружения и спектром сил для определения усталостной прочности (ресурсная прочность). Циклы нагружения разделяются на симметричные и асимметричные, которые, в свою очередь, подразделяются на знакопеременные, знакопостоянные и пульсирующие.

Одной из главных характеристик испытательного процесса является сила (нагрузка), механически воздействующая на объект испытаний. Реализация силы выполняется при помощи силовозбудителя (гидроцилиндра). Кроме того, используется такое понятие, как силовой фактор, объединяющий в себе систему нагрузок, обеспечивающих осевую и поперечную силы, а также изгибающий и крутящий моменты. При реализации данных сил возникают недетерминированные возмущения, которые выражаются в виде отклонений значений нагрузок от заданных. Недетерминированные отклонения – это отклонения сил, которые возникают в разные моменты времени и имеют различные проявления от заданных значений в процессе испытаний. По оценке авторов [4, 5], причинами возникновения отклонений являются конструкционные особенности экспериментальных установок и испытательных макетов, что подтверждается при проведении испытаний. На рис. 4 представлен процесс поэтапного нагружения силами, в которых зафиксированы возмущения в виде кратковременных отклонений от заданного уровня нагрузок.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований двух различных макетов крупногабаритных изделий на статическую прочность. На графиках представлены зависимости силы от времени в точках приложения нагрузок, на которых зафиксированы возмущения между этапами при нагружении изделий № 1 и № 2. При анализе

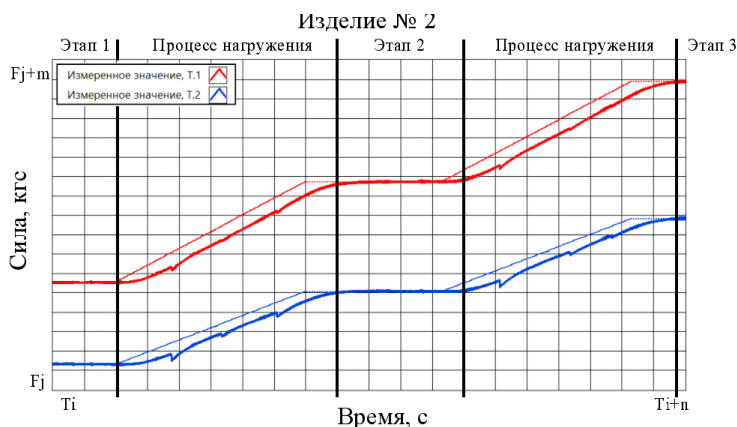
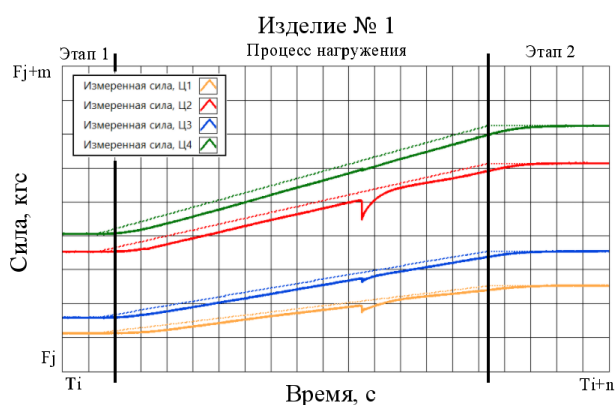


Рис. 4. Результаты реализации сил при поэтапном нагружении

полученных данных от установленных тензорезисторов на изделиях № 1 и № 2 зафиксированные возмущения (по оценке экспертов) проявили себя в незначительной степени, в виде слабых колебаний, тем самым существенно не отразившись на качестве получаемой информации об изделиях. При реализации метода поэтапного нагружения изменение сил происходит медленно, что гарантирует плавность и стабильность механического воздействия на макет, тем самым обеспечивается достоверная информация о показателях качества изделия.

При проведении экспериментальных исследований в процессе циклического нагружения были зафиксированы отклонения сил и режима нагружения от заданных значений, которые оценены экспертами как существенные, и могут привести к возможному преждевременному разрушению испытываемого объекта. Пример процесса циклического нагружения изделий № 3 и № 4 с зафиксированными отклонениями сил представлен на рис. 5. Реакция испытываемых изделий № 3 и № 4 на проявленные отклонения по силе в процессе испытаний представлена на рис. 6.

