

УДК 681.5.015.3: 681.5.017: 629.7.015.4

УПРАВЛЕНИЕ С ИТЕРАТИВНЫМ ОБУЧЕНИЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СТЕНДА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

© М. В. Трубин¹, В. Д. Юркевич^{1,2}¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20²Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: yurkev@mail.ru

Рассматривается проблема синтеза систем управления для электрогидравлических стендов прочностных и ресурсных испытаний авиационных конструкций. Предлагается использовать алгоритм управления с итеративным обучением для повышения точности формирования заданной циклограммы силового нагружения механических конструкций. Приведены результаты численного моделирования системы управления стендом с итеративным обучением, а также результаты экспериментальной проверки предложенного алгоритма на одноканальном испытательном стенде. Результаты моделирования и экспериментов на испытательном стенде показали возможность повышения точности формирования заданной циклограммы силового нагружения на основе предлагаемого подхода. Полученные результаты позволяют автоматизировать процесс настройки регуляторов для электрогидроприводов стендов прочностных испытаний, а также ускорить процесс проведения ресурсных и статических прочностных испытаний авиационных конструкций.

Ключевые слова: прочностные испытания, электрогидропривод, управление, итеративное обучение, пропорционально-интегральный регулятор.

DOI: 10.15372/AUT20240311

EDN: XMGNCR

Введение. Прочностные и ресурсные испытания конструкций являются неотъемлемой частью процесса проектирования аппаратов аэрокосмической техники [1–4]. Применяемые для проведения натурных испытаний электрогидравлические стенды позволяют реализовать силовые нагрузки, возникающие при эксплуатации аппаратов аэрокосмической техники [5–8].

Особенностями стендов для проведения натурных испытаний являются нелинейность динамических характеристик каналов силового нагружения, наличие люфтов, запаздываний и малых инерционностей в канале управления [9–12]. Указанные особенности испытательных стендов усложняют задачу обеспечения требований на точность реализации заданных силовых нагрузок и задачу автоматизации процесса настройки регуляторов стендов, что в конечном итоге не позволяет ускорить процесс проведения ресурсных и статических прочностных испытаний авиационных конструкций.

С целью повышения точности реализации циклограмм силового нагружения конструкций на испытательных стендах могут быть использованы адаптивные алгоритмы управления [13]. Автоматизация процесса настройки регуляторов электрогидроприводов испытательного стенда может быть обеспечена введением контура адаптации параметров алгоритма управления на основе оценки величины коэффициента усиления канала силового нагружения стенда [14, 15]. В то же время в режиме проведения ресурсных (усталостных) испытаний имеет место быстрое изменение величины коэффициента усиления канала силового нагружения стенда [15], которое не удаётся эффективно компенсировать в контуре адаптации параметров алгоритма управления.

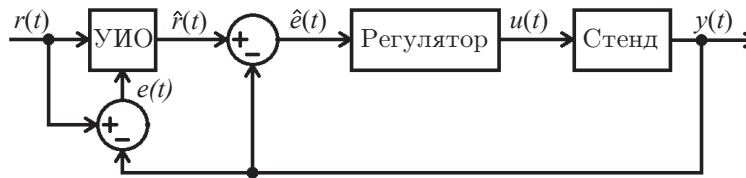


Рис. 1. Функциональная схема системы управления стенда прочностных испытаний с УИО

Другой особенностью стендов прочностных испытаний является повторяемость (циклическость) процесса силового нагружения конструкций, что открывает возможность повышения точности формирования циклограммы силового нагружения путём коррекции задающего или управляющего воздействия на основе результатов предыдущих циклов испытаний. В частности, для повышения точности и улучшения показателей качества переходных процессов в динамических системах с повторяющимся управлением может быть использован подход на основе управления с итеративным обучением (УИО)[16–20].

В предлагаемой работе рассматриваются результаты моделирования и экспериментов на электрогидравлическом стенде прочностных испытаний при использовании алгоритма управления с итеративным обучением с целью повышения точности формирования заданной циклограммы силового нагружения механических конструкций.

Постановка задачи. Рассматривается система управления стендом прочностных испытаний механических конструкций при реализации управления с итеративным обучением, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

В данном случае имеется двухконтурная система управления, целью регулирования в которой является обеспечение свойства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup_{t \geq 0} |e(t)| \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где $e(t)$ — величина ошибки реализации циклограммы силового нагружения; $e(t) = r(t) - y(t)$, $r(t)$ — заданная величина силового нагружения; $y(t)$ — сигнал с датчика силы; ε — требование на точность реализации силового нагружения, $\varepsilon > 0$.

