

ЧАСТОТНЫЙ АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР с заданным интервалом дискретности

А.Г. Александров

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: alex7@ipu.rssi.ru

Д.Г. Кариков

Электростальский Политехнический Институт

Россия, 144001, Московская обл. г. Электросталь, Первомайская ул., 7

E-mail: dima74378@yandex.ru

Е.Ю. Курицына

ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения»

Россия, 144005, Московская обл. г. Электросталь, Красная ул., 19

E-mail: KuritsinaEY@rambler.ru

Ключевые слова: адаптивное управление, частотная идентификация, программное обеспечение, экспериментальные исследования

Key words: adaptive control, frequency identification, software, experimental investigations

Приводятся структура и результаты экспериментального исследования частотного адаптивного регулятора ЧАР-21Д. ЧАР-21Д – это программа на языке C для IBM-совместимого компьютера, содержащего аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи для связи с реальным объектом управления. ЧАР-21Д предназначен для управления объектом с неизвестными коэффициентами, находящимся под воздействием неизвестного ограниченного внешнего возмущения. Интервал дискретности измерений выхода объекта задан. Цель управления – обеспечение заданного допуска на регулируемую переменную объекта. При экспериментальных исследованиях исследовался физический аналог объекта (ФАО), который является электронным устройством, описываемым дифференциальным уравнением. ФАО содержит источник внешних возмущений, от которых зависит значение регулируемой переменной. Подключение ЧАР-21Д к ФАО позволило уменьшить это значение более чем на порядок.

FREQUENCY ADAPTIVE CONTROLLER CHAR-21 / A.G. Alexandrov (Institute of Control Sciences, 65 Profsoyuznaya, Moscow 117997, Russia, E-mail: alex7@ipu.rssi.ru), D.G. Karikov (Electrostral Polytechnic Institute, 7 Pervomayskaya, Electrostral 144001, Moscow region, Russia, E-mail: dima74378@yandex.ru), E.Y. Kuritsina. (Electrostral Heavy Engineering Work, 19 Krasnaya, Electrostral 144005, Moscow region, Russia, E-mail: KuritsinaEY@rambler.ru) Results of experimental investigations of the frequency adaptive controller CHAR-21D are given. The CHAR-21D is a program in language C for a computer (compatible with IBM). The computer contains analog-digital and digital-analog converters for a link with a controlled plant. CHAR-21D intends for a control of the plant whose coefficients are unknown and an external disturbance is an unknown - but - bounded function. A control aim is a given tolerance for plant output. A plant physical model (PPM), which is a electronic device, is used in the experiments. The PPM contains a source of the external disturbance. The plant output depends on the external disturbance. After closing of the PPM by CHAR-21D the plant output decrease more than the ten time.

1. Введение

Адаптивное управление развивается в нескольких направлениях.

Наибольшее число реальных ситуаций охватывает случай, когда целью управления является обеспечение заданного допуска на модуль регулируемой переменной, а внешнее возмущение – неизвестная ограниченная функция.

Первая реализация частотного адаптивного управления, использующего алгоритм предложенный в [1], описана в работе [2]. Затем на основе не идентификационного алгоритма адаптивного управления [3] были разработаны адаптивные регуляторы ЧАР-5 [4] и ЧАР-6 [5], область применения которых была ограничена минимально - фазовыми объектами. Экспериментальное исследование ЧАР-6 [5] выявило высокую чувствительность системы к величине интервала дискретности. Чтобы избежать такой чувствительности, а также с целью расширения классов объектов (включающих не минимально - фазовые) был предложен [6] алгоритм идентификационного адаптивного управления, реализованный в регуляторе ЧАР-14 [7].

Последние 10 лет развития метода конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления [8]-[11] позволили построить алгоритм самонастройки амплитуд гармоник испытательного сигнала и длительности адаптации [9], а также метод определения границ испытательных частот [8]. Это дает возможность адаптивного управления с существенно меньшими сведениями об объекте.

В работе [12] описан ЧАР-21, в котором реализованы многие из этих алгоритмов. При этом интервал дискретности измерения выхода объекта достаточно мал.

В настоящей же работе результаты, полученные в [12], развиваются на случай заданного интервала дискретности, который может быть велик.

2. Назначение и область применения

2.1. Назначение

Частотный адаптивный регулятор ЧАР21Д – это программа на языке С для IBM-совместимого компьютера, снабженного аналого-цифровым (АЦП) и цифро-аналоговым (ЦАП) преобразователями для связи с реальным объектом управления. С помощью этой программы сигнал с измерительного устройства объекта преобразуется в управляющий сигнала так, чтобы выход объекта не превышал заданной величины.

Чтобы более точно описать цели управления и возможности ЧАР-21Д, рассмотрим асимптотически устойчивый объект, описываемый разностным уравнением:

$$(1) \quad y[(k+n)h] + d_{n-1}y[(k+n-1)h] + \dots + d_1y[(k+1)h] + d_0y[kh] = k_{n-1}u[(k+n-1)h] + \dots + k_1u[(k+1)h] + k_0u[kh] + f(kh), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

где $y(kh)$ – измеряемый выход; $u(kh)$ – управление, имеющее кусочно-постоянный вид; $f(kh)$ – неизвестное ограниченное возмущение: $|f(kh)| \leq f^*$, где f^* – заданное число. Коэффициенты d_i и k_j ($i = \overline{0, n-1}$, $j = \overline{0, \gamma}$) – неизвестные числа, n – известное число, k – номер такта, h – период дискретности.

Адаптивное управление объектом (1) формируется регулятором с кусочно-постоянными коэффициентами:

$$(2) \quad g_{n-1}^{[i]}u[(k+n-1)h] + \dots + g_1^{[i]}u[(k+1)h] + g_0^{[i]}u[kh] = r_{n-1}^{[i]}(y[(k+n-1)h] + v_{[i]}[(k+n-1)h]) + \dots + r_1^{[i]}(y[(k+1)h] + v_{[i]}[(k+1)h]) + r_0^{[i]}(y[kh] + v_{[i]}[kh]), \quad i = \overline{1, N},$$

где i – номер интервала адаптации ($i = \overline{1, N}$), $v_{[i]}(kh)$ – испытательный сигнал.