На рис. 5 представлены зависимости системы сил от времени. Для циклического нагружения задаются два основных параметра – это сила, в определенных границах, и режим, включающий форму циклического нагружения и его частоту.

На рис. 6 представлены зависимости деформации, возникающей в испытуемом изделии в процессе нагружения, от времени. Данные о деформации поступают в измерительную систему от установленных на макете тензорезисторов, которые фиксируют изменения в конструкции изделия в процессе нагружений. Недетерминированные отклонения от заданных параметров считаются недопустимыми, т.к. их влияние может привести к непредсказуемым результатам: преждевременному разрушению объекта испытаний и получению недостоверной информации о качестве изделия, в частности о его прочностных показателях качества. При анализе процесса статических испытаний предлагается выделить три основных источника появления недетерминированных возмущающих факторов:

1. Особенности конструкции экспериментальной установки, в том числе: индивидуальные характеристики гидроцилиндров, например шероховатость или износ внутренней полости гидроцилиндра, длина подведенного маслопровода к гидроцилиндру от сервоклапана, состав и характеристики силопередающей оснастки.
2. Характеристики настраиваемых параметров самой автоматизированной системы управления нагружением, включающей в себя программно-аппаратный комплекс, а также человеческий фактор – действия, совершаемые оператором.

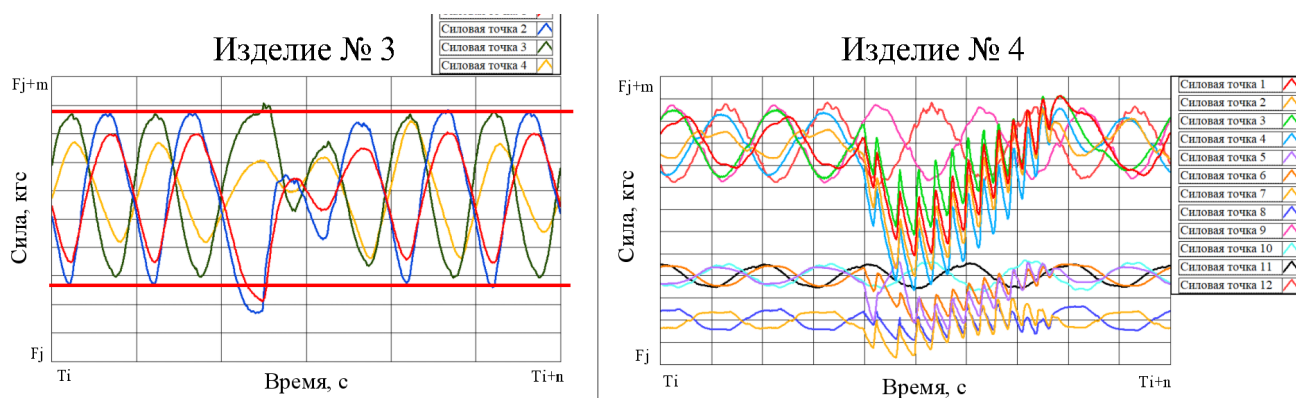


Рис. 5. Результаты реализации сил при циклическом нагружении

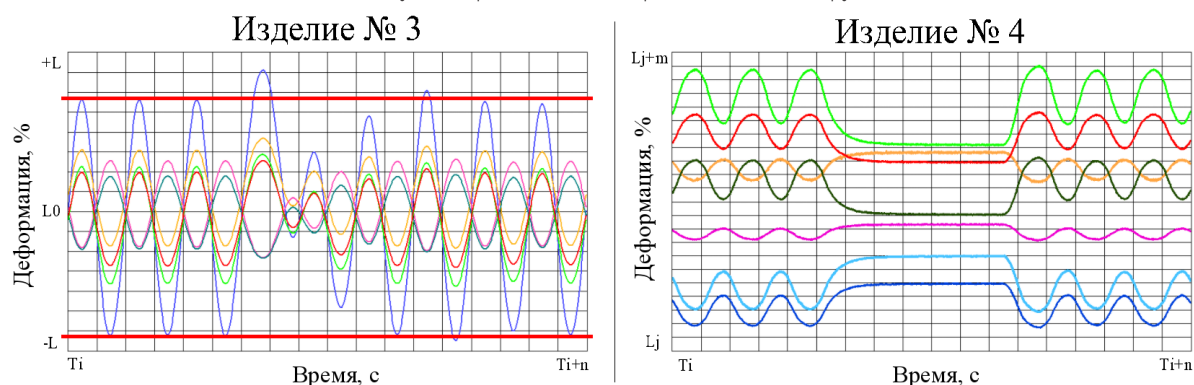


Рис. 6. Измеренная деформация при циклическом нагружении

- Свойства объекта испытаний, который из-за своих физических и конструктивных особенностей реагирует на оказываемое механическое воздействие, формируя собственные возмущения при реализации сил. С учетом особенностей испытуемого объекта проводятся подготовка элементов экспериментальной установки и корректировка работы автоматизированной системы.

