

УДК 681.5.015.3: 681.5.017: 629.7.015.4

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛЕЙНОГО ТЕСТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОГИДРОПРИВОДА СТЕНДА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

© В. Д. Юркевич, П. А. Суняйкина, С. В. Сыренов

*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: yurkev@mail.ru*

Рассматривается проблема автоматизации выбора параметров регулятора электрогидропривода для одноканального стенда силового нагружения элементов авиационных конструкций. Предлагается методика настройки параметров пропорционально-интегрального регулятора стенда на основе результатов теста с релейной обратной связью и метода разделения движений. Полученные результаты дают возможность выполнить автоматическую настройку параметров регулятора стенда прочностных испытаний и повысить точность реализации заданных циклограмм силового нагружения конструкций, что в конечном итоге позволяет ускорить процесс проведения прочностных испытаний. Приведены результаты реализации данной методики на экспериментальном стенде.

*Ключевые слова:* прочностные испытания, авиационные конструкции, система управления, ПИ-регулятор, адаптивный регулятор, релейный тест, метод разделения движений.

DOI: 10.15372/AUT20190403

**Введение.** Прочностные испытания элементов авиационных конструкций проводятся в целях повышения надёжности летательных аппаратов и гарантированного обеспечения заданного эксплуатационного ресурса в авиационной и космической технике [1–3]. Прочностные статические и ресурсные испытания конструкций выполняются на стендах натурных испытаний, которые обычно включают несколько каналов силового воздействия на конструкцию с помощью электрогидроприводов [4–6]. Основное требование к процессу испытания состоит в обеспечении заданной точности реализации нагрузки в каждом канале силового воздействия. В силу сложности подвергаемых испытаниям изделий имеет место анизотропия прочностных свойств и динамических характеристик конструкций, что приводит к необходимости индивидуальной настройки регуляторов для каждого канала силового воздействия. Используемые в современной практике методики настройки регуляторов для электрогидравлических стендов прочностных испытаний основаны главным образом на экспериментальном подборе структуры и параметров регуляторов [7, 8].

Цель исследования — разработка методики автоматической настройки параметров пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора для электрогидропривода стенда прочностных испытаний на основе результатов теста с релейной обратной связью и метода разделения движений. Эффективность предлагаемой методики была апробирована на одноканальном стенде силового нагружения.

**Одноканальный испытательный стенд.** В данной работе обсуждается одноканальный испытательный стенд [9], функциональная схема которого представлена на рис. 1. Силовое воздействие формируется гидроприводом, связанным с имитатором нагрузки. Величина формируемой силы  $r(t)$  измеряется динамометром, выходной сигнал которого  $y(t)$  поступает в контроллер, где осуществляется реализация алгоритма управления и формируется управляющее воздействие  $u(t)$ , поступающее на агрегат управления гидроприво-

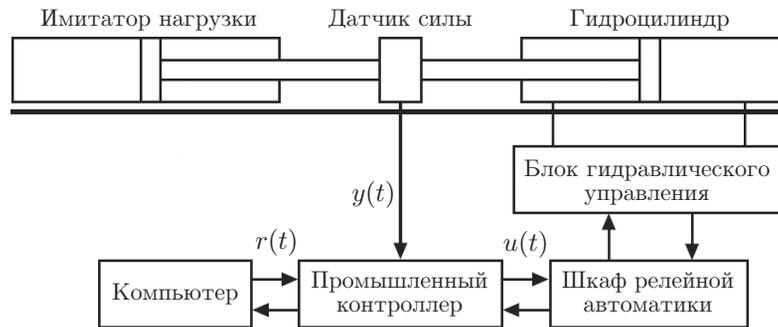


Рис. 1. Функциональная схема испытательного стенда

дом, включающий блок гидравлического управления и шкаф релейной автоматики. Цифро-аналоговый преобразователь контроллера формирует сигнал в диапазоне от  $-10$  до  $+10$  В, где  $10$  В принимается за  $100\%$ . Агрегат управления осуществляет воздействие на золотник, который регулирует подачу масла высокого давления в гидроцилиндр.