По окончании адаптации регулятор имеет вид:

$$(3) \quad g_{n-1}u[(k+n-1)h] + \dots + g_1u[kh] + g_0u = r_{n-1}y[(k+n-1)h] + \dots + r_1y[(k+1)h] + r_0y[kh],$$

и обеспечивает выполнение требования к точности (цель управления):

$$(4) \quad |y(kh)| \leq y^*, \quad t \geq t_N,$$

где y^* – заданное число.

Предполагается, что существует регулятор (3), обеспечивающий достижение цели (4), когда коэффициенты объекта (1) известны.

Если после окончания процесса адаптации коэффициенты объекта (1) изменились достаточно сильно, так, что целевое неравенство (4) нарушилось, то процесс адаптации повторяется.

Измерительное устройство, формирующее сигнал $y(k)$ имеет естественный предел y_- и поэтому в процесс адаптивного управления выход объекта не должен превышать этой величины:

$$(5) \quad |y(kh)| \leq y_-, \quad t \geq t_0.$$

Формируемый регулятором сигнал $u(t)$ поступает на вход исполнительного устройства объекта, также не должен превышать заданного значения u_- :

$$|u(kh)| \leq u_-.$$

2.2. Область применения

ЧАР-21Д используется в ситуациях, когда динамика объекта управления описывается линейным дифференциальным уравнением. Коэффициенты этого уравнения неизвестны, а о внешних возмущениях, действующих на объект, известно лишь, что оно ограничено известным числом (f^*).

Кроме того, должно быть известно следующее:

- порядок (n) дифференциального уравнения объекта;
- оценка нижней (ω_l) границы собственных частот объекта (собственные частоты объекта [9] – это положительные числа, обратные постоянным времени объекта. Геометрически – это частоты излома ЛАЧХ объекта), а также диапазон собственных частот объекта M .

Ограничение б) возможностей ЧАР-21Д будет снято в последующих версиях ЧАР, так как в работах [8], [9] проложен метод оценивания нижней и верхней границ собственных частот объекта. Ограничение а) тоже может быть ослаблено.

2.3. Исходные данные

Исходными данными для работы ЧАР-21Д являются:

- требуемая точность управления – y^* ;
- граница внешнего возмущения – f^* ;
- предел измерений выхода объекта y_- ;
- предельное значение входа исполнительного устройства – u_- ;

е) порядок (n) уравнения объекта и оценка верхней границы частоты объекта и диапазон частот – ω_l и M .

Кроме того, для настройки ЧАР-21Д на конкретный класс объектов управления могут быть заданы параметры алгоритма адаптации:

- начальное число базовых периодов идентификации p_n ;
- максимальное число удвоений базовых периодов p_{\max} ;
- границы коэффициентов динамической корреляции δ_α и δ_β .

Описание этих параметров приводится ниже.

3. Структура

3.1. Структурная схема

На рис. 1 приведена структурная схема регулятора с объектом, совпадающая с [12]

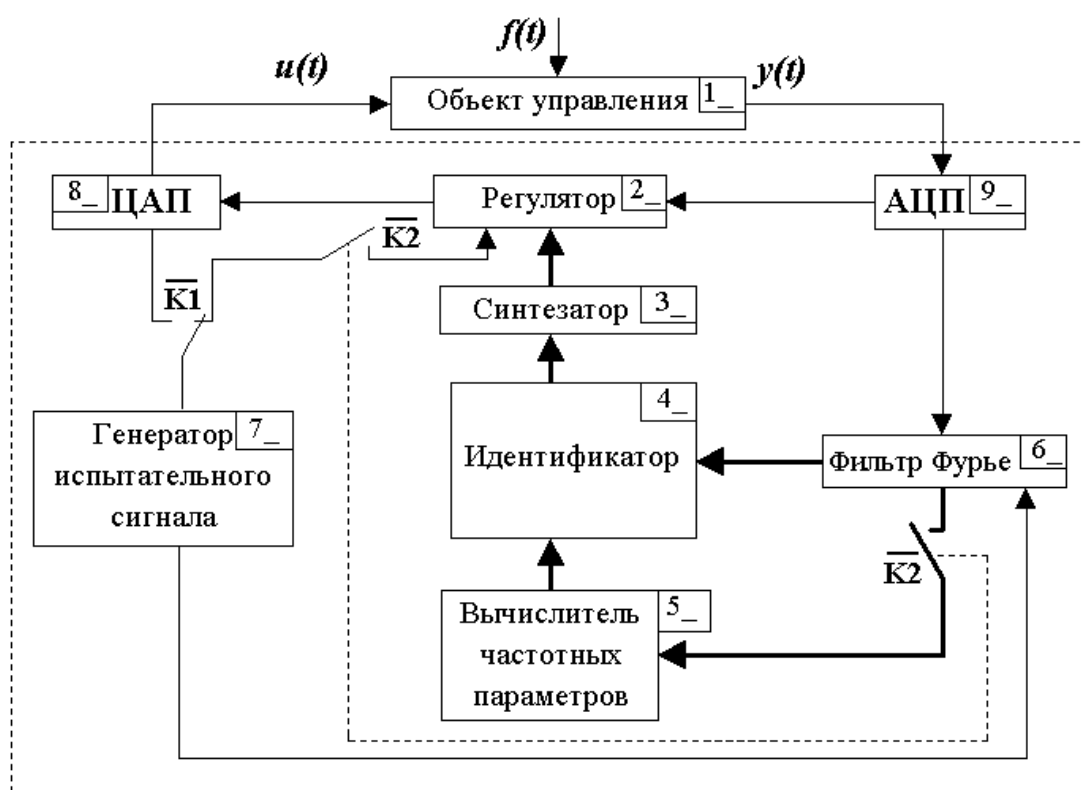


Рисунок 1. Структурная схема ЧАР-21Д

3.2. Генератор испытательного сигнала

Он формирует функцию

$$(6) \quad u(kh) = \rho \sin(\omega[kh]),$$

где ρ – амплитуда испытательного сигнала, ω – его частота.