Испытания на стенде следует рассматривать как динамический процесс с входными-выходными параметрами [6]. Исходные, или входные, параметры испытательного процесса определяются особенностями конструкции и применяемыми средствами в экспериментальной установке (v_{ij}) и задающимися управляющими параметрами (u_i). Выходными параметрами являются прочностные показатели качества испытываемого изделия (y_i). Параметрическая схема испытательного процесса представлена на рис. 7. Процесс нагружения считается идеальным, если система реагирует только на управляющий сигнал оператора и проявляет устойчивость к воздействию возмущающих факторов. Соответствие качества изделия требованиям заказчика оценивается по двум вариантам:

- показатель качества, полученный при статических испытаниях, должен быть равен показателю качества, заданному заказчиком:

$$y_i^{исп} = y_i^{зак}; \quad (1)$$

- для выявления нагрузки, приводящей к разрушению объекта испытания, используется следующее неравенство:

$$y_i^{исп} \geq y_i^{зак}. \quad (2)$$

Пояснение к рис.7: $M(\cdot)$ – функция испытательного процесса; $g(\cdot)$ – функция ограничений, установленных в процессе испытаний; $V = \{v_{1,j}, v_{2,j}, \dots, v_{i,j}\}$ – характеристики используемых средств; $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$ – параметры управления; $N = \{n_1, n_2, \dots, n_i\}$ – возмущающие факторы; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i\}$ – показатели качества изде-

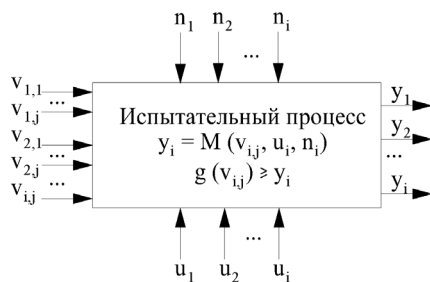


Рис. 7. Параметрическая схема испытательного процесса

лия. Таким образом, математическую модель, описывающую процесс формирования показателей качества изделий при статических испытаниях, можно представить

в виде функции характеристик используемых средств, параметров управления и возмущающих факторов:

$$Y = M(V, U, N). \quad (3)$$

В соответствии со схемой испытательного процесса, представленной на рис. 7, можно сказать, что испытания зачастую проводятся в условиях параметрической неопределенности, когда некоторые параметры могут изменяться в установленных пределах функционирования стенда. Оператору известны общие характеристики стенда – его предельные возможности и допустимые отклонения (погрешности) по силе, на основе которых и формируется испытательный процесс. Однако не представляется возможным учесть все проявления дестабилизирующих возмущающих факторов в экспериментальной установке, возникающих из-за взаимодействия элементов стенда различной физико-химической природы, что затрудняет получение адекватной математической модели.

На рис. 8 представлена структура показателей качества крупногабаритных изделий при статических прочностных испытаниях.

