

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПРАКТИКА ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

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

Рассмотрена модель универсального переналаживаемого стенда, на котором проводятся статические прочностные испытания. При реализации циклических нагрузок на стенде возникают дестабилизирующие возмущения, которые выражаются в виде отклонений сил от заданных значений, что приводит к снижению достоверности получаемой информации об объекте испытаний при оценке качества испытываемого изделия. Представлен унифицированный алгоритм принятия решений по повышению устойчивости работы стенда. В соответствии с представленным алгоритмом проведен эксперимент со знакопостоянным циклическим нагружением для оценки устойчивости испытательного стенда. Предложен критерий оценки устойчивости испытательного стенда. Обоснованы наиболее значимые факторы, применяемые при реализации циклического нагружения, и даны рекомендации по повышению устойчивости работы испытательного стенда.

Ключевые слова: испытательный стенд, статические испытания, дестабилизирующие факторы, критерий устойчивости, робастное параметрическое проектирование.

Цитирование: Антипова Т.Н., Тихонов В.А. Теоретические положения и практика по повышению устойчивости статических испытаний крупногабаритных изделий для оценки их прочностных показателей качества // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 4(85). С. 25–30.

ВВЕДЕНИЕ

Испытания крупногабаритных изделий на статическую прочность проводятся на универсальных переналаживаемых стендах, обеспечивающих изменение конфигурации экспериментальных установок для различных испытательных случаев. Экспериментальные установки предлагается рассматривать как модульные системы, которые состоят из объектов испытаний (макетов), силовозбуждающих элементов (сервоклапаны, гидроцилиндры и т.п.), реализующих нагрузку, и средств оснастки. При планировании экспериментов разрабатываются экспериментальные установки, учитывающие геометрические характеристики макетов изделий и необходимость реализации заданных нагрузок в виде сжатия, растяжения, сдвига, кручения и изгиба. На рис. 1 представлена модель универсального переналаживаемого стенда с гидравлической системой автоматизированного управления нагружением для проведения статических испытаний на прочность [1].

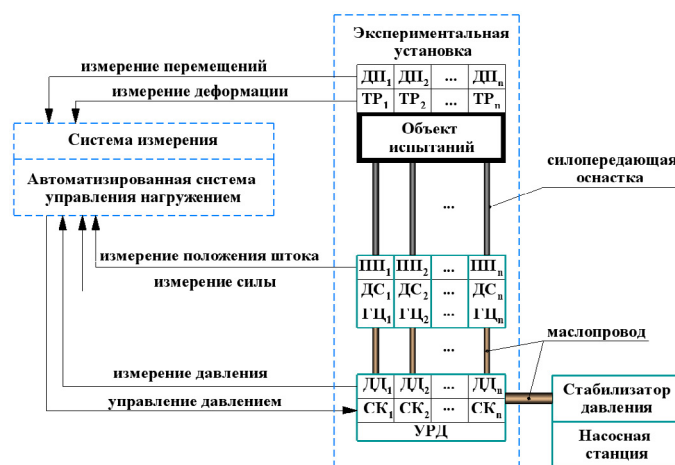


Рис. 1. Модель универсального стенда с гидравлической системой автоматизированного управления нагружением:
ДП – датчик перемещения, ТР – тензорезистор, ПП – датчик измерения положения штока, ДС – датчик силы, ГЦ – гидроцилиндр, УРД – устройства редуцирования давления, ДД – датчик давления, СК – сервоклапан

Испытательный стенд, модель которого представлена на рис. 1, позволяет осуществлять механическое приложение нагрузок в виде поэтапного и циклического нагружения. При поэтапном нагружении объекты испытаний нагружаются последовательно (поэтапно) до заданных расчетных значений или до разрушения. При циклическом нагружении реализуется амплитуда нагрузок с заданным числом циклов и частотой нагружения для определения усталостной прочности объекта испытаний.

Опыт работы на стенде показал, что при реализации циклических нагрузок (сил) возникают дестабилизирующие возмущения, которые выражаются в виде отклонений нагрузок от заданных значений, что снижает достоверность получаемой информации об объекте при оценке качества испытуемого изделия. Дестабилизирующие возмущения возникают в разные моменты времени и имеют различные проявления отклонений сил от заданных значений в процессе испытаний при циклическом нагружении. Причинами возникновения отклонений являются конструкционные особенности экспериментальных установок и испытательных макетов, а также параметры настройки управления автоматизированной системой (частота нагружения, амплитуда нагружения и т.п.), что подтверждается при проведении испытаний в работах [1, 2, 3].

