

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ**  
**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ**  
**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8**

**по курсу «Адаптивное и робастное управление»**

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ ПО**  
**ВЫХОДУ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ С**  
**РАСШИРЕННОЙ ОШИБКОЙ**

Вариант № 20

Авторы работы: Кирбаба Д.Д.,

Кравченко Д.В.

Группа: R3438

Преподаватель: Парамонов А.В.

“20” ноября 2023 г.

Работа выполнена с оценкой \_\_\_\_

Дата защиты “\_\_” \_\_\_\_\_ 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы .....	3
2. Постановка задачи.....	3
3. Ход работы .....	4
1. Исходные данные .....	4
2. Способ №1 ( <b><i>bm</i></b> известно).....	4
Математические формулы.....	4
Схема моделирования .....	5
3. Способ №2 ( <b><i>bm</i></b> неизвестно).....	15
4. Схема моделирования системы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5. Моделирование адаптивного наблюдателя при входном сигнале №1	
<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
4. Выводы .....	25

## 1. Цель работы

Освоение метода расширенной ошибки в задаче адаптивного управления линейным объектом по выходу.

## 2. Постановка задачи

Дана минимально-фазовая линейная модель объекта, представленная в форме «ВХОД-ВЫХОД»:

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_0y = b_mu^{(m)} + b_{m-1}u^{(m-1)} + \dots + b_0u,$$

где  $a_i, i = \overline{0, n-1}$ ,  $b_j, j = \overline{0, m-1}$  – неизвестные параметры объекта. Знак величины  $b_m$  известен.

Также даны динамические фильтры:

$$\dot{v}_1 = \Lambda v_1 + e_{n-1}u$$

$$\dot{v}_2 = \Lambda v_2 + e_{n-1}y,$$

где  $v_1, v_2$  – векторы состояния фильтров,  $e_{n-1} = \text{col}(0, \dots, 0, 1)$ . Матрица  $\Lambda$  имеет сопровождающий полином:

$$K(s) = s^{n-1} + k_{n-2}s^{n-2} + \dots + k_0$$

Построим параметризацию выхода системы:

$$y(t) = \frac{1}{K_M(s)} [\psi^T \omega(t) + b_mu(t)] + \delta(t),$$

где  $\omega^T = [v_1^T, v_2^T, y]$ ,  $\delta(t)$  – экспоненциально затухающая функция, зависящая от начальных условий.

Требуется выполнить задачу адаптивного слежения выходной переменной  $y$  за эталонным сигналом  $y_M$ , формируемым эталонной моделью вида:

$$y_M(t) = \frac{k_0}{K_M(s)} [g(t)],$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_M(t) - y(t)\| = 0$$

В работе надо построить два типа следящего адаптивного регулятора: при известном  $b_m$  и при неизвестном  $b_m$ .

### 3. Ход работы

#### 1. Исходные данные

Коэффициенты модели объекта			Параметры полинома $K_M(s)$		Параметр полинома $K(s)$	Сигнал задания $g(t)$
$a_0 = 16$	$a_1 = -8$	$b_0 = 8$	$k_{M_1} = 4$	$k_{M_2} = 4$	$k_0 = 10$	$7\text{sign}(\cos 0.9t)$

Таблица 1. Исходные данные (20 вариант).

#### 2. Способ №1 ( $b_m$ известно)

##### Математические формулы

Закон управления формируется в виде

$$u = \frac{1}{b_m} (\hat{\psi}^T \omega + k_0 g)$$

Введем в рассмотрение сигнал расширенной ошибки:

$$\hat{e} = e - \hat{\psi}^T \bar{\omega}_p + \frac{1}{K_M(s)} [\hat{\psi}^T \omega_p],$$

где  $\omega_p = -\omega$ ,  $\bar{\omega}_p = \frac{1}{K_M(s)} [\omega_p]$ .

Сигнал расширенной ошибки теперь примет вид:

$$\hat{e} = \tilde{\psi}_p^T \bar{\omega}_p.$$

Последнее выражение представляет собой статическую модель ошибки, на базе которой строится алгоритм адаптации

$$\hat{\psi}_p = \gamma \frac{\bar{\omega}_p}{1 + \bar{\omega}_p^T \bar{\omega}_p} \hat{e}.$$

