

УДК 681.5.015.3: 681.5.017: 629.7.015.4

РАСЧЕТ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТЕНДА ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ И РЕЛЕЙНОГО ТЕСТА

В.Д. Юркевич

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, проспект К.Маркса, 20
E-mail: yurkev@ac.cs.nstu.ru

А.И. Лапердин

Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина
630051, РФ, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21
E-mail: lp.un1t@mail.ru

Ключевые слова: прочностные испытания, испытательный стенд, система управления, гидропривод, ПИ-регулятор, метод разделения движений, релейный тест.

Аннотация: Рассматривается задача автоматизации выбора параметров регулятора электрогидропривода одноканального стенда силового нагружения элементов авиационных конструкций. Обсуждаемый подход основан на предварительной оценке параметров испытательного стенда по результатам теста с релейной обратной связью. Затем, для выбора параметров пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора стенда, применяется метод синтеза, основанный на формировании разнотемповых процессов в системе управления. Предложенная методика была апробирована на испытательном стенде, что позволило осуществить автоматическую настройку регулятора и повысить точность реализации заданных циклограмм силового нагружения конструкций.

1. Введение

Проведение прочностных испытаний элементов авиационных конструкций является важной составной частью повышения надёжности летательных аппаратов и гарантированного обеспечения заданного эксплуатационного ресурса в авиационной технике. Для проведения ресурсных испытаний разрабатываются специальные стенды натуральных испытаний, которые могут включать в себя десятки электрогидроприводов [1-4]. Важным этапом процесса разработки эффективных систем силового нагружения является проведение предварительных исследований динамических свойств стенда, построение математической модели стенда и уточнение его параметров. Построение адекватной процессу испытаний математической модели стенда необходимо для правильного выбора структуры и параметров алгоритма управления стендом, что в конечном итоге позволяет обеспечить повышение точности реализации заданных циклограмм силового нагружения конструкций, ускорить проведение прочностных испытаний и повысить достоверность оценок для эксплуатационного ресурса элементов конструкций в авиационной и космической техники [5].

2. Идентификация параметров одноканального стенда на основе теста с релейной обратной связью

Используемые в современной практике методики настройки регуляторов для электрогидравлических стендов прочностных испытаний основаны главным образом на экспериментальном подборе структуры и параметров регуляторов [1-4]. Обычно для электрогидравлических стендов применяют пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы с передаточной функцией вида

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

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, предложенные в работе J. G. Ziegler, N. B. Nichols [6]. В частности, в работе [6] были предложены две методики. Первая методика основана на анализе вида реакции разомкнутой системы на ступенчатое входное воздействие. Во второй методике рассматривается система с пропорциональной обратной связью, где в результате эксперимента находят предельное значение коэффициента усиления k_u соответствующее колебательной границе устойчивости замкнутой системы, а также период T_u данных колебаний с круговой частотой $\omega_u = 2\pi/T_u$. Соответственно для выбора параметров ПИ регулятора были предложены следующие соотношения [6]:

$$(2) \quad k_c = c_1 k_u, T_i = c_2 T_u,$$

где $c_1 = 0,45$ и $c_2 = 0,83$. В дальнейшем, в работе [7] было предложено во второй методике для системы с пропорциональной обратной связью выполнить замену пропорционального коэффициента усиления на реле и вычислять предельное значение коэффициента усиления k_u через коэффициент гармонической линеаризации реле в условиях предположения, что частотные свойства объекта управления удовлетворяют гипотезе фильтра. Соответственно для выбора параметров ПИ регулятора используются соотношения

$$(2) \quad k_c = c_1 \frac{4u_0}{\pi A_0}, T_i = c_2 T_0,$$

где u_0 – амплитуда сигнала на выходе симметричного реле, T_0 – период колебаний с круговой частотой $\omega_0 = 2\pi/T_0$ для первой гармоники в сигнале на входе реле, A_0 – амплитуда колебаний для первой гармоники в сигнале на входе реле. Данный метод, который получил название как «тест с релейной обратной связью», позволяет ускорить и автоматизировать процесс настройки параметров регулятора [8, 9].

В представленной работе обсуждается одноканальный испытательный стенд, который содержит электрогидропривод с имитатором нагрузки. В результате экспериментальных исследований динамических характеристик стенда была получена упрощенная математическая модель в виде интегратора с коэффициентом усиления g и последовательно включенного звена запаздывания τ [5]

$$(3) \quad \dot{y}(t) = g u(t - \tau),$$

где величина формируемой с помощью гидропривода силы измеряется динамометром, выходной сигнал которого $y(t)$ поступает в контроллер. В контроллере осуществляется реализация алгоритма управления и формируется управляющее воздействие $u(t)$ для агрегата управления гидроприводом. Контроллер формирует сигнал в диапазоне от -10В до $+10\text{В}$, где 10В принимается за 100% . Агрегат управления осуществляет управление золотником, который регулирует подачу масла высокого давления в гидроцилиндр. Математическая модель вида (3) описывает основную, доминирующую динамику стенда в условиях гипотезы относительной малости скорости формируемых процессов силового нагружения.