Обычно на стендах прочностных испытаний используются пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы [13, 14]. Уменьшение ошибки реализации циклограммы силового нагружения достигается путём увеличения коэффициентов ПИ-регулятора. Однако при увеличении коэффициентов ПИ-регулятора в силу нелинейности динамических характеристик канала силового нагружения, наличия люфтов, запаздывания и малых инерционностей в канале управления происходят ухудшение показателей качества переходных процессов в замкнутой системе и потеря устойчивости контура регулирования.

С учётом повторяемости процесса силового нагружения механических конструкций повышение точности формирования циклограммы силового нагружения может быть достигнуто путём коррекции задающего или управляющего воздействия на основе результатов предыдущих циклов испытаний.

В данной работе рассматривается алгоритм управления с итеративным обучением, в котором осуществляется коррекция задающего воздействия в блоке УИО (см. рис. 1).

На выходе УИО формируется скорректированный сигнал $\hat{r}(t)$ для заданной величины силового нагружения $r(t)$ в момент времени t , где к желаемой величине $r(t)$ добавляется корректирующий сигнал $q(t)$. Величина корректирующего сигнала $q(t)$ формируется в виде суммы величины этого сигнала на предыдущем цикле испытаний $q(t - T)$ и текущей ошибки реализации циклограммы силового нагружения $e(t)$:

$$\hat{r}(t) = r(t) + q(t), \quad q(t) = q(t - T) + e(t)bh(t), \quad (2)$$

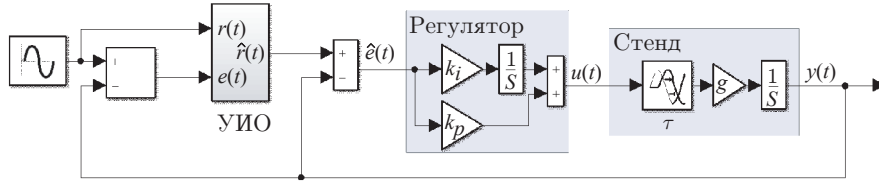


Рис. 2. Модель системы управления стендом прочностных испытаний

где весовой коэффициент b выбирается из условия устойчивости алгоритма итеративного обучения, T — период цикла силового нагружения, а функция $h(t)$ введена для запуска алгоритма итеративного обучения при $t > \bar{\tau}$. Функция $h(t)$ задана следующими условиями:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t < \bar{\tau}; \\ (t - \bar{\tau})/a, & \bar{\tau} \leq t \leq a + \bar{\tau}; \\ 1, & t > a + \bar{\tau}, \end{cases} \quad (3)$$

где a задаёт время изменения $h(t)$ от 0 до 1.

Результаты моделирования. Рассматривается математическая модель канала силового нагружения стенда прочностных испытаний механических конструкций в виде интегратора с запаздыванием [9, 13]

$$\dot{y}(t) = gu(t - \tau), \quad (4)$$

где $y(t)$ — величина силовой нагрузки, $u(t)$ — управляющее воздействие, g — коэффициент усиления канала силового нагружения стенда, $g > 0$, τ — запаздывание в канале управления.

Запаздывание τ в математической модели канала силового нагружения (4) отражает влияние неучтённой динамики высокого порядка в системе управления. На основе результатов эксперимента на стенде прочностных испытаний [14, 15] были получены оценки параметров модели (4): величина запаздывания $\tau = 0,05$ с, коэффициент $g = 18$.

При моделировании и на экспериментальном стенде применялся ПИ-регулятор

$$u(t) = k_p \hat{e}(t) + k_i \int_0^t \hat{e}(\hat{t}) d\hat{t}, \quad \hat{e}(t) = \hat{r}(t) - y(t),$$

параметры которого имели следующие значения: $k_p = 0,1$, $k_i = 0,1$. Модель системы управления стендом прочностных испытаний представлена на рис. 2. Структура блока УИО показана на рис. 3.

Циклограмма нагружения $r(t)$ в процессе моделирования и экспериментов была задана в виде гармонического сигнала

$$r(t) = A_r \sin(2\pi t/T), \quad A_r = 1000 \text{ кгс}, \quad T = 10 \text{ с}.$$

При моделировании заданы следующие параметры для алгоритма УИО (2): $a = 100$ с, $\bar{\tau} = 40$ с, $b = 0,5$. Результаты моделирования системы управления с УИО представлены на рис. 4, 5, где на интервале времени $0 \leq t < 40$ система моделируется без алгоритма УИО, а при $t \geq 40$ подключается алгоритм УИО.

Исходя из результатов моделирования, видно, что включение в структуру системы управления блока УИО позволило увеличить точность реализации циклограммы силового нагружения без повышения коэффициентов усиления ПИ-регулятора.