## Схема моделирования

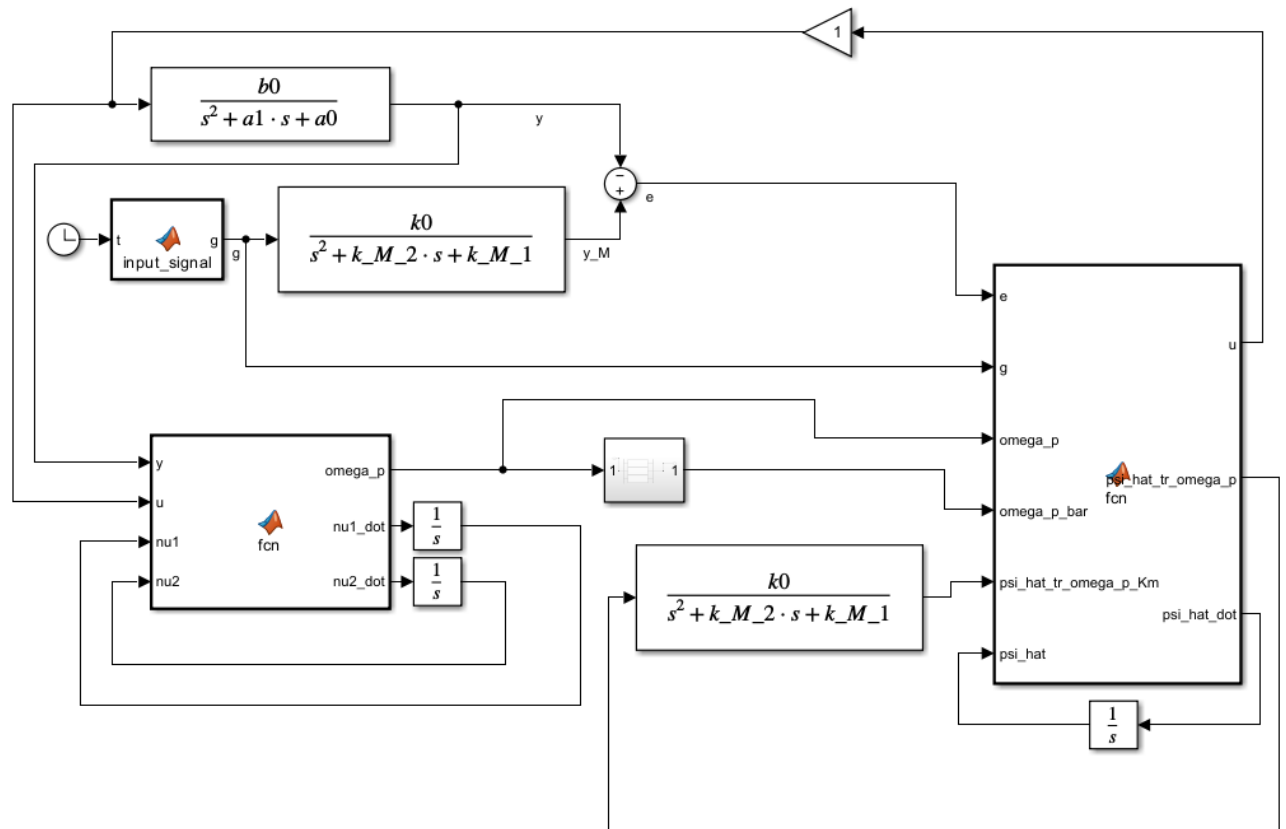


Рисунок 1. Схема моделирования системы с адаптивным регулятором №1.

Произведем моделирование системы при 3-х различных значениях коэффициента адаптации  $\gamma$ . Отметим также, что будем рассматривать только те значения, при которых перерегулирование системы не превышает  $10^{306}$ .

**$\gamma = 10$**

Промоделируем с шагом  $stepsize_{max} = 1e - 3$ .

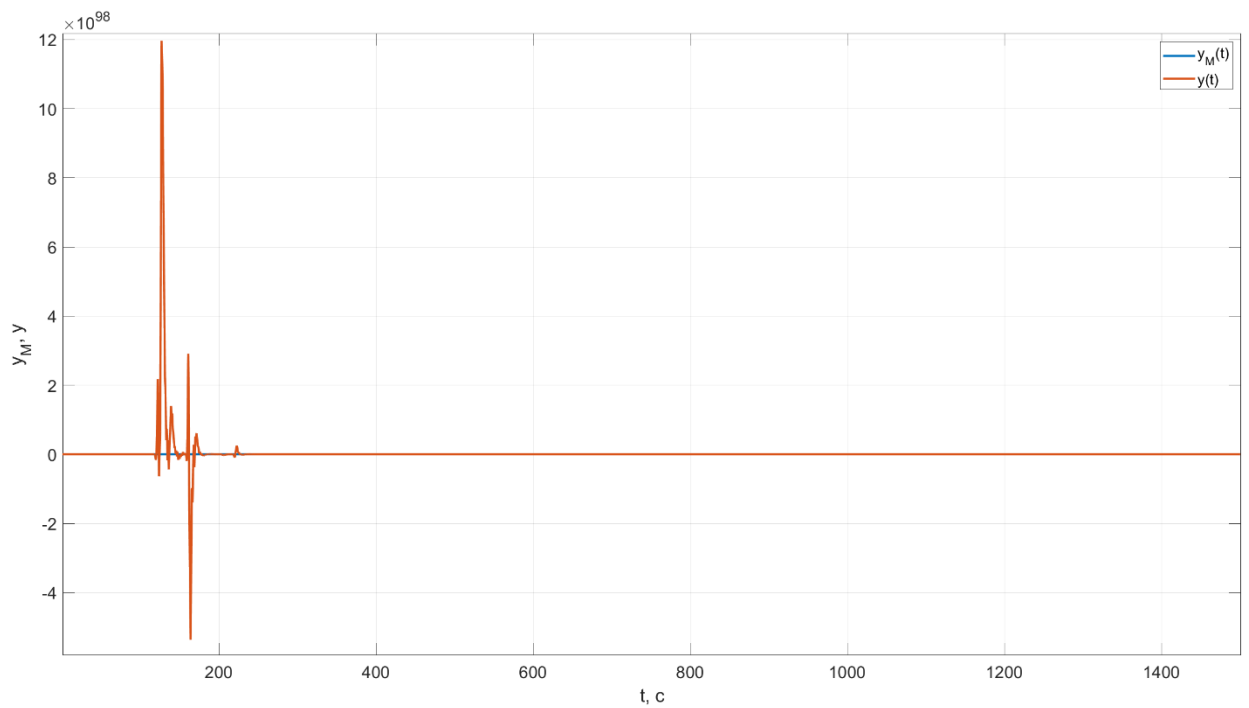


Рисунок 2. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 10$ .