Эта функция после преобразования ЦАП (8_) поступает в виде физического сигнала (напряжения) на объект управления (в этом случае ключ $\overline{K1}$ замкнут, а $\overline{K2}$ разомкнут) либо эта функция прикладывается к регулятору (2_) (ключ $\overline{K2}$ замкнут, а $\overline{K1}$ разомкнут).

Амплитуда ρ сигнала (6) находится путем уменьшения его значения, начиная с $\rho = u_-$, пока не выполнится требование (5) к выходу объекта (при выполнении требования (5) искомое $\rho^* = u_-$). Длительность интервалов испытаний кратна базовому периоду: $\tau_b = \frac{2\pi}{\omega_l}$.

По окончании процесса настройки амплитуды, когда найдена искомая амплитуда ρ^* , вычисляется показатель интенсивности испытательного сигнала

$$\chi = \frac{|y_{\max} - \overline{y}_{\max}|}{|y_{\max}|},$$

где

$$\overline{y}_{\max} = \max_{k_F + \frac{k_T h}{2} \leq t \leq k_F + k_T h} |\overline{y}(k)|, \quad y_{\max} = \max_{k_F + \frac{3k_T h}{2} \leq t \leq k_F + 2k_T h} |y(k)|,$$

где $\overline{y}(k)$ – «естественный» выход объекта, когда $u(k) = 0$, k_F – такт начала фильтрации

Если $\chi < 0.1$, то на экран выводится сообщение «Испытательный сигнал слишком мал».

Для определения испытательных частот используются априорные оценки $\widehat{\omega}_l$ и $\widehat{\omega}_u$ нижней и верхней границ собственных частот объекта, где $\widehat{\omega}_u$ находится как $\widehat{\omega}_l M$:

$$(7) \quad \log \omega_k = \log \widehat{\omega}_l + (k-1) \frac{\log \widehat{\omega}_u - \log \widehat{\omega}_l}{n-1}, \quad \omega_1 = \widehat{\omega}_l, \quad (k = \overline{2, n}).$$

3.3. Фильтр Фурье

Фильтр Фурье (6_) – вычисляет оценки частотных параметров объекта, либо системы:

$$(8) \quad \begin{aligned} \widehat{\alpha} &= \alpha(\tau) = \frac{2}{\rho\tau} \sum_{k=1}^{\infty} y(kh) \sin \omega k h \\ \widehat{\beta} &= \beta(\tau) = \frac{2}{\rho\tau} \sum_{k=1}^{\infty} y(kh) \sin \omega k h \end{aligned}$$

Время фильтрации τ определяется из условий

$$(9) \quad K_\alpha(\tau) \leq \delta_\alpha, \quad K_\beta(\tau) \leq \delta_\beta,$$

где числа $K_\alpha(\tau)$, $K_\beta(\tau)$ определяются, как:

$$K_\alpha(\tau) = \left| \frac{\overline{\alpha}(\tau)}{\alpha(\tau)} \right|, \quad K_\beta(\tau) = \left| \frac{\overline{\beta}(\tau)}{\beta(\tau)} \right|,$$

в которых $\overline{\alpha}(\tau)$ и $\overline{\beta}(\tau)$ – выходы фильтра Фурье (8) при $y(kh) = \overline{y}(kh)$, δ_α и δ_β – заданные числа – параметры алгоритма самонастройки длительности идентификации (по умолчанию $\delta_\alpha = \delta_\beta = 10^{-3}$). Числа K_α и K_β называются коэффициентами динамической корреляции. Они характеризуют связь внешнего возмущения и испытательного сигнала. Если такая связь отсутствует, то $\lim_{\tau \rightarrow \infty} K_\alpha(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} K_\beta(\tau) = 0$.

3.4. Идентификатор

Идентификатор (4₋) решает частотные уравнения:

$$k(e^{j\omega h}) - (\widehat{\alpha}_i + j\widehat{\beta}_i)d(e^{j\omega h}) = (\alpha_i + j\beta_i)(e^{j\omega h})^n, \quad i = \overline{1, n},$$

где $k(z) = k_\gamma z_i^\gamma + \dots + k_0$, $d(z) = d_{n-1} z_i^{n-1} + \dots + d_1 z_i$ – полиномы объекта, и находит оценки коэффициентов объекта $\widehat{k}_i, \widehat{d}_i, i = \overline{0, \gamma}$.

3.5. Синтезатор

Синтезатор (3₋) находит коэффициенты регулятора (2₋), описываемого уравнением (3) так, чтобы выполнялись требования к точности регулирования (4). При этом используются оценки коэффициентов объекта.

В основе алгоритма синтезатора лежит решение задачи АКОР (LQ-оптимизации) с функционалом:

$$J = \sum \left\{ x^T(k) Q x(k) + u^2(k) + \varepsilon_1^2 \left[\frac{u(k+1) - u(k)}{h} \right]^2 + \varepsilon_2^2 \left[\frac{u(k+2) - u(k+1)}{h} \right]^2 + \dots + \varepsilon_\phi^2 \left[\frac{u(k+\phi) - u(k+\phi-1)}{h} \right]^2 \right\},$$

где

$x(k)$ – вектор переменных состояния идентифицированного объекта (1),

ε_i ($i = \overline{1, \psi}$) – достаточно малый коэффициент, определяемый по [13] из условия реализуемости передаточной функции регулятора,

$Q = C^T q C$ – положительно-определенная матрица в которой коэффициент q определяется по формуле:

$$q^2 = \frac{f^{*2}}{y^{*2}}.$$

C – вектор идентифицированного объекта (1), записанного в форме пространства состояний ($y = Cx + Du$).

Функционал минимизируется, и результат находится путем решения уравнения Риккати и прямого алгоритма восстановления.

3.6. Вычислитель частотных параметров

Вычислитель частотных параметров (5₋) используется в случае, когда объект замкнут регулятором (2₋) и тогда выход фильтра Фурье дает оценки частотных параметров замкнутой системы, используя которые можно вычислить частотные параметры объекта.