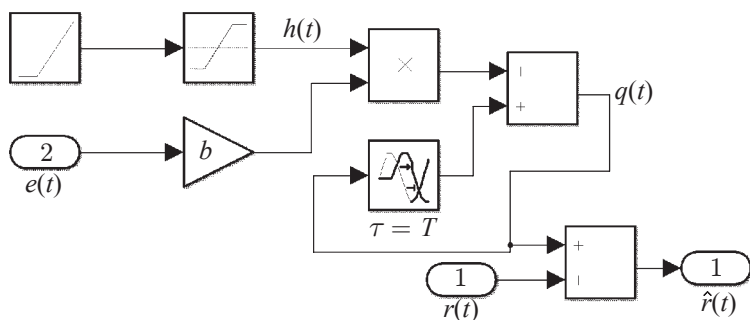


Рис. 3. Блок реализации алгоритма управления с итеративным обучением

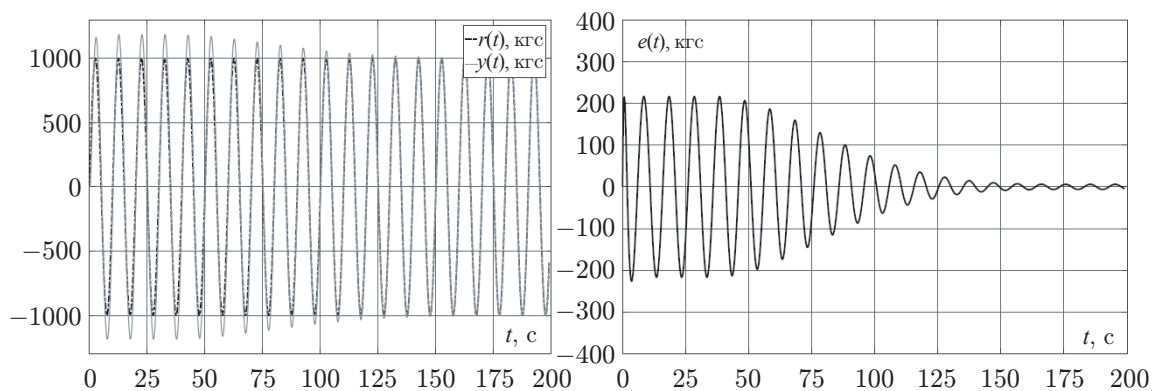


Рис. 4. Сигналы $r(t)$, $y(t)$ и $e(t)$ из результатов моделирования

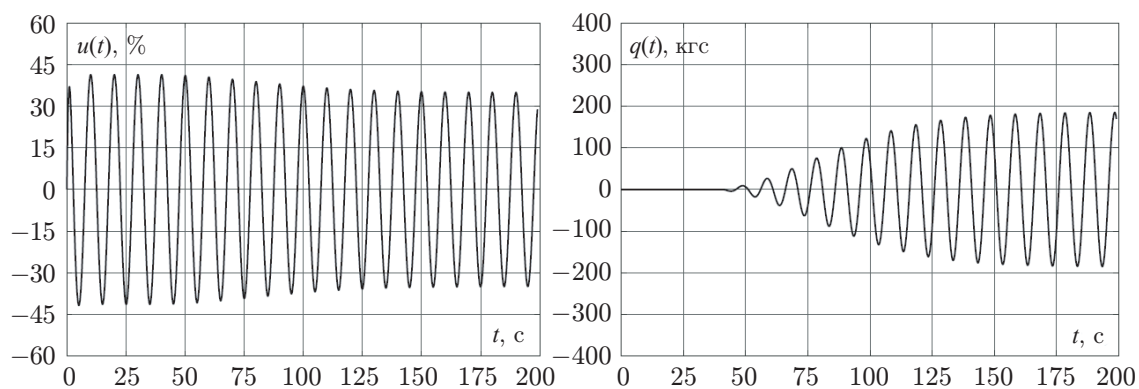


Рис. 5. Сигналы $u(t)$ и $q(t)$ из результатов моделирования

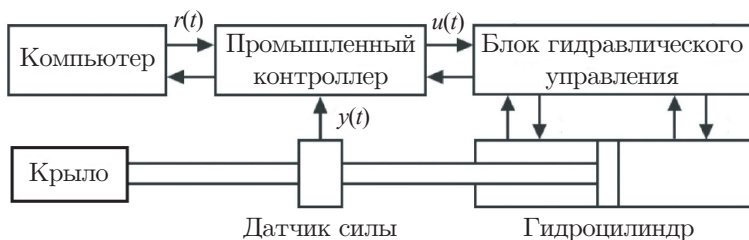


Рис. 6. Функциональная схема экспериментального стенда

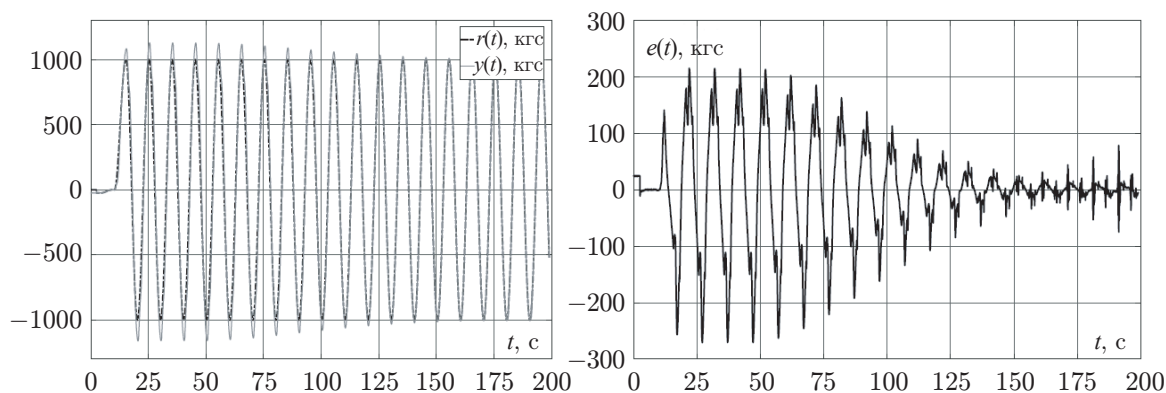


Рис. 7. Сигналы $r(t)$, $y(t)$ и $e(t)$ из результатов эксперимента на стенде

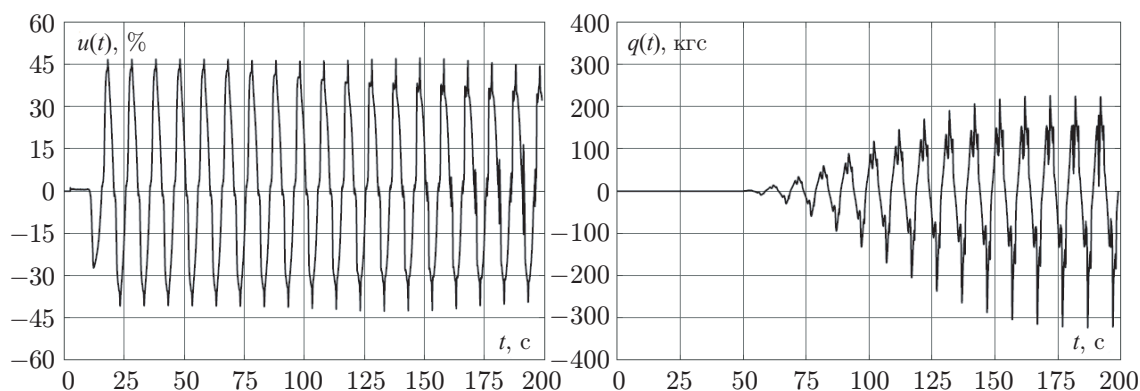


Рис. 8. Сигналы $u(t)$ и $q(t)$ из результатов эксперимента на стенде

Результаты экспериментов на стенде. Представленный алгоритм УИО (2) был апробирован на экспериментальном стенде прочностных испытаний при тех же значениях параметров для алгоритма УИО и ПИ-регулятора, которые были заданы при численном моделировании. Функциональная схема экспериментального стенда прочностных испытаний приведена на рис. 6.

Алгоритмы ПИ-регулятора и УИО реализованы программными средствами промышленного контроллера. Результаты эксперимента на стенде прочностных испытаний для алгоритма управления с итеративным обучением показаны на рис. 7, 8.

Результаты эксперимента согласуются с результатами численного моделирования и подтверждают возможность применения предлагаемого подхода к построению системы управления с итеративным обучением для повышения точности реализации циклограммы силового нагружения механических конструкций.