Оценка качества 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 адаптировать и применить один из универсальных методов робастного параметрического проектирования с целью повышения устойчивости работы испытательного стенда, чтобы гарантировать достоверную оценку соответствия качества изделия требованиям заказчика.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Робастное параметрическое проектирование позволяет получить оценку испытательного процесса на основе критерия робастности. Критерий робастности позволяет оценить устойчивость работы системы при воздействии дестабилизирующих факторов и вычисляется как отношение сигнала к шуму. Где сигнал – это значения управляемых воздействий в системе управления, а шум – это значения факторов, которые приводят к дестабилизации работы системы, например, в процессе испытаний на стенде – это отклонения сил от заданных значений. Робастность системы связана с многочисленными условиями ее эксплуатации, поэтому робастность невозможно оценить простым измерением. С целью выявления дестабилизирующих факторов при оценивании устойчивости используют следующие подходы¹:

1. В условиях, когда известна идеальная функция системы.
2. В условиях, когда известны только факторы шума, дестабилизирующие работу системы.

Исследование работы испытательного стенда проведено в условиях, когда конфигурация экспериментальной установки не изменялась, а управляющие параметры в автоматизированной системе управления (частота нагружения, количество циклов, амплитуда нагрузок и уровень предварительного нагружения) приняты как факторы шума. Выходной характеристикой (откликом) в испытательном стенде принято количество отклонившихся циклов при циклическом нагружении. В таком случае алгоритм принятия решений по повышению устойчивости работы стенда выполняется по универсальной схеме, представленной на рис. 2.

Описание унифицированного алгоритма принятия решений:

- 1) обоснование критерия оценки устойчивости;
- 2) выбор метода измерений выходной характеристики. Для испытательных стендов с механическим приложением силы измерение выполняется косвенно от датчика силы (ДС), который обеспечивает данными по определению силы в силовой цепочке, и преобразователя перемещений (ПП), который обеспечивает данными по изменению положения штока в гидроцилиндре;
- 3) определение факторов шума и разработка стратегии управления ими;
- 4) планирование, подготовка и проведение эксперимента;
- 5) вычисление отношения сигнала к шуму, построение диаграммы эффектов и выбор оптимальной комбинации факторов, обеспечивающих наибольший показатель значения отношения сигнала к шуму;
- 6) проведение проверочного эксперимента;
- 7) оценка результатов;
- 8) в случае, когда при проверочном эксперименте подтверждаются результаты по оптимальным параметрам, алгоритм завершается;
- 9) в случае, когда при проверочном эксперименте не подтверждаются оптимальные параметры, проводится проверка вычислений отношения сигнала к шуму и проводится проверочный эксперимент;
- 10) если при проверочном эксперименте получены аналогичные результаты, то следует начать с п. 1 и пересмотреть всю цепочку алгоритма, если результаты получили расхождение с предыдущим экспериментом и не позволили подтвердить оптимальность параметров, следует вернуться к п. 3 и начать определение других шумовых факторов и их уровней.

В соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 2, для оценки устойчивости испытательного стенда при статических испытаниях проведен эксперимент со знакопостоянным циклическим нагружением на примере одного гидроцилиндра, замкнутого в жесткую силовую цепочку

¹ ГОСТ 16336–2020. Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). – М.: Стандартинформ, 2020. (Введ. в действие: 2021-06-01).

(рис. 3). Циклическое нагружение реализуется по гармоническому синусоидальному закону (рис. 4). Цель эксперимента – обоснование наиболее значимых факторов, которые влияют на устойчивость работы стэнда.