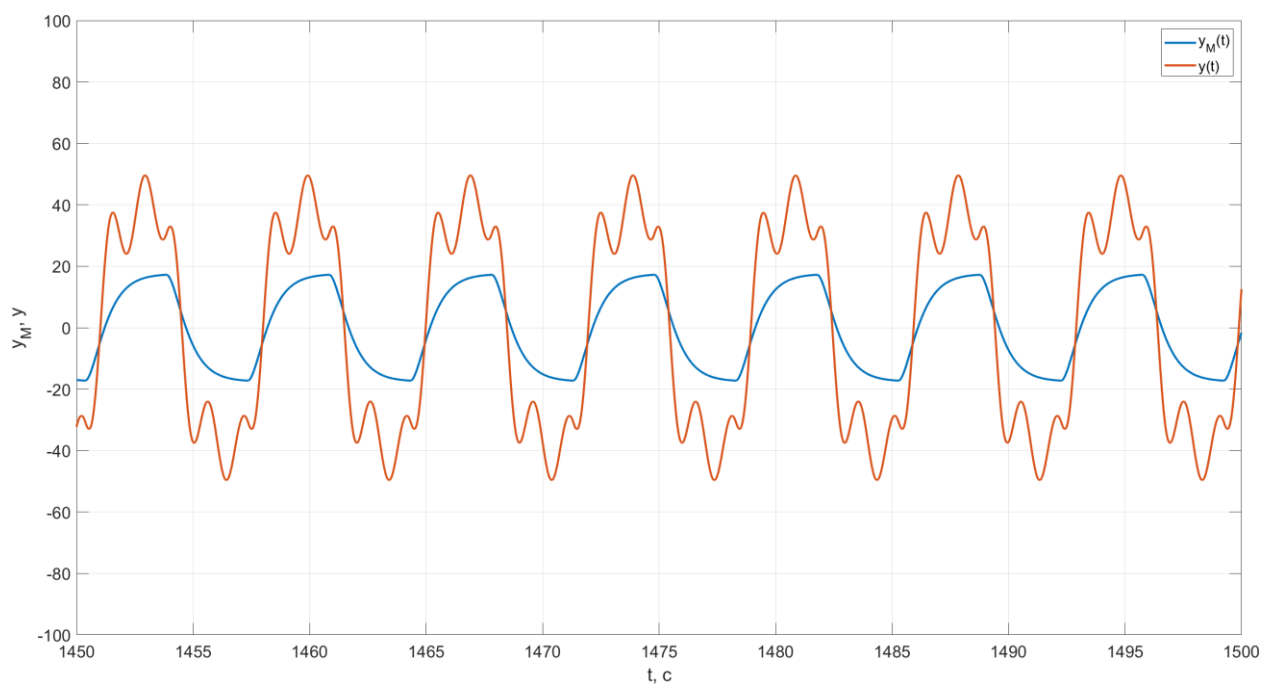


Рисунок 3. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 10$  при меньшем диапазоне.

Как видим, ошибка по выходу не сошлась в 0, это происходит из-за ненулевого шага моделирования.

Уменьшим  $stepsize_{max} = 1e - 4$  и выведем тот же график.

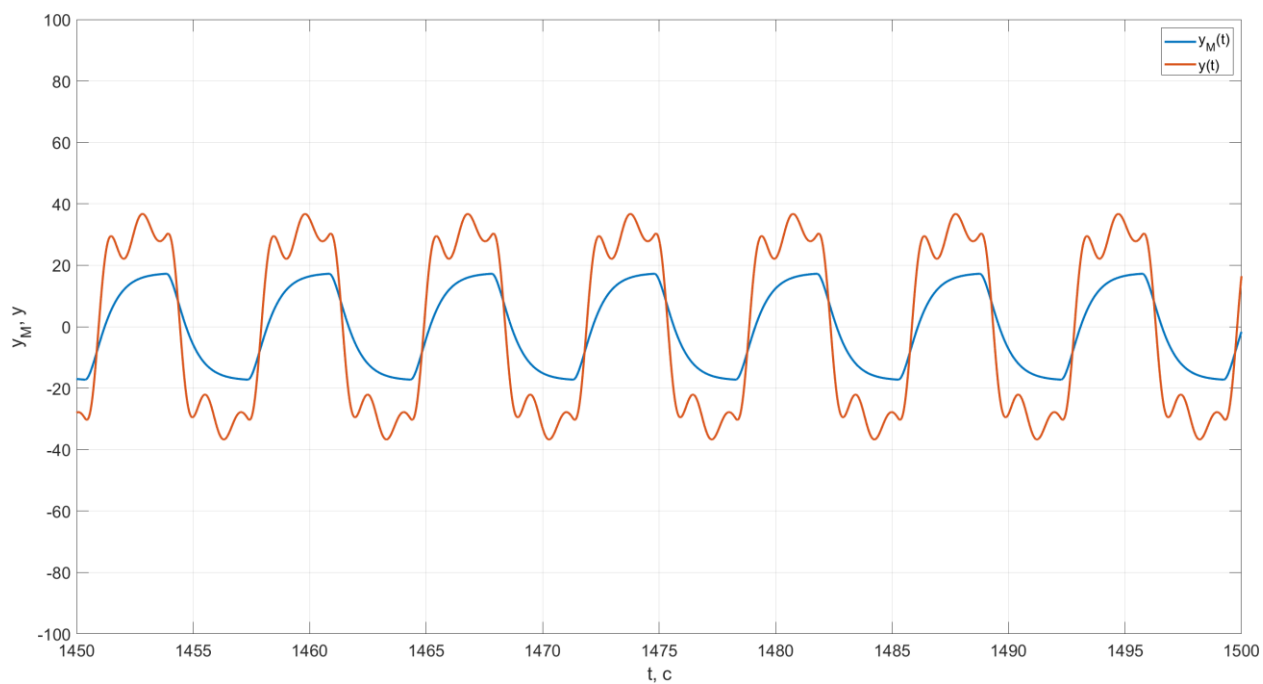


Рисунок 4. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 10$  при меньшем диапазоне с меньшим шагом моделирования.