Вычисление частотных параметров объекта осуществляется по формулам:

$$(10) \quad \begin{aligned} \widehat{\alpha}_i &= \operatorname{Re} \left[\frac{\widehat{\alpha}_i^{clos} + j\widehat{\beta}_i^{clos}}{(\alpha_i^{clos} + j\beta_i^{clos} + 1)W_c(e^{j\omega h})} \right], \\ \widehat{\beta}_i &= \operatorname{Im} \left[\frac{\widehat{\alpha}_i^{clos} + j\widehat{\beta}_i^{clos}}{(\alpha_i^{clos} + j\beta_i^{clos} + 1)W_c(e^{j\omega h})} \right], \end{aligned}$$

где $\widehat{\alpha}_i^{clos}, \widehat{\beta}_i^{clos}$ – оценки частотных параметров замкнутой системы, $W_c(s)$ – известная передаточная функция регулятора.

3.7. Алгоритм адаптивного управления

Алгоритм адаптивного управления аналогичен, описанному в [12] для малых интервалов дискретности.

4. Стенд для экспериментальных исследований

4.1. Структура стенда

Для экспериментального исследования ЧАР-21Д был использован стенд описанный в [12]. Он состоит из IBM-совместимого компьютера, платы расширения L-780, содержащей аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП), позволяющие ЭВМ принимать и выводить аналоговые сигналы, и физического аналога объекта (ФАО).

4.2. Физический аналог объекта (ФАО)

Физический аналог объекта представляет собой электронное устройство, собранное на операционных усилителях и пассивных элементах, описываемое дифференциальным уравнением третьего порядка. ФАО имеет встроенный источник возмущений.

Принципиальная схема ФАО с источником возмущений приведена в [12].

Передаточная функция ФАО имеет вид:

$$(11) \quad W_{\text{ФАО}}(s) = \frac{5000}{s^3 + 62s^2 + 2620s + 5000} = \frac{1}{(0.5s + 1)(0.02^2 s^2 + 2 \cdot 0.6 \cdot 0.02s + 1)}$$

5. Экспериментальное исследование

5.1. Исходные данные

Исходными данными для работы ЧАР-21Д являлись:

требуемая точность управления – $y^* = 0.025$;

граница внешнего возмущения – $f^* = 1$;

граница измерения выхода объекта $y_{\text{н}} = 1$;

предельное значение входа объекта $u_{\text{н}} = 4$;

порядок объекта $n = 3$;

оценки границ собственных частот объекта $\hat{\omega}_l = 3.0$, $\hat{\omega}_u = 60$, и замкнутой системы $\omega_l^{\text{clos}} = 5$, $\omega_u^{\text{clos}} = 50$.

Для сокращения времени адаптации были приняты следующие значения параметров алгоритма идентификации объекта

$$p_n = 2, \quad p_{\text{max}} = 15, \quad \delta_\alpha = \delta_\beta = 0.05,$$

и замкнутой системы

$$p_n^{\text{clos}} = 3, \quad p_{\text{max}}^{\text{clos}} = 15, \quad \delta_\alpha^{\text{clos}} = \delta_\beta^{\text{clos}} = 0.01.$$

Внешнее возмущение имело вид, показанный на рис. 2. Выход объекта (без регулятора), возбужденный этим возмущением, приводится на рис. 3.

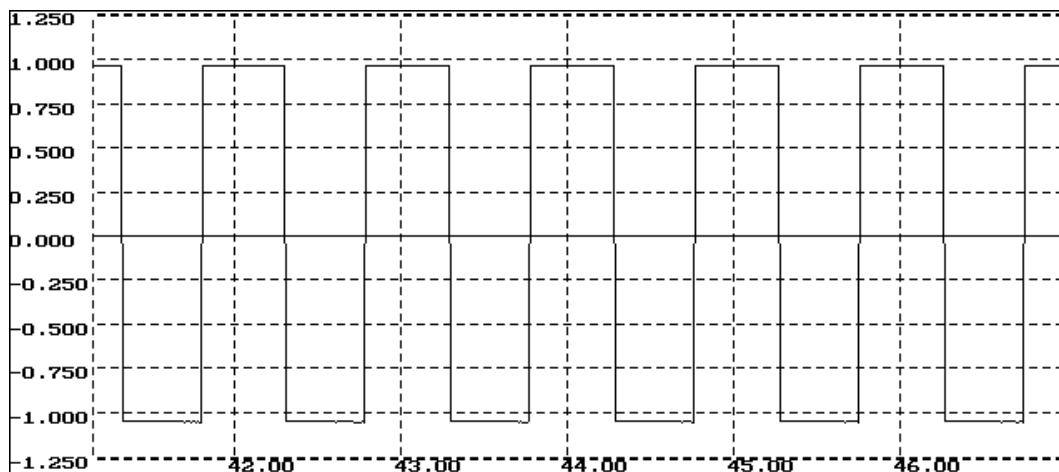


Рисунок 2 – Внешнее возмущение

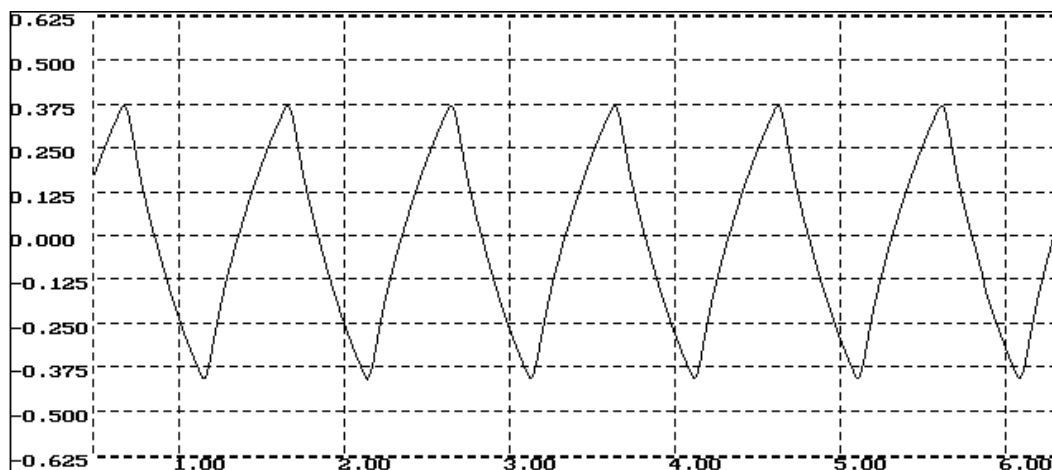


Рисунок 3 - Реакция объекта на возмущение

5.2. Результаты адаптации

В результате адаптации в течение 1396 секунд получен дискретный регулятор (3) с передаточной функцией:

$$W_{D\ddot{A}\ddot{A}2}(z) = \frac{-559.591z^2 + 918.673z - 389.150}{z^2 + 0.341z - 0.289}$$

На рис. 4 приведен график выхода объекта с этим регулятором. Сравнение графиков на рис. 3 и рис. 4 показывает высокую эффективность регулятора. Ошибка $|y(t)| \leq 0.03$, уменьшилась более чем в 10 раз.