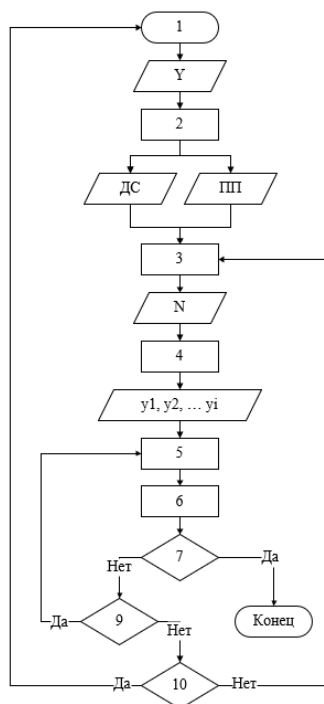


Рис. 2. Унифицированный алгоритм принятия решений по повышению устойчивости работы стэнда

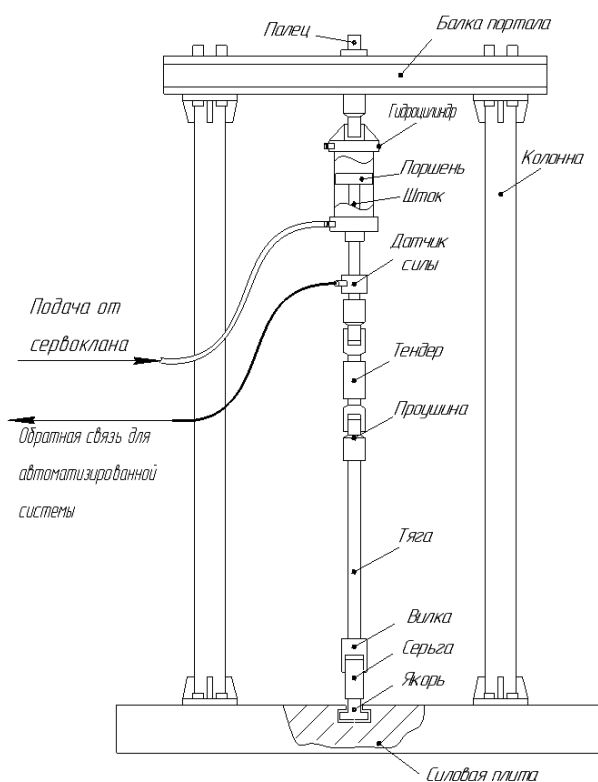


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

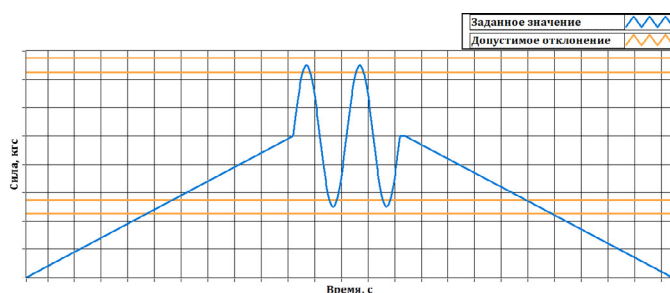


Рис. 4. Форма циклического нагружения

Рассматриваемый силовой гидроцилиндр двухстороннего действия номиналом 20 тс, представленный на рис. 3, имеет односторонний шток с жестко соединенным поршнем и две рабочие полости, которые заполняются рабочей жидкостью для нагнетания давления. При повышении давления в штоковой полости гидроцилиндр начинает растягивать силовую цепочку, в поршневой полости – сжимать. Рассматриваемая схема предусматривает подачу только в одну полость – штоковую, через которую и осуществляется регулирование усилий, управляемых сервоклапаном. Силовые гидроцилиндры имеют широкую номенклатуру, отличаясь конструктивом и номиналом. Рассматриваемый тип гидроцилиндра является самым распространенным для множества испытательно-производственных направлений из-за своей дешевизны и простоты в обслуживании.

Сервоклапан служит для подачи и регулирования давления в рабочей полости гидроцилиндра. На схеме, представленной на рис. 3, сервоклапан условно не представлен. Сервоклапан подключается к гидроцилиндру через маслопроводы. Расход, а таким образом и скорость смещения поршня в гидроцилиндре регулируются путем изменения поперечного сечения протока рабочей жидкости в сервоклапане. Это изменение осуществляется линейным двигателем, который напрямую управляет золотником клапана в зависимости от величины поданного на сервоклапан тока от автоматизированной системы управления нагружением.