В результате экспериментальных исследований динамических характеристик стенда в условиях относительной малости скорости формируемых процессов силового нагружения была получена упрощённая математическая модель стенда [9]

$$\dot{y}(t) = gu(t - \tau), \quad (1)$$

где  $g$  — коэффициент усиления;  $\tau$  — запаздывание в канале управления.

**Тест с релейной обратной связью.** Обычно для электрогидравлических стендов применяют ПИ-регуляторы с передаточной функцией вида

$$G_c(p) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right), \quad (2)$$

где  $k_c$  — пропорциональный коэффициент усиления;  $T_i$  — постоянная времени интегральной составляющей в законе управления.

При выборе параметров регулятора  $k_c$  и  $T_i$  наиболее часто применяются эмпирические методики, например две методики, предложенные в работе [10]. Первая основана на анализе вида реакции разомкнутой системы на ступенчатое входное воздействие. Во второй методике выполняется эксперимент для системы с пропорциональной обратной связью  $k_c$ , где  $T_i = \infty$  в выражении (2). Экспериментальным путём находится предельное значение коэффициента усиления  $k_c = k_u$ , соответствующее колебательной границе устойчивости замкнутой системы, а также период  $T_u$  данных колебаний. Затем выбор параметров ПИ-регулятора выполняется на основе следующих эмпирических соотношений [10]:

$$k_c = c_1 k_u; \quad T_i = c_2 T_u, \quad (3)$$

где  $c_1 = 0,45$  и  $c_2 = 0,83$ . Заметим, что существенным недостатком второй методики при её применении на промышленных объектах является возможность возникновения неустойчивых автоколебательных режимов в процессе изменения коэффициента усиления в обратной связи. Поэтому в [11] было предложено во второй методике для системы с пропорциональной обратной связью выполнить замену пропорционального коэффициента усиления на реле в целях формирования в замкнутой системе устойчивого автоколебательного режима. При этом предельное значение коэффициента усиления  $k_u$  вычисляется через коэффициент гармонической линеаризации реле в условиях предположения, что частотные свойства объекта управления удовлетворяют гипотезе фильтра. По результатам эксперимента для

системы с реле на входе объекта управления получают оценки периода  $T_0$  и амплитуды  $A_0$  колебаний для первой гармоники в сигнале на входе реле. Соответственно в качестве оценки периода  $T_u$  принимаем  $T_u \approx T_0$ , а предельное значение коэффициента усиления  $k_u$  можно оценить через коэффициент гармонической линеаризации реле

$$k_u \approx \frac{4u_0}{\pi A_0},$$

где  $u_0$  — амплитуда сигнала на выходе симметричного реле. В результате для выбора параметров ПИ-регулятора соотношения (3) принимают вид

$$k_c = c_1 \frac{4u_0}{\pi A_0}; \quad T_i = c_2 T_0. \quad (4)$$

Данный метод, получивший название теста с релейной обратной связью, позволяет исключить возникновение неустойчивых автоколебательных режимов, ускорить и автоматизировать процесс настройки параметров регулятора [12–14]. Необходимо отметить, что недостатками применения соотношений (4) для выбора параметров ПИ-регулятора являются малая точность регулирования в динамических режимах, зависимость показателей качества переходных процессов от вариаций параметров объекта управления, отсутствие ясных взаимосвязей параметров регулятора с показателями качества переходных процессов в замкнутой системе.