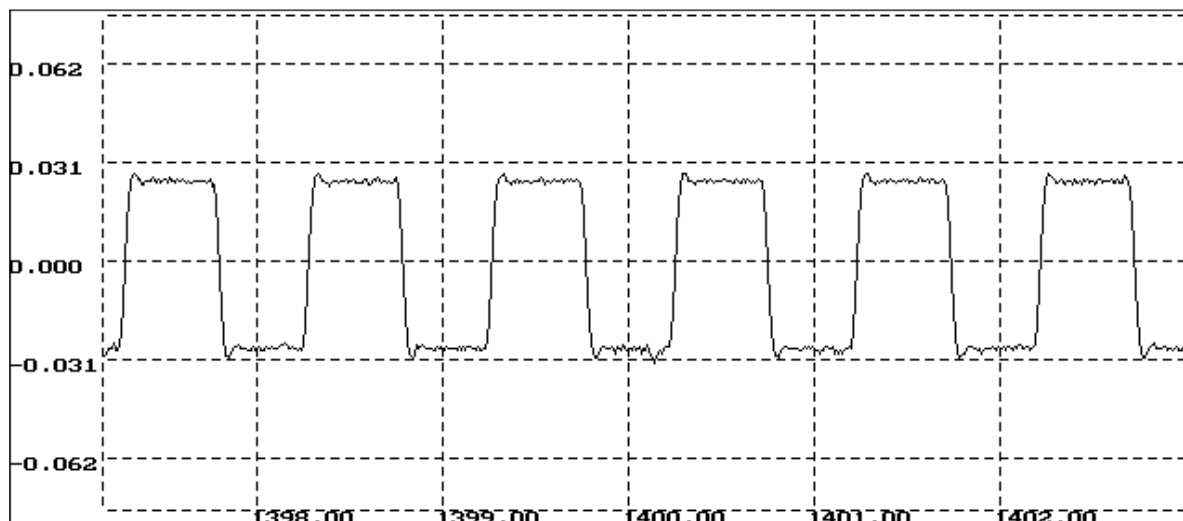


Рисунок 4 - Выход объекта с регулятором при действии внешних возмущений

5.3. Промежуточные результаты адаптации

5.3.1. Идентификация объекта. Испытательные частоты определялись по формуле (7) и имели следующие значения:

$$\omega_1 = 2.999, \quad \omega_2 = 13.368, \quad \omega_3 = 59.839.$$

В таблице 1 приведены результаты самонастройки амплитуды испытательного сигнала.

Таблица 1. Результаты самонастройки амплитуды испытательного сигнала

Частота	Число интервалов настройки	Амплитуда после настройки	χ
$\omega_1 = 2.999$	4	1	0.5653
$\omega_2 = 13.368$	1	4	0.6151
$\omega_3 = 59.839$	1	4	0.1799

Ниже, на рис. 5 и рис. 6, приведены графики самонастройки амплитуды для частоты ω_1 .