По условию эксперимента, если в одном рассматриваемом цикле экстремумы амплитуд не находятся в пределах установленных границ, то данный цикл считается отклонившимся. Таким образом, откликом в рассматриваемой системе является количество отклонившихся циклов. Для оценки устойчивости работы стэнда предлагается использовать критерий оценки устойчивости, представляющий собой относительную величину отклонившихся циклов к общему количеству реализованных циклов и вычисляющийся по формуле

$$y = \frac{C_{откл}^n}{C_{зад}}, \quad (1)$$

где $C_{откл}^n$ – количество отклонившихся циклов; $C_{зад}$ – количество заданных циклов.

В робастном параметрическом проектировании, если отклик не принимает отрицательных значений, а его идеальное значение равно нулю, то такая система называется «чем меньше, тем лучше» и относится к статической форме (статическая характеристика). В таком случае отношение сигнала к шуму вычисляется по формуле [4]:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{\sum y_i^2}{n} \right), \quad (2)$$

где показатель y_i^2 – оценка циклического нагружения, рассчитанная по (1).

Перед проведением эксперимента устанавливаются наименьшие интервалы границ допустимых отклонений нагрузок, величина которых не ниже класса точности используемого датчика силы и определяется оператором (рис. 4). Выход на циклический режим нагружения выполняется оператором. Завершение циклического режима автоматизированной системой выполняется автоматически после достижения заданного количества циклов нагружения. Результат циклического нагружения одной реализации представлен на рис. 5.

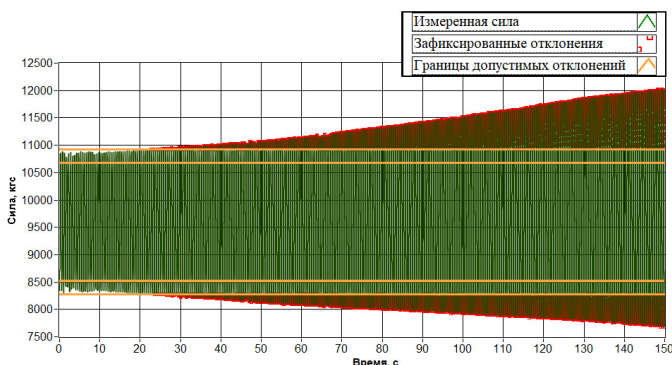


Рис. 5. Результаты одного эксперимента с различным уровнем факторов

На рис. 5 представлен результат экспериментальных исследований, реализующих циклическое нагружение силовой цепочки по схеме, представленной на рис. 2, в котором зафиксированы отклонения нагрузок (сил) от заданных значений.

При проведении эксперимента рассмотрено четыре фактора. При планировании эксперимента применена ортогональная матрица L_9 , в которой предусмотрено 9 реализаций циклического нагружения при различных комбинациях уровней четырех факторов [5]. Каждая реализация выполняется по два раза для получения независимой оценки ошибок в эксперименте, вызванных действием оператора или другими случайными причинами. Результаты эксперимента представлены на диаграмме эффектов устойчивости испытательного процесса (рис. 6). Рассматриваемые факторы являются управляемыми характеристиками при реализации циклического нагружения с использованием автоматизированной системы:

Фактор 1. Частота нагружения – отвечает за скорость выполнения циклического нагружения. Фактор 1 включает три уровня: $H_{z1} = 1$ Гц, $H_{z2} = 1,5$ Гц, $H_{z3} = 2$ Гц.

Фактор 2. Количество циклов нагружения совместно с частотой нагружения определяет время работы стенда. Фактор 2 включает три уровня: $I_1 = 300$ циклов, $I_2 = 600$ циклов, $I_3 = 900$ циклов.

Фактор 3. Амплитуда нагружения – уровень силового воздействия, который необходимо обеспечить при циклическом нагружении. Фактор 3 включает три уровня: $F_1 = 0,4$ тс, $F_2 = 0,8$ тс, $F_3 = 1,2$ тс.

Фактор 4. Уровень предварительного натяжения – начальный уровень приложения силы для натяжения силовой цепочки перед началом циклического нагружения. Фактор 4 включает три уровня: $F_{o1} = 1,6$ тс, $F_{o2} = 9,6$ тс, $F_{o3} = 17,6$ тс.