**Идентификация параметров одноканального стенда.** Предлагается использовать рассмотренный выше тест с релейной обратной связью для идентификации параметров  $g$  и  $\tau$  в математической модели стенда (1). С этой целью сформируем управляющее воздействие в виде

$$u(t) = u_0 \operatorname{sign}[r - y(t)], \quad (5)$$

где  $r = \text{const}$ . Например, полагаем  $r = 0$ . Запишем условие гармонического баланса для первой гармоники автоколебательного режима системы (1), (5) в следующем виде:

$$\left| \frac{4u_0 g}{\pi A_0 j \omega_0} e^{-j\tau \omega_0} \right| = 1, \quad \tau \omega_0 = \frac{\pi}{2}.$$

Из данных уравнений следует

$$g = \frac{\pi^2 A_0}{2u_0 T_0}; \quad \tau = \frac{T_0}{4}, \quad (6)$$

где  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ . Таким образом, из результатов теста с релейной обратной связью (5) получаем величины  $A_0$  и  $T_0$ , на основе которых по соотношениям (6) вычисляем оценки для параметров  $g$  и  $\tau$ . Заметим, что длительность теста с релейной обратной связью (5) на испытательном стенде может составлять от 5 до 10 периодов  $T_0$ , что на практике не превышает одной секунды.

**Расчёт параметров регулятора методом разделения движений.** В силу того что упрощённая модель вида (1) не учитывает динамические процессы более высокого порядка и нелинейность характеристик реального гидропривода, предлагается выполнить расчёт параметров ПИ-регулятора для испытательного стенда на основе метода разделения движений, который позволяет обеспечить желаемые динамические характеристики системы управления в условиях неполной информации о параметрах стенда [15]. Полагаем,

что желаемая величина развиваемой гидроцилиндром силы нагружения задана непрерывной функцией  $r(t)$ , соответственно ошибка реализации силы  $r(t)$  равна  $e(t) = r(t) - y(t)$ . Задача управления состоит в обеспечении свойства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \delta,$$

где  $\delta$  — абсолютное значение максимальной допустимой ошибки формирования силы нагружения  $r(t)$ ,  $\delta > 0$ .

Рассмотрим алгоритм управления, уравнение которого записано в виде

$$\mu \dot{u}(t) = k_0 [\dot{e}(t) + T^{-1}e(t)], \quad (7)$$

где  $\mu$  рассматривается как малый положительный параметр алгоритма управления. Выражение (7) можно записать в операторной форме:

$$u(t) = \frac{k_0}{\mu} \left[ 1 + \frac{1}{Tp} \right] e(t), \quad (8)$$

где, представив (8) в виде (2), будем иметь

$$k_c = k_0/\mu, \quad T_i = T.$$

В соответствии с (1) и (7) получаем уравнения замкнутой системы управления

$$\dot{e}(t) = \dot{r}(t) - g u(t - \tau); \quad \mu \dot{u}(t) = k_0 [\dot{e}(t) + T^{-1}e(t)]. \quad (9)$$

В целях анализа свойств системы (9) заменим  $\dot{e}(t)$  во втором уравнении системы (9) правой частью первого уравнения данной системы:

$$\dot{e}(t) = \bar{r}(t) - g u(t - \tau); \quad \mu \dot{u}(t) = -k_0 g u(t - \tau) + k_0 [\bar{r}(t) + T^{-1}e(t)], \quad (10)$$

где  $\bar{r} = \dot{r}(t)$  и  $|\bar{r}| \leq \bar{r}_{\max}$  в силу ограниченности скорости формируемых процессов силового нагружения.

Уменьшение параметра регулятора  $\mu$  приводит к формированию быстрых и медленных процессов в решениях системы (10), для анализа свойств которых привлекается метод разделения движений. В частности, в соответствии с методикой выделения подсистем быстрых и медленных движений для систем с запаздыванием в канале управления [15] из системы (10) получаем уравнение подсистемы быстрых движений (ПБД) вида

$$\mu \dot{u}(t) = -k_0 g u(t - \tau) + k_0 [\bar{r}(t) + T^{-1}e(t)], \quad (11)$$

где  $e(t)$  и  $\bar{r}(t)$  — «замороженные» величины на интервале времени переходных процессов ПБД (11).