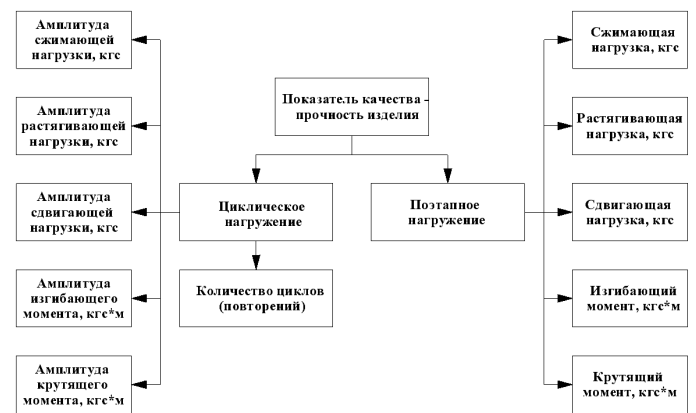


Рис. 8. Структура показателей качества крупногабаритных изделий

Оценка качества разрабатываемого изделия зависит от достоверности полученной информации при испытаниях. Для повышения достоверности информации необходимо минимизировать дестабилизирующие воздействия, которые возникают в процессе нагружения изделия на стенде. Для этого предлагается применить универсальный статистический метод – робастное параметрическое проектирование, цель которого состоит в предотвращении появления проблем с качеством, возникающих в процессе эксплуатации систем [7].

Оценкой робастности (устойчивости) испытательного стенда к возмущающим факторам является отношение сигнала к шуму. Для оценки необходима только информация о функции (миссии) системы (стенда) и уровнях возмущающих воздействий. При этом подробная техниче-

ская информация об исследуемой системе не требуется. Главная характеристика робастности – отношение сигнала к шуму – вычисляется по одному алгоритму, пока система сохраняет прежнюю функцию, даже если изменяется ее техническая реализация. Поскольку отношение позволяет точно охарактеризовать робастность системы, можно оценивать и сравнивать робастность систем, в которых реализованы разные технические решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из наиболее важных аспектов управления качеством крупногабаритных изделий является получение информации об их прочностных характеристиках или показателях качества. Для получения информации о показателях качества необходимо провести испытания на универсальных переналаживаемых испытательных стендах. Однако опыт

проведения испытаний на стендах показал, что в результате воздействия ряда дестабилизирующих факторов возникают отклонения нагружающих воздействий от заданных значений. Это приводит к снижению качества получаемой информации об объектах испытаний. В результате полученной недостоверной информации могут быть приняты ошибочные решения о допуске некачественного изделия к эксплуатации или отбраковке качественного изделия.

Достоверная информация, полученная при испытаниях, позволяет максимально приблизить изделие к желаемым требованиям заказчика. Применение робастного параметрического проектирования позволит обеспечить стабилизацию процесса проведения испытаний и минимизировать финансовые издержки не только на стадии испытаний, но и на стадии проектирования.

Список использованных источников и литературы

1. Ткаченко С.И., Ткаченко О.А., Самсонов В.Н. Методы экспериментальной отработки прочности конструкций летательных аппаратов: учеб. пособие // Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Самарский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. С. П. Королева». – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 255 с.
2. Голиков А. И., Грибанов В. Ф., Рембеза А. И. [и др.]. Методы отработки научных и народно-хозяйственных ракетно-космических комплексов. – М.: Машиностроение, 1995. – 349 с.
3. Балакирев Ю.Г., Бужинский В.А., Буслов Е.П. [и др.] Методологические основы научных исследований при обосновании направлений космической деятельности, облика перспективных космических комплексов и систем их научно-технического сопровождения. Т. 5. Методология отработки прочности и динамики ракетносителей и космических аппаратов. – М.: Изд.-торг. корпорация «Дашков и К», 2016. – 376 с.
4. Белоусов А.И., Присекин В.Л., Расторгуев Г.И., Федотова О.Р. Исследование влияния динамических свойств летательного аппарата на устойчивость канала нагружения // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16, № 3. С. 20.
5. Васюков Е.В., Плотникова Ю.Д., Тимошин А.С. и др. Метод компенсации возмущающих сил в гидравлической системе испытательного стенда при реализации знакопеременного циклического нагружения // Космонавтика и ракетостроение. 2024. № 1 (134). С. 76–81.
6. Антипова Т.Н., Тихонов В.А. Применение робастного параметрического проектирования для автоматизированной системы управления прочностными испытаниями // Информационно-технологический вестник. 2023. № 1(35). С. 92–100.
7. ГОСТ 16336–2020. Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). – ЗАО «НИЦ КД», 2020. – 70 с.