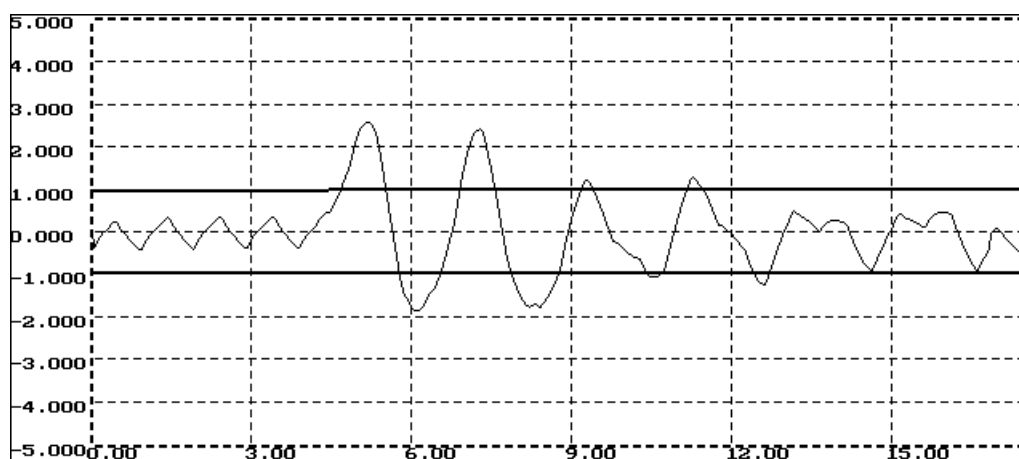


Рисунок 5 - График выхода объекта при настройке амплитуды

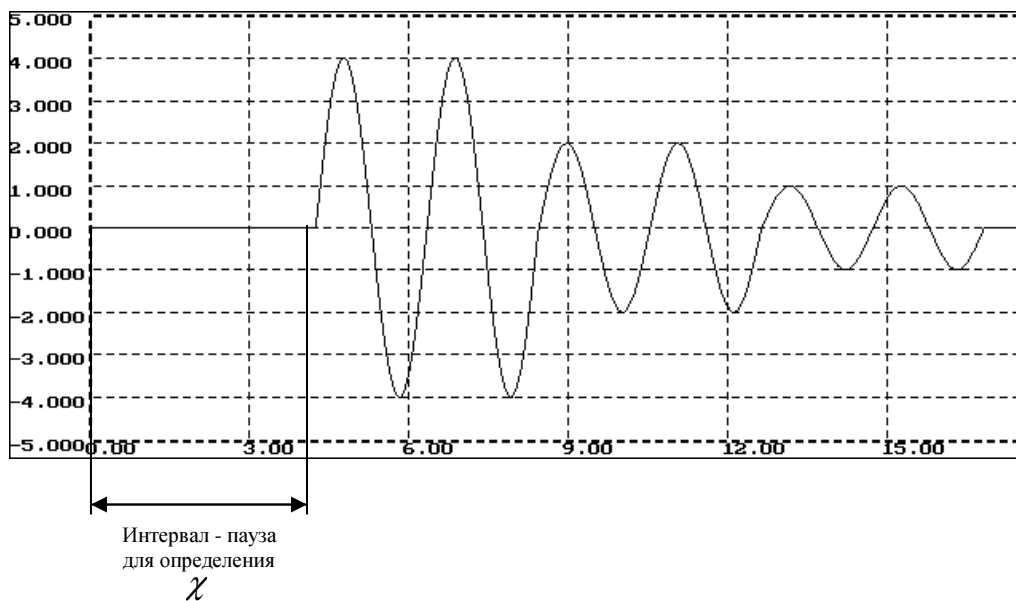


Рисунок 6 - График испытательного сигнала при настройке амплитуды

В таблице 2 приведены численные результаты самонастройки длительности испытательного сигнала.

Таблица 2. Результаты самонастройки длительности испытательного сигнала

Частота	Число интервалов настройки	Результаты				
		α	β	τ	$K_\alpha(\tau)$	$K_\beta(\tau)$
$\omega_1 = 2.999$	4	0.24552	-0.46085	33.52	0.0034	0.0007
$\omega_2 = 13.368$	4	-0.03216	-0.13700	37.6	0.0047	0.0007
$\omega_3 = 59.839$	1	-0.01805	0.02430	4.2	0.0354	0.0243

Ниже, на рис. 7 и рис. 8, приведены графики самонастройки длительности испытательного сигнала для частоты ω_2 .

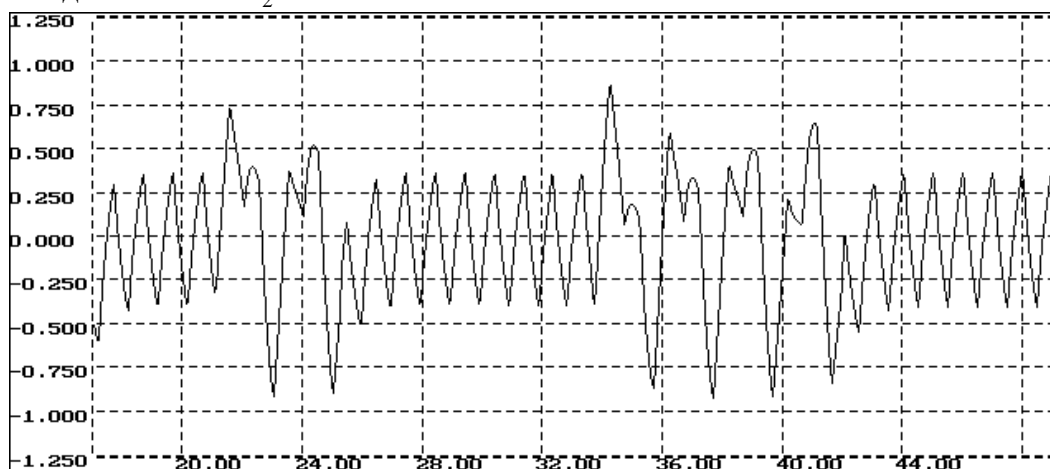


Рисунок 7 - График выхода объекта при настройке длительности

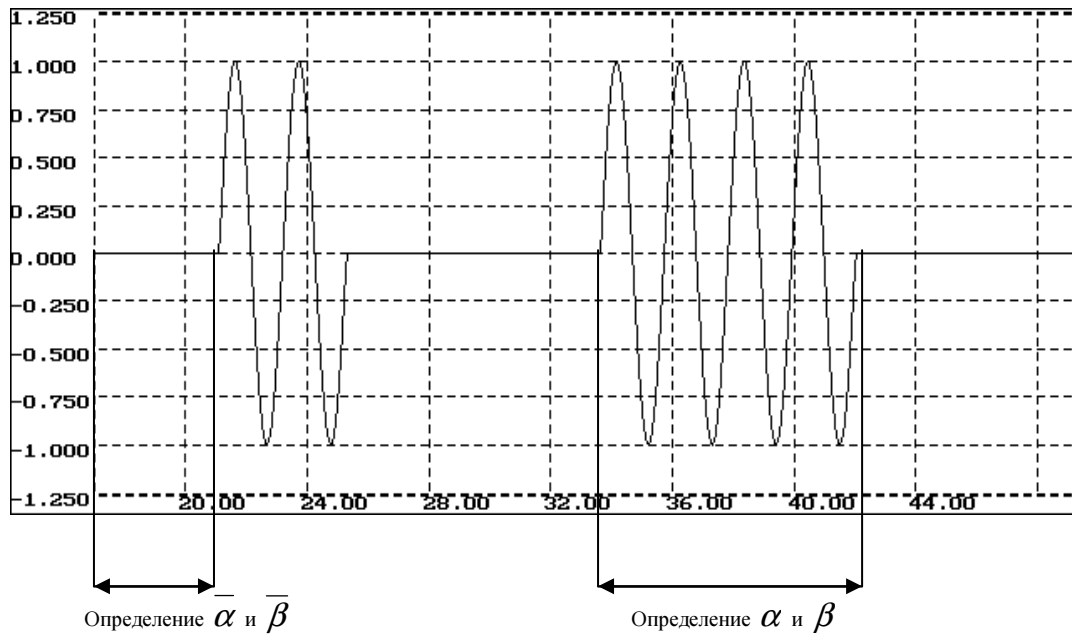


Рисунок 8 - График испытательного сигнала при настройке длительности

Время, затраченное на идентификацию составляет: 309.8 с.