Диаграмма эффектов, представленная на рис. 6, дает четкое представление о том, какой уровень для каждого управляемого фактора шума является оптимальным. Для робастного параметрического проектирования оптимальным уровнем является тот, в котором отношение сигнала к шуму (2) является максимальным.

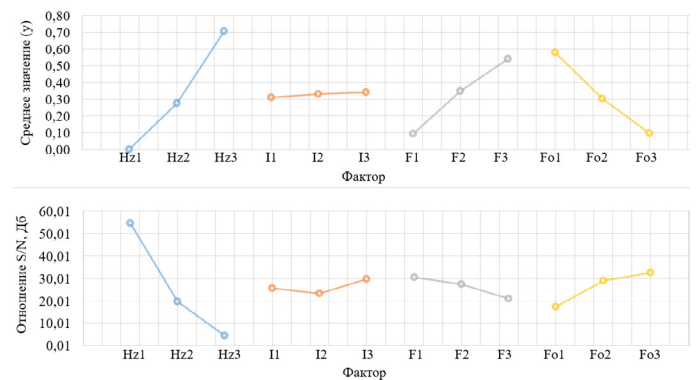


Рис. 6. Диаграмма эффектов устойчивости испытательного процесса (S/N – отношение сигнала к шуму)

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлена следующая комбинация уровней управляемых факторов шума, при которых обеспечивается устойчивость работы испытательного стенда при циклическом нагружении: частота нагружения – 1 Гц, количество циклов нагружения – 900, амплитуда нагружения – 0,4 тс, уровень предварительного натяжения – 17,6 тс. При проведении проверочного эксперимента были подтверждены оптимальные значения параметров факторов, обеспечивающих устойчивость стенда при циклическом нагружении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований обоснованы наиболее значимые факторы, применяемые при реализации

циклического нагружения, и даны рекомендации по повышению устойчивости работы стенда в собранной экспериментальной установке по схеме, представленной на рис. 2.

Обоснован критерий устойчивости, который позволяет оценить степень устойчивости универсального переналаживаемого

стенда к воздействиям дестабилизирующих факторов, таких как частота нагружения, количество циклов, амплитуда нагрузок и уровень предварительного нагружения. Повышение устойчивости испытательного стенда обеспечит получение качественной информации об испытываемых крупногабаритных объектах при статических испытаниях.

Список использованных источников и литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Варжапетян А. Г. Современные инструменты менеджмента качества: робастное проектирование // Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Часть 1. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2008. – 172 с.
5. Леон Р., Шумейкер А., Тагути Г. и др. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути // Пер с англ. – М: «СЕЙФИ», 2002. – 384 с.

THEORETICAL PROVISIONS AND PRACTICE ON INCREASING THE STABILITY OF STATIC TESTS OF LARGE-SIZED PRODUCTS TO ASSESS THEIR STRENGTH QUALITY INDICATORS

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

The model of a universal changeable stand on which static strength tests are carried out is considered. When cyclic loads are implemented on the stand, destabilizing disturbances occur, which are expressed in the form of force deviations from the set values, which leads to a decrease in the reliability of the information received about the test object when evaluating the quality of the product under test. A unified decision-making algorithm for improving the stability of the stand is presented. In accordance with the presented algorithm, an experiment with alternating cyclic loading was carried out to assess the stability of the test bench. A criterion for assessing the stability of the test bench is proposed. The most significant factors used in the implementation of cyclic loading are substantiated, and recommendations are given to increase the stability of the test bench.

Keywords: test bench, static tests, destabilizing factors, stability criterion, robust parametric design.

For citation: Antipova T.N., Tikhonov V.A. Theoretical provisions and practice on increasing the stability of static tests of large-sized products to assess their strength quality indicators. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025; 4(85): 25–30. (In Russ.).

References

1. Antipova T.N., Tikhonov V.A. A study of the stability of a test bench to a disturbing factor for improving the quality of information on the strength characteristics of large-sized products. Information and economic aspects of standardization and technical regulation. 2025, no. 3 (84), pp. 98–104.
2. 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.
3. 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.
4. Varzhapetyan A.G. Modern quality management tools: robust design. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Volume Part 1. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2008, 172 p.
5. Leon R., Shoemaker A., Taguchi G., et al. Quality management. Robust design. The Taguchi method. Translated from English, Moscow: SAFI Publ., 2002, 384 p.