Предполагая устойчивость быстрых процессов, рассмотрим квазиравновесный режим ПБД (11), где  $\dot{u} = 0$ , тогда из системы (10) следует

$$\dot{e}(t) = \bar{r}(t) - g u(t - \tau); \quad 0 = -k_0 g u(t - \tau) + k_0 [\bar{r}(t) + T^{-1}e(t)]. \quad (12)$$

Исключая  $u(t - \tau)$  в системе (12) и принимая во внимание условие  $\bar{r} = \dot{r}(t)$ , получим уравнение подсистемы медленных движений (ПМД) для ошибки регулирования  $e(t)$ , которое имеет следующий вид:

$$T \dot{e} + e = 0. \quad (13)$$

Таким образом, быстрое затухание процессов в (11) ведёт к формированию в замкнутой системе (10) переходных процессов в соответствии с уравнением эталонной модели вида (13), где выбором параметра регулятора  $T$  можно обеспечить желаемое время переходных процессов для ошибки регулирования  $e(t)$ . Критическим фактором является устойчивость быстрых процессов, что можно обеспечить заданием требуемой величины запаса устойчивости по фазе  $\varphi_0$  для ПБД (11). Используя критерий Найквиста для (11), получим соотношение, которое выражает взаимосвязь параметров регулятора (7) и системы (1) с величиной запаса устойчивости по фазе  $\varphi_0$  для ПБД:

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\tau g k_0}{\mu}. \quad (14)$$

В результате при расчёте параметров регулятора методом разделения движений необходимо задать запас устойчивости по фазе  $\varphi_0$  для ПБД, где  $0 < \varphi_0 < \pi/2$ , и степень разделения темпов быстрых и медленных процессов  $\eta$ , например  $\eta \approx 10$ . Затем при заданных величинах  $\varphi_0$  и  $\eta$  вычисляем параметры регулятора

$$k_0 = \frac{1}{g}; \quad \mu = \frac{\tau}{0,5\pi - \varphi_0}; \quad T \approx \eta\mu. \quad (15)$$

Принимая во внимание оценки (6) для параметров  $g$  и  $\tau$  по результатам теста с релейной обратной связью, будем иметь расчётные соотношения

$$k_0 = \frac{2u_0 T_0}{\pi^2 A_0}, \quad \mu = \frac{T_0}{2(\pi - 2\varphi_0)}, \quad T \approx \eta\mu.$$

Соответственно при записи алгоритма управления (8) в форме (2) получим для расчёта коэффициентов  $k_c$  и  $T_i$  следующие формулы:

$$k_c = \frac{4u_0(\pi - 2\varphi_0)}{\pi^2 A_0}; \quad T_i = \frac{\eta T_0}{2(\pi - 2\varphi_0)}. \quad (16)$$

Таким образом, соотношения (16) в явном виде раскрывают взаимосвязь параметров ПИ-регулятора стенда с результатами релейного теста, с требованием к запасу устойчивости по фазе в подсистеме быстрых движений и требованием к степени разделения темпов быстрых и медленных процессов в замкнутой системе.

**Результаты эксперимента на стенде.** Эффективность предлагаемой методики выбора параметров ПИ-регулятора была апробирована на испытательном стенде. Результаты эксперимента на стенде с релейным алгоритмом управления приведены на рис. 2, где  $r = 0$  и  $u_0 = 5\%$ , из которых получаем оценки  $A_0 \approx 70$  кгс и  $T_0 \approx 0,1$  с. В соответствии с (6) получим  $g \approx 690$  кгс/% и  $\tau \approx 0,025$  с. Задавая  $\varphi_0 = 0,6$  рад и  $\eta = 10$  в соотношениях (16), получаем  $k_c \approx 0,0562$  и  $T_i \approx 0,2575$ . Результаты эксперимента на стенде в режиме статического нагружения с полученными значениями параметров ПИ-регулятора приведены на рис. 3, где величина силовой нагрузки  $r(t)$  изменяется от 0 до 2000 кгс с последующим уменьшением до 1000 кгс.