В результате идентификации объекта была найдена следующая дискретная передаточная функция:

$$W_{\bar{I}\bar{A} - \bar{E}\bar{A}}(z) = \frac{0.00009z^2 - 0.00084z + 0.00013}{-1.33z^3 + 3.608z^2 - 3.269z + 1}$$

По найденной передаточной функции объекта был построен регулятор, имеющий передаточную функцию:

$$W_{D\bar{A}\bar{A}}(z) = \frac{-510.849z^2 + 831.437z - 350.488}{z^2 + 0.154z - 0.043}$$

5.3.2. Идентификация объекта в замкнутой системе. По формуле (7) вычислены испытательные частоты для идентификации замкнутой системы:

$$\omega_1^{clos} = 4.987, \quad \omega_2^{clos} = 15.708, \quad \omega_3^{clos} = 48.331.$$

В таблице 3 приведены численные результаты самонастройки амплитуды испытательного сигнала.

Таблица 3. Результаты самонастройки амплитуды испытательного сигнала в замкнутой системе

Частота	Число интервалов настройки (не считая пустого)	Амплитуда после настройки	χ
$\omega_1^{clos} = 4.987$	4	0.62446	0.9474
$\omega_2^{clos} = 15.708$	4	0.30664	0.8949
$\omega_3^{clos} = 48.331$	4	0.07968	0.6966

Ниже, на рис. 9 и рис. 10 приведены графики самонастройки амплитуды в замкнутой системе частоты ω_1^{clos} .

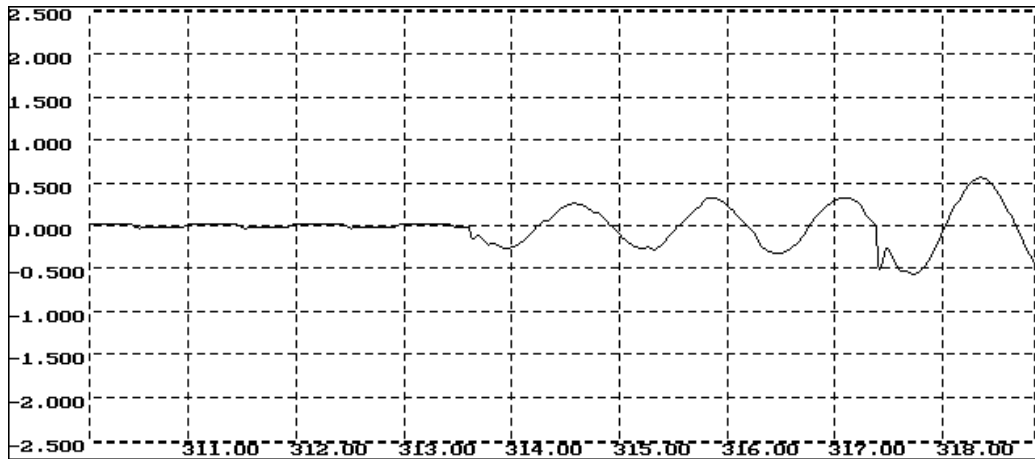


Рисунок 9 - График выхода объекта при настройке амплитуды в замкнутой системе

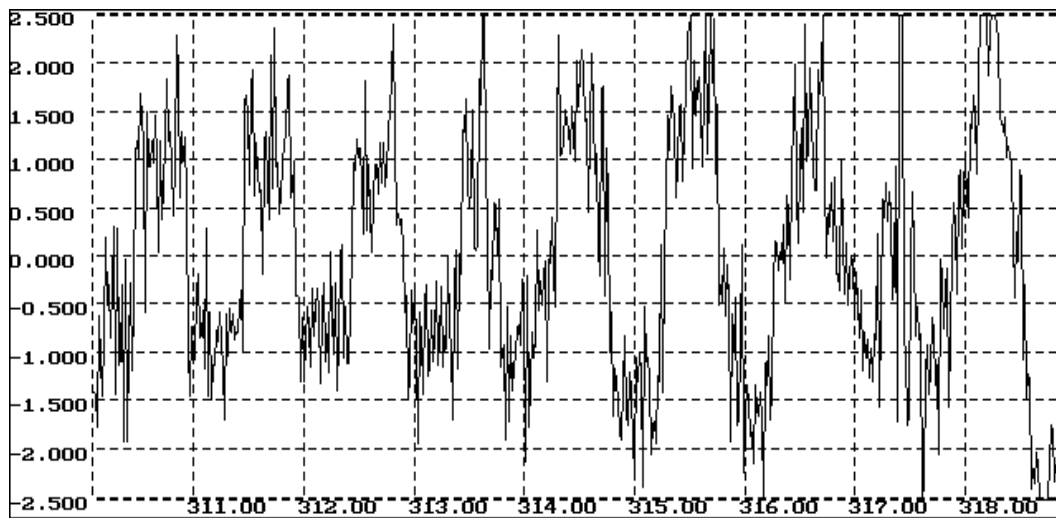


Рисунок 10 - График входа объекта при настройке амплитуды в замкнутой системе

График испытательного сигнала здесь не приводится, так как он существует только программно. Он суммируется с выходом объекта и подается на регулятор, а выход регулятора прикладывается к объекту.

В таблице 4 приведены численные результаты самонастройки длительности испытательного сигнала в замкнутой системе.

Таблица 4. Результаты самонастройки длительности испытательного сигнала в замкнутой системе

Частота	Число интервалов настройки	Результаты				
		α	β	τ	$K_\alpha(\tau)$	$K_\beta(\tau)$
$\omega_1^{clos} = 4.987$	7	-0.95579	0.009254	241.92	0.0004	0.0055
$\omega_2^{clos} = 15.708$	1	-0.90695	0.27197	4.8	0.0013	0.0005
$\omega_3^{clos} = 48.331$	3	-0.61128	0.80069	15.6	0.0061	0.0003

Ниже, на рис. 11 и рис. 12, приведены графики самонастройки длительности испытательного сигнала для частоты ω_1^{clos} .