Действительно, при уменьшении шага моделирования ошибка стала меньше.

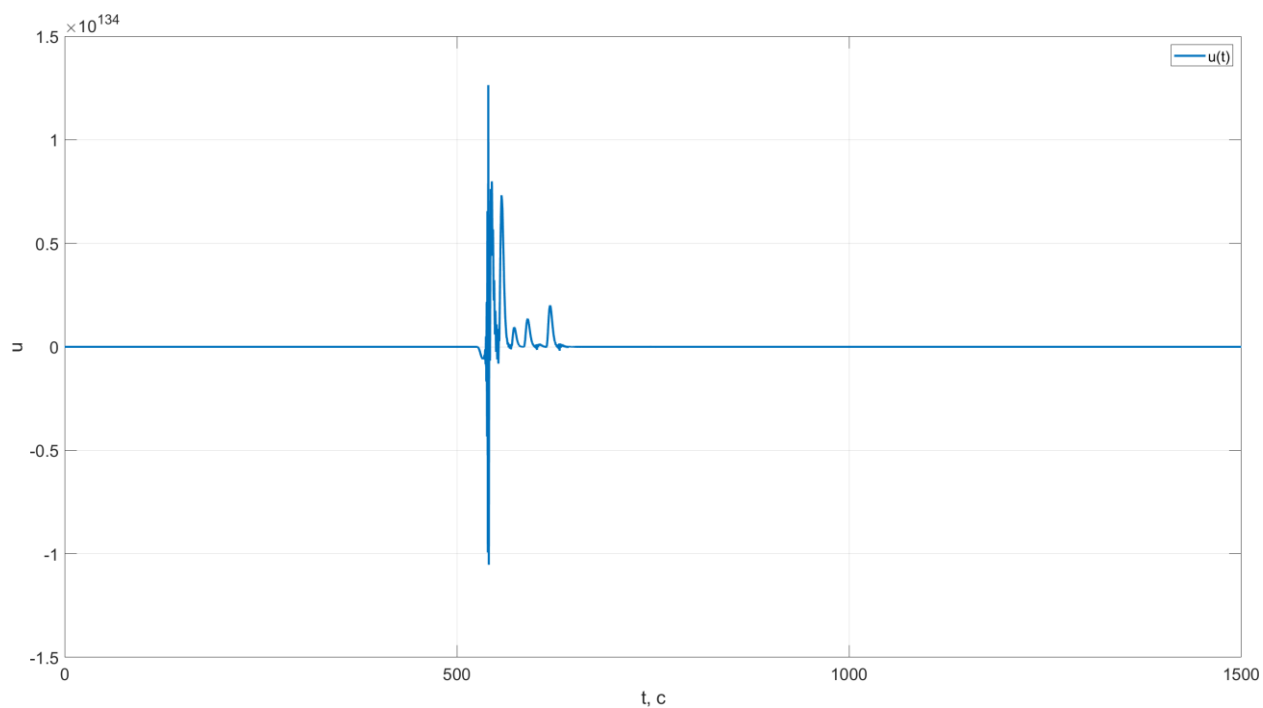


Рисунок 5. График управляющего воздействия при  $\gamma = 10$ .