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE TEST BENCH TO DISTURBING FACTORS TO IMPROVE THE QUALITY OF INFORMATION ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF LARGE-SIZED PRODUCTS

Antipova T.N., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Quality Management and Standardization of the State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University of Twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Tikhonov V.A., postgraduate student at the Department of Quality Management and Standardization of the State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University of Twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Static strength tests are considered, which confirm the quality of large-sized products, which ensures their reliability and safety. Static tests of large-sized products are carried out on universal stands that allow changing their configuration. A conceptual model of a universal stand with a hydraulic automated loading control system has been developed. One of the main characteristics of the test process is proved – the force (load) mechanically acting on the test object. As a result of experimental studies, it has been proven that destabilizing disturbing factors lead to deviations of forces from the set values, which can lead to premature destruction of the test object and reduce the reliability of information about the quality of the tested product. The three main sources of destabilizing disturbing factors and the statistical method of robust parametric design, which ensures the stability of the test bench operation, are substantiated.

Keywords: static tests, large-size products, disturbing effects, stability, robust parametric design.

For citation: Antipova T.N., Tikhonov V.A. Investigation of the stability of the test bench to disturbing factors to improve the quality of information on the strength characteristics of large-sized products. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025; 3(84): 98–104. (In Russ.).

References

1. Tkachenko S.I., Tkachenko O.A., Samsonov V.N. Metody eksperimental'noy obrabotki prochnosti konstruktsiy letatel'nykh apparatov: ucheb. posobiye [Methods of experimental testing of structural strength of aircraft: textbook. the manual] // Federal Agency for Education, State Educational institution of Higher Education. Prof. Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Koroleva». Samara: Publishing House of SSAU, 2007, 255 p.
2. Golikov A.I., Gribov V.F., Rembeza A.I. i dr. Metody obrabotki nauchnykh i narodnokhozyaystvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov [Methods of development of scientific and national economic rocket and space complexes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1995, 349 p.
3. Balakirev Y.G., Buzhinskiy V.A., Buslov Ye.P., et al. Metodologicheskiye osnovy nauchnykh issledovaniy pri obosnovanii napravleniy kosmicheskoy deyatel'nosti, oblika perspektivnykh kosmicheskikh kompleksov i sistem ikh nauchno-tekhnikeskogo soprovozhdeniya. Vol. 5. Metodologiya obrabotki prochnosti i dinamiki raketonositeley i kosmicheskikh apparatov [Methodological foundations of scientific research in substantiating the directions of space activities, the appearance of promising space complexes and their scientific and technical support systems. Vol. 5. Methodology for testing the strength and dynamics of launch vehicles and spacecraft]. Moscow: Publishing House of the Trading Corporation Dashkov & K, 2016, 376 p.
4. Belousov A.I., Priekin V.L., Rastorguyev G.I., Fedotova O.R. Issledovaniye vliyaniya dinamicheskikh svoystv letatel'nogo apparata na ustoychivost' kanala nagruzheniya [Investigation of the effect of dynamic properties of an aircraft on the stability of the loading channel]. Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2009. Vol. 16, no. 3. P. 20.
5. Vasyukov Ye.V., Plotnikova Yu.D., Timoshin A.S. i dr. Metod kompensatsii vozmushchayushchikh sil v gidravlicheskoj sisteme ispytatel'nogo stenda pri realizatsii znakoperemennogo tsiklicheskogo nagruzheniya [Method of compensation of disturbing forces in the hydraulic system of the test bench during the implementation of alternating cyclic loading]. Cosmonautics and rocket Engineering. 2024. No. 1 (134), pp. 76–81.
6. Antipova T.N., Tikhonov V.A. Primeneniye robustnogo parametricheskogo proyektirovaniya dlya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya prochnostnyimi ispytaniyami [Application of robust parametric design for an automated strength test control system]. Information Technology Bulletin. 2023. No. 1(35), pp. 92–100.
7. GOST 16336–2020. Statisticheskiye metody. Primeneniye k novym tekhnologiyam i protsessu razrabotki produktsii. Robustnoye parametricheskoye proyektirovaniye (RPD) [Statistical methods. Application to new technologies and product development process. Robust Parametric design (RPD)]. – CJSC SIC CD. 2020. 70 p.