С целью идентификации параметров g и τ для математической модели стенда (3) предлагается выполнить эксперимент на стенде с релейным алгоритмом управления

$$(4) \quad u(t) = u_0 \text{sign}[r - y(t)],$$

где $r = \text{const}$. Например, полагаем $r = 0$. Из результатов экспериментального теста на стенде с релейной обратной связью (4) получаем оценки для периода T_0 и амплитуды A_0 первой гармоники колебаний в сигнале на входе реле. В тоже время, применяя метод гармонического баланса для системы (3) и (4), получим следующие соотношения:

$$(5) \quad g = \frac{\pi^2 A_0}{2u_0 T_0}, \tau = \frac{T_0}{4}.$$

Таким образом, из результатов теста с релейной обратной связью (4) получаем величины A_0 и T_0 , на основе которых по соотношениям (5) вычисляем оценки для параметров g и τ . Длительность теста на стенде с релейной обратной связью (4) может составлять от 5 до 10 периодов T_0 , что на практике не превышает одной секунды.

3. Расчет параметров регулятора стенда на основе метода разделения движений и теста с релейной обратной связью

В силу того, что упрощенная модель вида (3) не учитывает динамические процессы более высокого порядка и нелинейность характеристик реального гидропривода, поэтому предлагается выполнить расчет параметров ПИ регулятора для испытательного стенда на основе метода разделения движений [10-12], который позволяет обеспечить желаемые динамические характеристики системы управления в условиях неполной информации о параметрах стенда. 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 δ – абсолютное значение максимальной допустимой ошибки формирования силы нагружения $r(t)$, $\delta > 0$. Рассмотрим ПИ алгоритм управления, представленный в виде

$$(6) \quad \mu \dot{u}(t) = k_0 [\dot{e}(t) + T^{-1}e(t)],$$

где μ рассматривается как малый положительный параметр алгоритма управления. При переходе от выражения (6) к передаточной функции (1), получим

$$(7) \quad k_c = k_0/\mu, T_i = T.$$

В соответствии с (3) и (6), получим уравнения замкнутой системы управления

$$(8) \quad \begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{r}(t) - g u(t - \tau), \\ \mu \dot{u}(t) &= k_0 [\dot{e}(t) + T^{-1}e(t)]. \end{aligned}$$

Заменим $\dot{e}(t)$ во втором уравнении системы (8) правой частью первого уравнения данной системы. Получим

$$(9) \quad \begin{aligned} \dot{e}(t) &= \bar{r}(t) - g u(t - \tau), \\ \mu \dot{u}(t) &= -k_0 g u(t - \tau) + k_0 [\bar{r}(t) + T^{-1}e(t)], \end{aligned}$$

где $\bar{r} = \dot{r}(t)$ и $|\bar{r}| \leq \bar{r}_{\max}$ в силу ограниченности скорости формируемых процессов силового нагружения. Система (9) относится к классу сингулярно-возмущенных систем дифференциальных уравнений с малым положительным параметром μ , где при уменьшении параметра μ происходит формирование быстрых и медленных процессов в данной системе. Уравнение подсистемы быстрых движений (ПБД) имеет вид

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

где $e(t)$ и $\bar{r}(t)$ рассматриваются как замороженные величины на интервале времени переходных процессов в ПБД (10). Предполагая устойчивость быстрых процессов и квазиравновесный режим ПБД (10), получим уравнение подсистемы медленных движений (ПМД) вида $T\dot{e} + e = 0$, где выбором параметра регулятора T можно обеспечить желаемое время переходных процессов для ошибки регулирования $e(t)$.

Применяя критерий Найквиста, найдем величину запаса устойчивости по фазе φ_0 в ПБД (10), где

$$(11) \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\tau g k_0}{\mu}.$$

Предлагается выбрать запас устойчивости по фазе φ_0 для ПБД, где $0 < \varphi_0 < \pi/2$, и степень разделения темпов быстрых и медленных процессов η , например, $\eta \approx 10$. При заданных величинах φ_0 и η , в соответствии с методом разделения движений [10], вычисляем параметры регулятора по формулам

$$(12) \quad k_0 = 1/g, \mu = \frac{\tau}{0,5\pi - \varphi_0}, T \approx \eta\mu.$$

Из результатов эксперимента с релейной обратной связью (4), а также соотношений (5), (7) и (12), получаем расчетные формулы для выбора параметров ПИ регулятора

$$(13) \quad k_c = \frac{4u_0(\pi - 2\varphi_0)}{\pi^2 A_0}, T_i = \frac{\eta T_0}{2(\pi - 2\varphi_0)}.$$

4. Результаты эксперимента

На рис. 1 приведены результаты эксперимента на стенде с релейным алгоритмом управления (4), на основе которого были получены оценки для A_0 and T_0 . Затем, параметры ПИ регулятора (1) были найдены по соотношениям (13), где $\varphi_0 = 0.6$ и $\eta = 10$. На рис. 2 приведены результаты эксперимента на стенде для полученных значений параметров ПИ регулятора.