Заключение. В данной работе рассмотрен один из возможных подходов к повышению точности реализации циклограммы силового нагружения механических конструкций на стенде прочностных испытаний. Результаты моделирования и экспериментов показали практическую реализуемость управления с итеративным обучением для повторяющихся режимов силового нагружения, однако в сравнении с результатами численного моделирования в эксперименте на стенде наличие нерегулярных колебаний может привести к неустойчивости процесса обучения. Поэтому для исключения данного эффекта требуются дополнительные исследования. Полученные результаты позволяют упростить процесс настройки регуляторов для электрогидроприводов стендов прочностных испытаний, а также

ускорить процесс проведения ресурсных и статических прочностных испытаний авиационных конструкций.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № 124041700067-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербань К. С., Сурначев А. А., Наумов С. М. и др. Проведение статических и усталостных испытаний на единой натурной конструкции транспортного самолёта // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. **86**, № 12. С. 54–63. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-12-54-63.
2. Shcherban K. S., Surnachev A. A., Limonin M. V. et al. Combined static and fatigue tests of the full-scale structure of a transport aircraft // Proc. of the 30th Symp. of the Int. Committee on Aeronautical Fatigue. Cham: Springer, 2020. P. 736–746.
3. Reymer P., Leski A., Zieliński W., Jankowski K. The concept of a full scale fatigue test of a SU-22 fighter bomber // Fatigue of Aircraft Structures. 2014. **2014**, Iss. 6. P. 79–87.
4. Wanhill R. J. H. Fatigue Requirements for Aircraft Structures // Aircraft Sustainment and Repair. Eds. by R. Jones, A. Baker, N. Matthews, V. Champagne. Butterworth—Heinemann: Elsevier LTD, 2018. P. 17–40.
5. Сабельников В. И., Колеватов Ю. В., Куликов Е. Н. и др. Гидропривод лаборатории статических и ресурсных испытаний натурных авиационных конструкций // Авиационная промышленность. 2008. № 2. С. 53–56.
6. Куликов Е. Н., Сабельников В. И. Системы нагружения для статических испытаний лёгких самолетов // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2010. № 8. С. 26–30.
7. Федоров Д. С., Буданов С. А. Комплекс стендовых ресурсных испытаний натурной конструкции самолёта-штурмовика // Тр. МАИ. 2014. Вып. 74. С. 1–6.
8. Колеватов Ю. В., Сабельников В. И., Суворкин Д. И. Контроль и диагностика гидроприводов стендов при испытаниях летательных аппаратов в лабораториях прочности // Контроль. Диагностика. 2015. № 5. С. 32–40.
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. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-168-180.
10. Белоусов А. И., Расторгуев Г. И., Федотова О. Р. Определение оптимальных параметров системы управления нагружением при ресурсных испытаниях летательных аппаратов с использованием математической модели // Вестн. СибГАУ. 2008. Вып. 1 (18). С. 112–115.
11. Присекин В. Л., Пустовой Н. В., Расторгуев Г. И. Алгоритмы управления усталостными испытаниями самолётов // Прикладная механика и техническая физика. 2014. **55**, № 1. С. 198–206.
12. 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.
13. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 51–58. DOI: 10.15372/AUT20170406.
14. Юркевич В. Д., Суняйкина П. А., Сыренов С. В. Применение релейного теста для автоматической настройки регулятора электрогидропривода стенда прочностных испытаний // Автометрия. 2019. **55**, № 4. С. 29–36. DOI: 10.15372/AUT20190403.

15. **Трубин М. В., Юркевич В. Д.** Алгоритмы оценки коэффициента усиления канала силового нагружения электрогидравлического стенда прочностных испытаний // *Автометрия*. 2022. **58**, № 4. С. 50–58. DOI: 10.15372/AUT20220405.
16. **Bristow D. A., Tharayil M., Alleyne A. G.** A Survey of iterative learning control // *IEEE Control Syst. Magaz.* 2006. **26**, Iss. 3. P. 96–114.
17. **Ahn H.-S., Chen Y. Q., Moore K. L.** Iterative Learning Control: Brief Survey and Categorization // *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybernetics. Pt. C (Appl. Rev.)*. 2007. **37**, Iss. 6. P. 1099–1121.
18. **Pakshin P., Emelianova J., Galkowski K., Rogers E.** Iterative learning control under parameter uncertainty and failures // *Proc. of the IEEE Int. Symp. Intelligent Control (ISIC)*. Dubrovnik, Croatia, 3–5 Oct., 2012. DOI: 10.1109/ISIC.2012.6398268.
19. **Emelianova J. P., Pakshin P. V.** Iterative Learning Control Design Based on State Observer // *Automation and Remote Control*. 2019. **80**, N 9. P. 1561–1573.
20. **Pakshin P. V., Kuposov A. S., Emelianova J. P.** Iterative Learning Control of a Multiagent System under Random Perturbations // *Automation and Remote Control*. 2020. **81**, N 3. P. 483–502.

Поступила в редакцию 15.04.2024

После доработки 22.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024