Предварительные исследования [9] показали, что особенность и сложность в выборе параметров регулятора для испытательного стенда обусловлены тем, что коэффициент усиления  $g$  в модели стенда (1) изменяется в широких пределах в зависимости от режима проведения прочностных испытаний. В то же время величина запаздывания  $\tau$  практически не зависит от режима испытаний. В частности, полученные оценки (6) на основе релейного

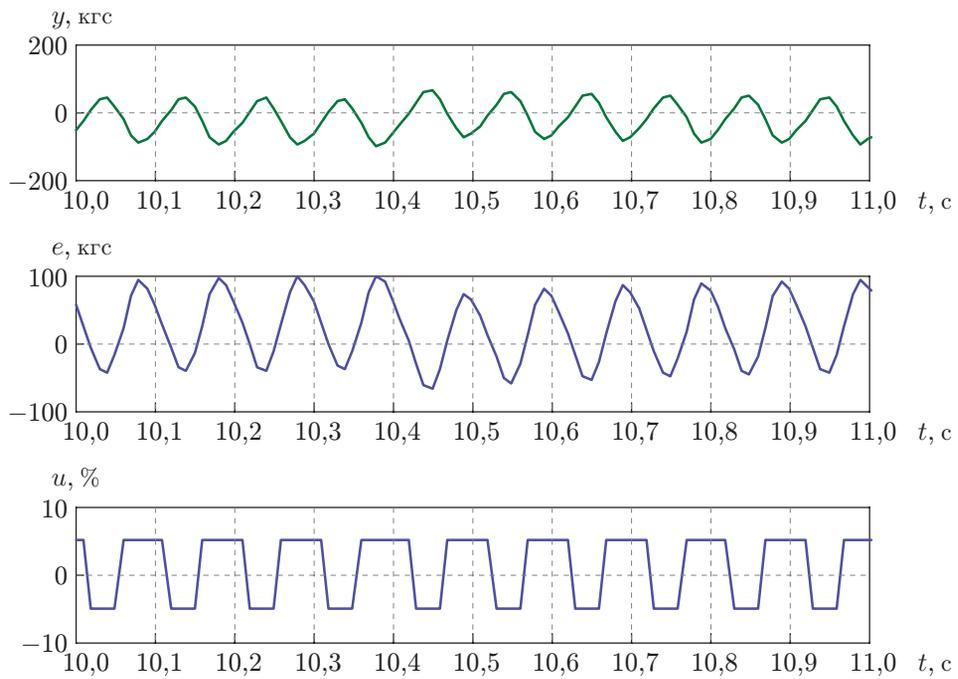


Рис. 2. Результаты эксперимента с релейным алгоритмом управления

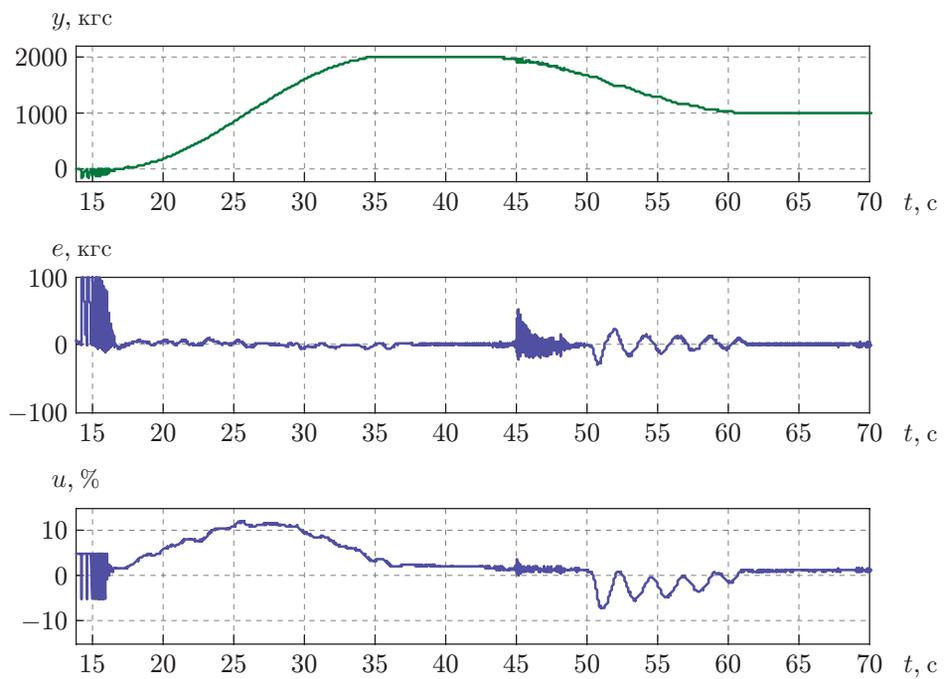


Рис. 3. Результаты эксперимента в режиме статического нагружения

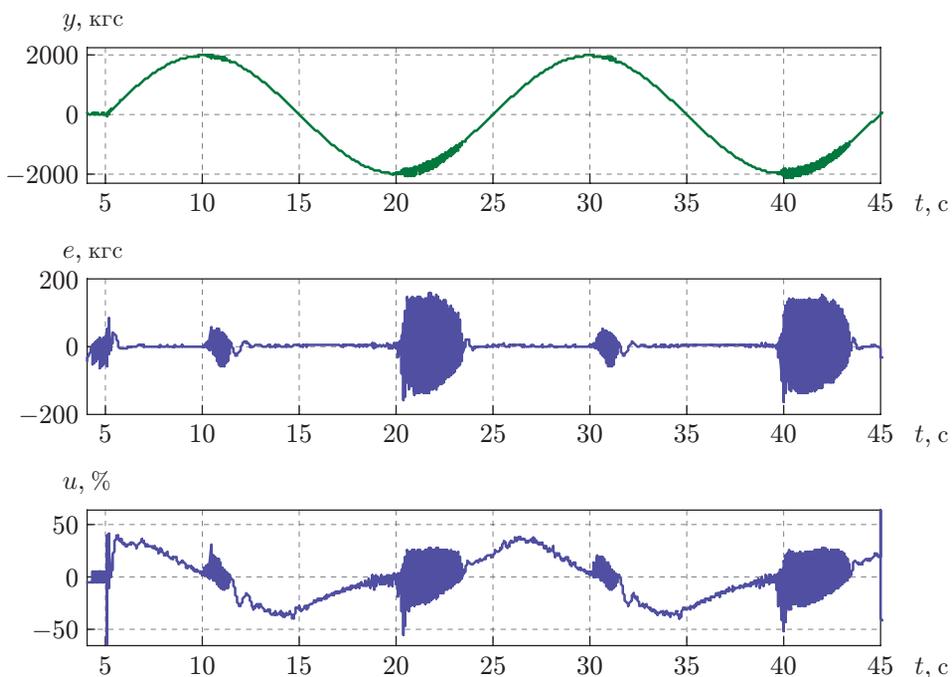


Рис. 4. Результаты эксперимента в режиме ресурсных испытаний

теста соответствуют режиму статического нагружения, где  $r = \text{const}$ . В режиме ресурсных испытаний величина нагрузки задаётся в виде гармонического силового воздействия  $r = r_0 \sin(\omega t)$ . Из результатов работы [9] следует, что в данном режиме коэффициент усиления  $g$  в модели стенда (1) уменьшается в  $\tilde{k}$  раз, где  $\tilde{k} \in (8, 10)$ . Применяя оценки (6) при вычислении параметров регулятора для реализации режима ресурсных испытаний, представим соотношения (16) в следующем виде:

$$k_c = \tilde{k} \frac{4u_0(\pi - 2\varphi_0)}{\pi^2 A_0}; \quad T_i = \frac{\eta T_0}{2(\pi - 2\varphi_0)}. \quad (17)$$

Результаты эксперимента на стенде для значений параметров ПИ-регулятора по соотношениям (17) в режиме ресурсных испытаний приведены на рис. 4, где  $\tilde{k} = 10$ ,  $\varphi_0 = 0,6$  рад,  $\eta = 10$ .