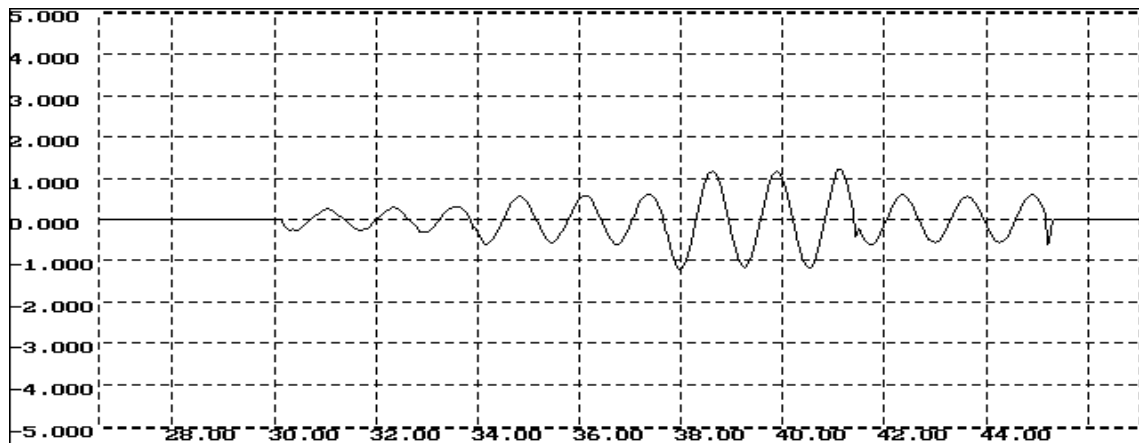


Рисунок 11 - График выхода объекта при настройке длительности в замкнутой системе

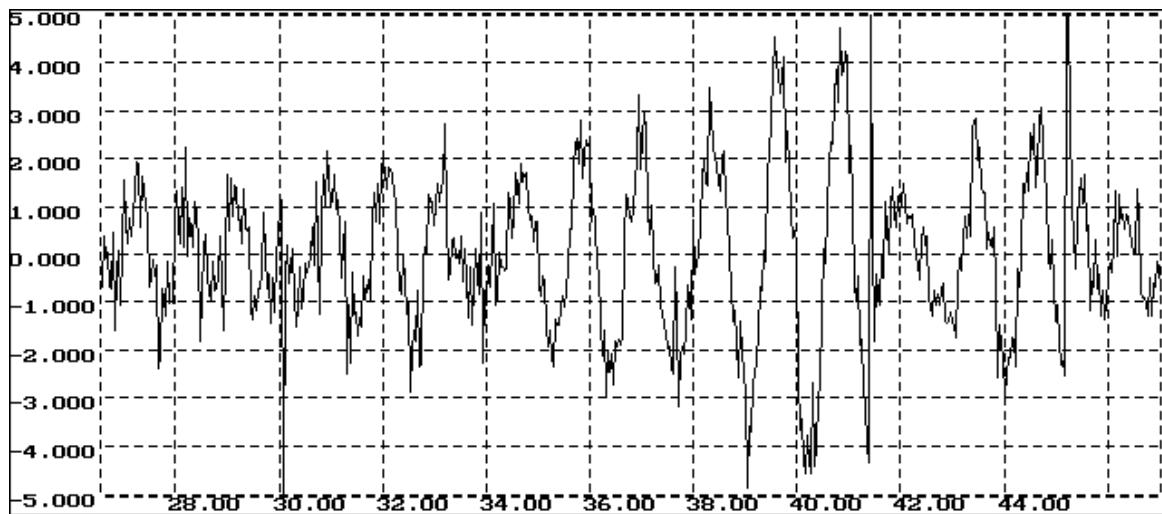


Рисунок 12. - График входа объекта при настройке длительности в замкнутой системе

Время, затраченное на идентификацию объекта в замкнутой системе составляет 1396.72с.

После пересчета частотных параметров по формулам (10) и решения частотных уравнений идентификатором была найдена следующая передаточная функция объекта:

$$W_{\dot{A} _ \dot{A} 2}(z) = \frac{0.0005z^2 - 0.0017z + 0.0007}{-1.3124z^3 + 3.5644z^2 - 3.2525z + 1}$$

Список литературы

1. Александров А.Г. Частотный алгоритм адаптивного управления // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов», Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
2. Трефилов П.А. Частотный адаптивный регулятор ЧАР-1. // Межвузовский научный сборник «Аналитические методы синтеза регуляторов», Саратов: Саратовский политехнический институт, 1984.
3. Александров А.Г. Частотное адаптивное управление. ч. I, II. // АиТ. 1994. № 12. С. 93-104, АиТ. 1995. № 1. С. 117–128.
4. Сперанский К.Р. Экспериментальное исследование частотного адаптивного регулятора ЧАР-5 // Частотное управление, М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 99-122.
5. Александров В.А., Орлов Ю.Ф. Проблемы реализации частотного адаптивного регулятора // Частотное управление, М.: Московский институт стали и сплавов. Научные труды, 1994. С. 123-133.
6. Александров А.Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН «Теория и системы управления». 1995. №2. С. 63-67.
7. Александров А.Г., Богачев А.С. Частотный адаптивный регулятор // Материалы III международной научно-технической конференции «Микропроцессорные системы автоматики», г. Новосибирск, 19-24 февраля 1996 г.
8. Александров А.Г. Конечно-частотная идентификация: граница частот испытательного сигнала // АиТ. 2001. Т. 62. №11.
9. Александров А.Г. Конечная частотная идентификация: самонастройка испытательного сигнала // Сб. научных трудов «Робастное управление и частотная идентификация». Электросталь, ЭПИ МИСиС. 2004.С 67-97.
10. Alexandrov A.G. “Finite-frequency identifacation: selftuning of test signal”. // 16th world congress of IFAC, Preprints, Praha, 2005.
11. Alexandrov A.G., Orlov Ju. F. “Frequency adaptive contrrtol of multivariable plants”. // 15th world congress of IFAC, Preprints, Barcelona, 2002.
12. Частотный адаптивный регулятор ЧАР-21. Труды международной конференции "ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ", Москва,2006, ИПУ, CD-ROM ISBN 5-201-14984-7, стр2361-2381, (соавтор Д.Г. Кариков)
13. Александров А.Г. Синтез регуляторов много мерных систем. // М.: Машиностроение, 1986.