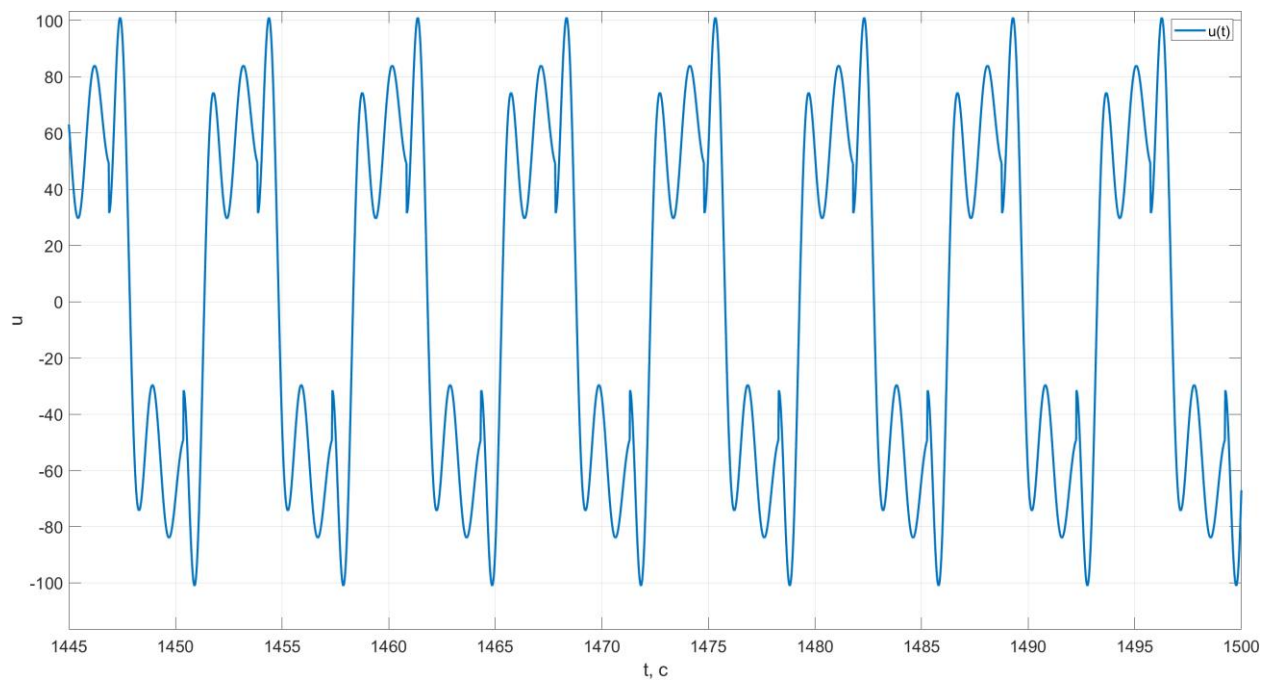


Рисунок 6. График управляющего воздействия при  $\gamma = 10$  при меньшем диапазоне.

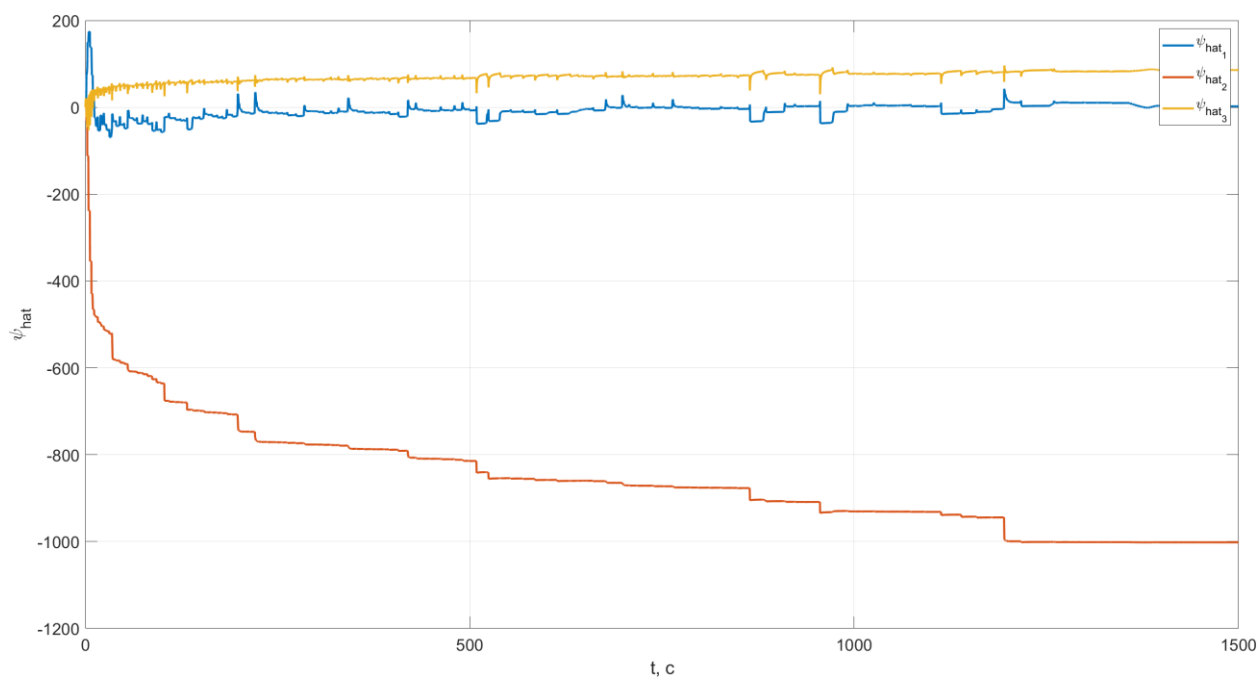


Рисунок 7. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 10$ .