Необходимо дополнительно отметить, что в режиме ресурсных испытаний при изменении направления движения штока гидроцилиндра происходит кратковременное увеличение коэффициента  $g$ . Это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в системе управления (см. рис. 4). В целях снижения влияния данного эффекта можно использовать дополнительный контур адаптации для коэффициента усиления регулятора  $k_c$  [15, 16].

**Заключение.** Результаты проведённых экспериментов на стенде показали, что применение релейного теста и метода разделения движений позволяет реализовать автоматическую настройку параметров ПИ-регулятора стенда прочностных испытаний элементов авиационных конструкций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серьезнов А. Н., Белов В. К.** Роль эксперимента при обеспечении ресурса самолетов // Полет. 2008. № 8. С. 111–116.

2. **Щербань К. С.** Ресурсные испытания натуральных конструкций самолетов. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2009. 236 с.
3. **Васюков Е. В., Гайворонский А. И., Данилова Д. А. и др.** Опыт применения автоматизированной системы управления нагружением при статических и ресурсных испытаниях конструкций ракетной и космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2014. **76**, № 3. С. 29–32.
4. **Серьезнов А. Н., Сабельников В. И., Колеватов Ю. В., Суворкин Д. И.** Испытательные комплексы и стенды для исследования агрегатов и систем летательных аппаратов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 206 с.
5. **Белоусов А. И., Присекин В. Л., Расторгуев Г. И., Федотова О. Р.** Исследование влияния динамических свойств летательного аппарата на устойчивость канала нагружения // Вестн. МАИ. 2009. **16**, № 3. С. 145–149.
6. **Сиденко Д. Е., Сабельников В. И.** Анализ схемных решений систем нагружения самолёта при испытаниях на прочность // Сб. тр. XVII Всерос. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 1. С. 312–316.
7. **Присекин В. Л., Белоусов А. И.** Алгоритмы управления нагружением в испытательных стендах // Науч. вестн. НГТУ. 2000. **8**, № 1. С. 3–11.
8. **Белоусов А. И., Расторгуев Г. И., Комарова С. О.** Моделирование процесса нагружения конструкции летательного аппарата // Науч. вестн. НГТУ. 2011. **45**, № 4. С. 59–68.
9. **Лапердин А. И., Юркевич В. Д.** Экспериментальное исследование динамических свойств канала нагружения стенда для прочностных испытаний авиационных конструкций // Науч. вестн. НГТУ. 2016. **62**, № 1. С. 168–180.
10. **Ziegler J. G., Nichols N. B.** Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. **64**. P. 759–768.
11. **Astrom K. J., Hagglund T.** Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins // Automatica. 1984. **20**, N 5. P. 645–651.
12. **Yu C.-C.** Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach. N. Y.: Springer, 2006. 261 p.
13. **Boiko I.** Non-parametric Tuning of PID Controllers: Modified Relay Feedback Test Approach. London: Springer, 2013. 187 p.
14. **Tan K. K., Wang Q.-G., Hang C. C., Hagglund T. J.** Advances in PID Control. London: Springer, 1999. 264 p.
15. **Лапердин А. И., Юркевич В. Д.** Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 51–58.
16. **Пат. 2661067 С1 РФ.** Система управления для стенда прочностных испытаний /А. И. Лапердин, В. Д. Юркевич. Оpubл. 11.07.2018, Бюл. № 20.

*Поступила в редакцию 16.05.2019*  
*После доработки 31.05.2019*  
*Принята к публикации 03.06.2019*