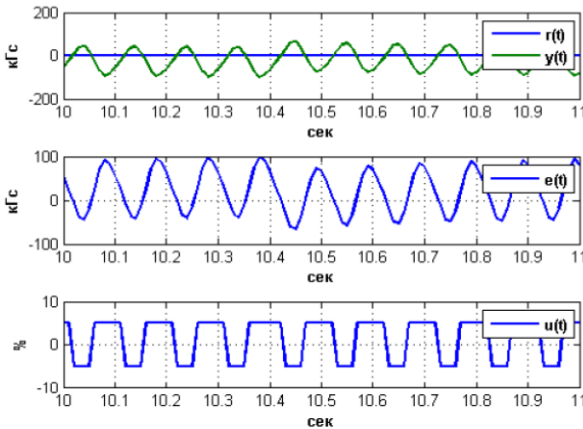


Рис. 1. Результаты эксперимента на стенде с релейным алгоритмом управления.

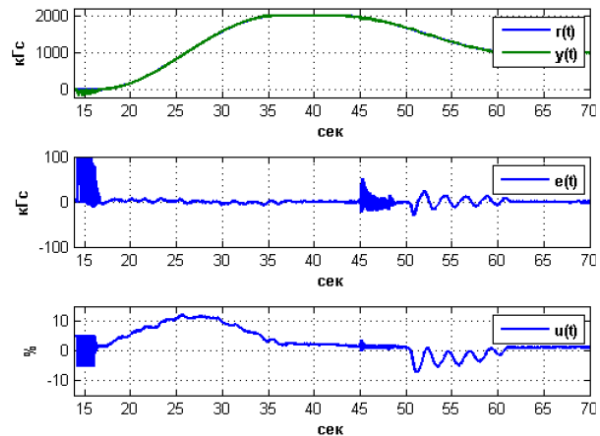


Рис. 2. Результаты эксперимента на стенде с ПИ регулятором.

Таким образом, применение релейного теста и метода разделения движений для расчета параметров ПИ регулятора позволяет получить вместо эмпирических соотношений (2) расчетные формулы (13) для настройки параметров ПИ регулятора стенда прочностных испытаний элементов авиационных конструкций в соответствии с требованиями на запас устойчивости по фазе в ПБД и величину степени разделения темпов быстрых и медленных процессов в замкнутой системе управления.

Список литературы

1. Присекин В. Л., Белоусов А. И. Алгоритмы управления нагружением в испытательных стендах // Научный вестник Новосибирского гос. техн. ун-та. 2000. № 1(8). С. 3-11.
2. Куликов Е.Н., Сабельников В.И., Колеватов Ю.В., Фадеев А.М., Медведева И.Н. Гидропривод лаборатории статических и ресурсных испытаний натуральных авиационных конструкций // Авиационная промышленность. 2008. № 2. С. 53-56.
3. 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. 145-149.
4. Васюков Е.В., Гайворонский А.И., Данилова Д.А., Жигачев К.В., Стародумова А.В., Тимошин А.С. Опыт применения автоматизированной системы управления нагружением при статических и ресурсных испытаниях конструкций ракетной и космической техники // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 3 (76). С. 29-32.
5. Лапердин А. И., Юркевич В. Д. Экспериментальное исследование динамических свойств канала нагружения стенда для прочностных испытаний авиационных конструкций // Научный вестник Новосибирского гос. техн. ун-та. 2016. № 1 (62). С. 168-180.
6. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 1942. Vol. 64. P. 759-768.
7. Åström K. J., Hagglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins // Automatica. 1984. Vol. 20. P. 645-651.
8. Yu C.-C. Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach / 2nd Edition. New York: Springer, , 2006. 261 p.
9. Boiko I. Non-parametric Tuning of PID Controllers: Modified Relay Feedback Test Approach. London: Springer, 2013. 187 p.
10. Юркевич В.Д. Расчет и настройка регуляторов для нелинейных систем с разнотемповыми процессами // Автометрия. 2012. Т. 48, № 5. С. 24-31.
11. Юркевич В.Д. Расчет типовых регуляторов для нелинейных систем с запаздыванием методом разделения движений // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1(25). Ч 1. С. 122-126.
12. Лапердин А.И., Юркевич В.Д. Разработка адаптивного алгоритма управления стендом прочностных испытаний авиационных конструкций // Автометрия. 2017. Т. 53, № 4. С. 51-58.