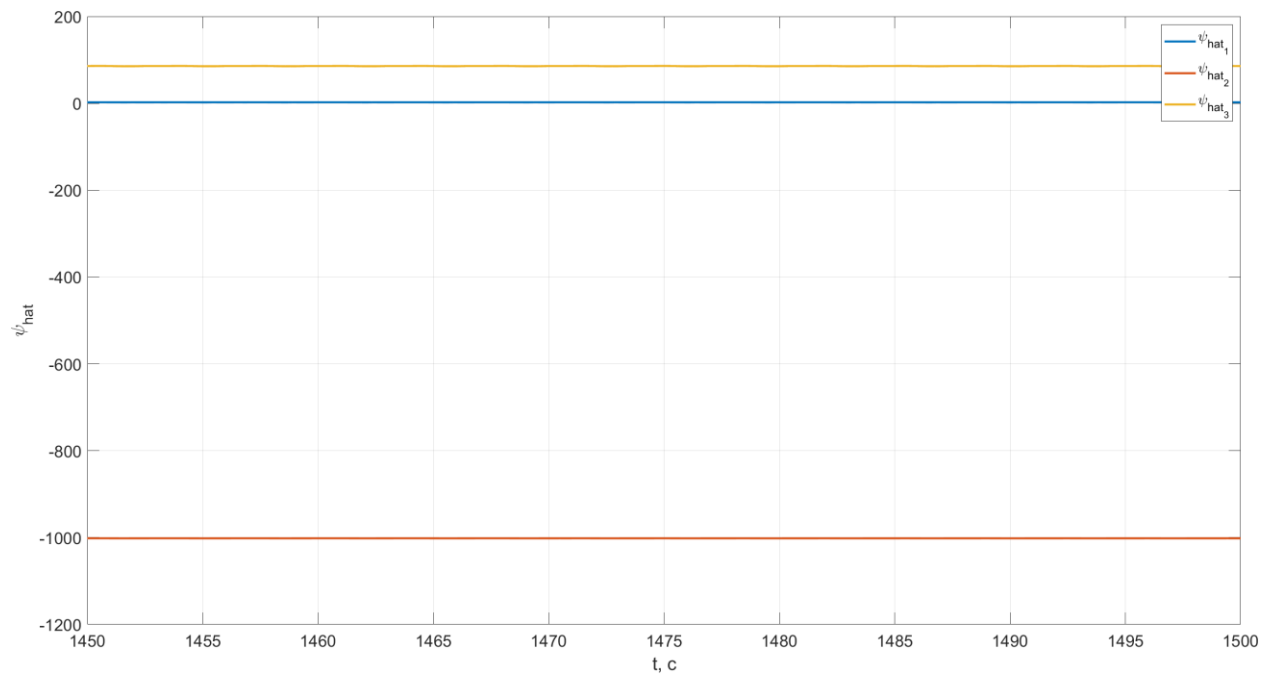


Рисунок 8. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 10$  при меньшем диапазоне.

Видно, что оценки параметров идентифицировались значениями и больше не изменяются.

**$\gamma = 100$**

Промоделируем с шагом  $stepsize_{max} = 1e - 3$ .

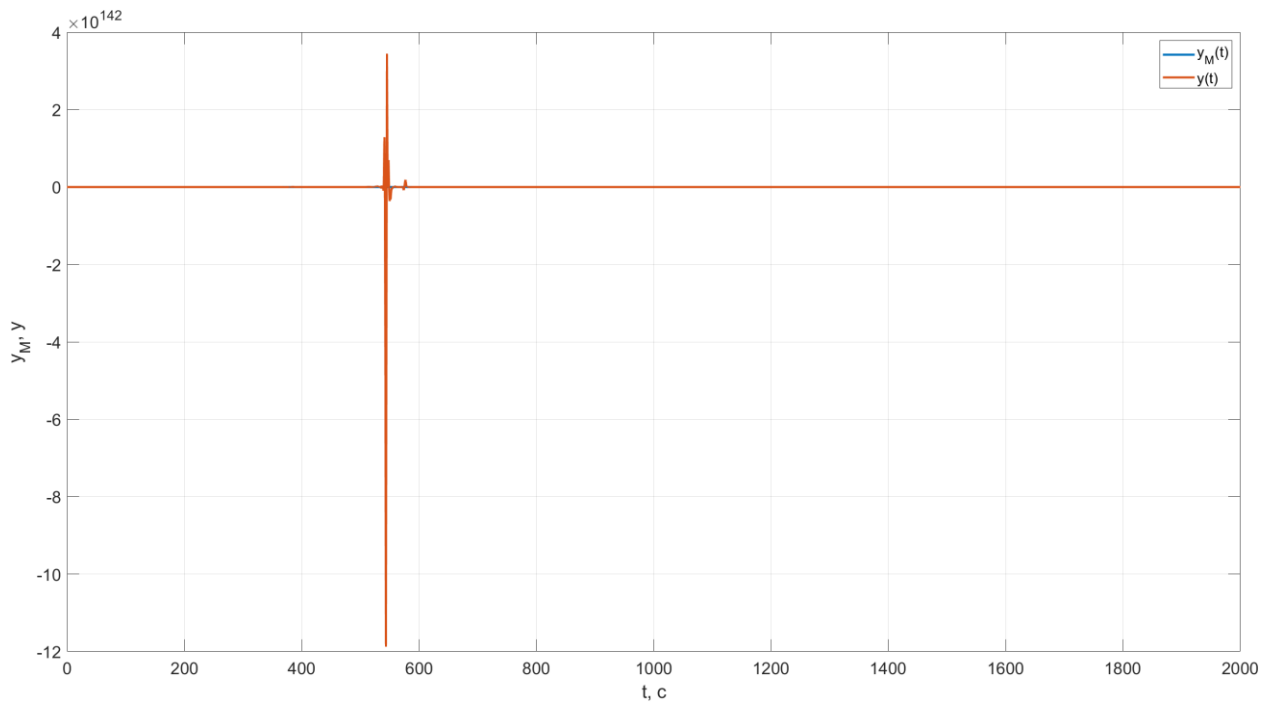


Рисунок 9. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 100$ .

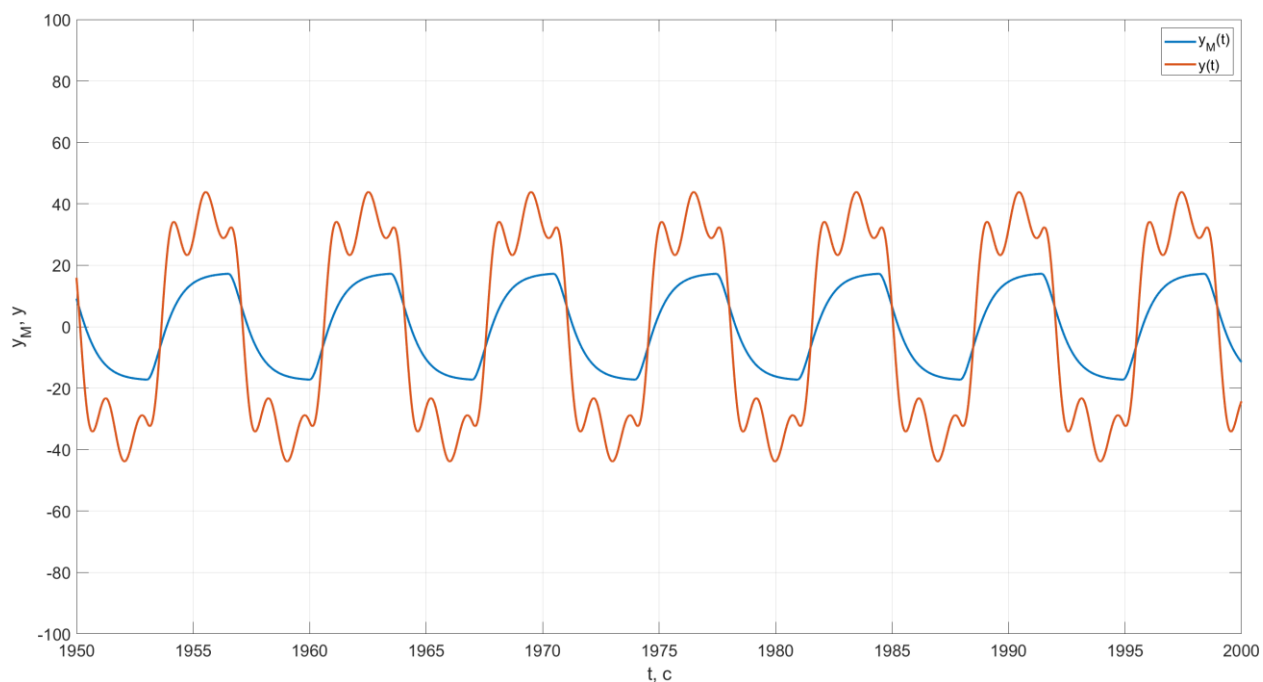


Рисунок 10. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 100$  при меньшем диапазоне.

В сравнении с аналогичным графиком при меньшем значении коэффициента адаптации  $\gamma$  и таком же шаге моделирования ошибка  $e = y_M - y$  уменьшилась.

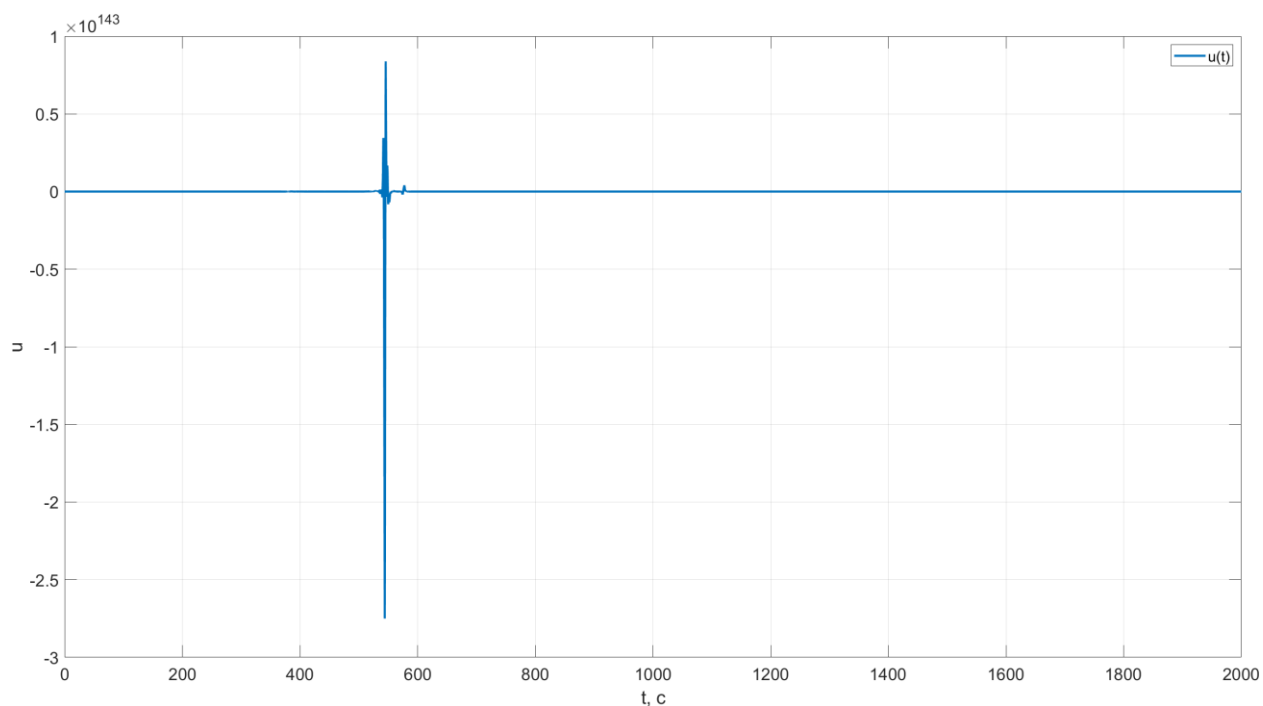


Рисунок 11. График управляющего воздействия при  $\gamma = 100$ .

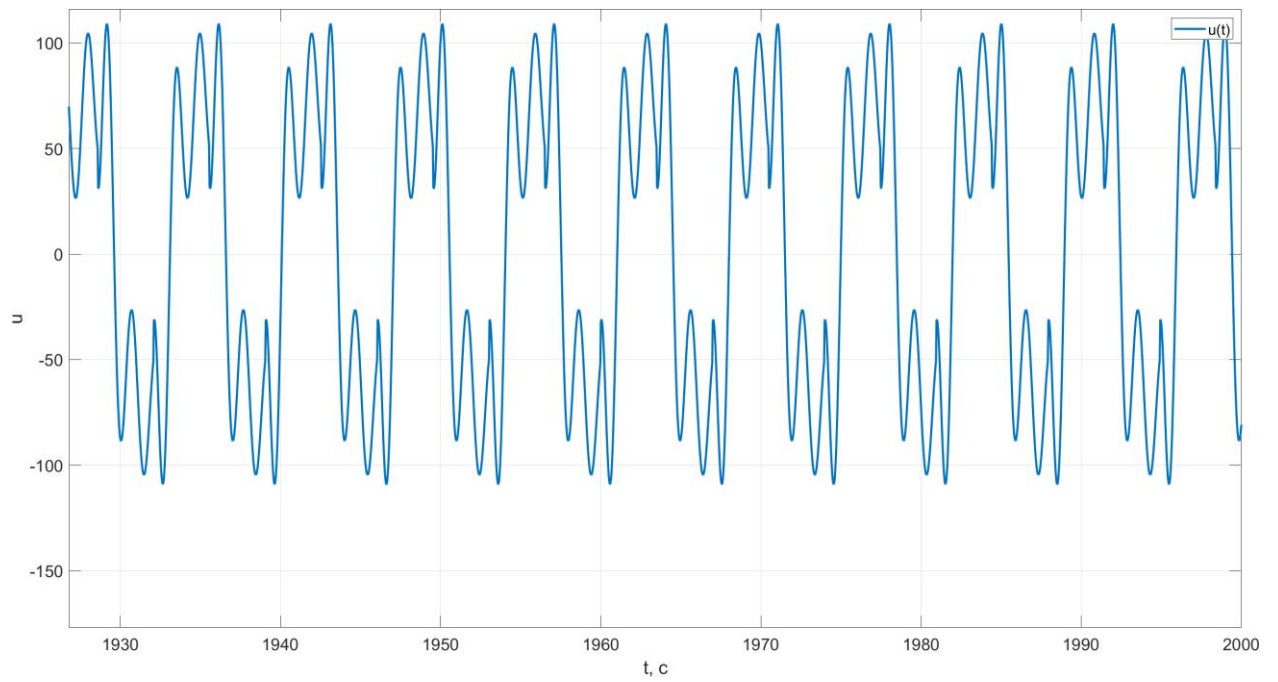


Рисунок 12. График управляющего воздействия при  $\gamma = 100$  при меньшем диапазоне.

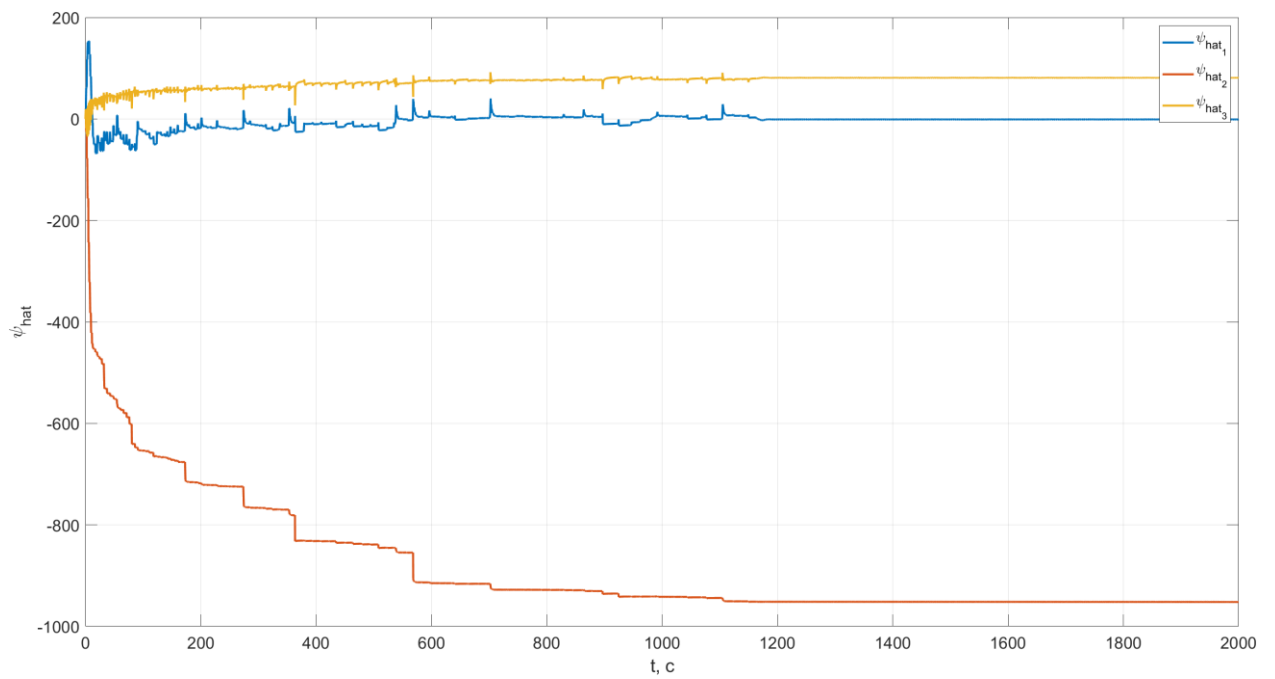


Рисунок 13. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 100$ .

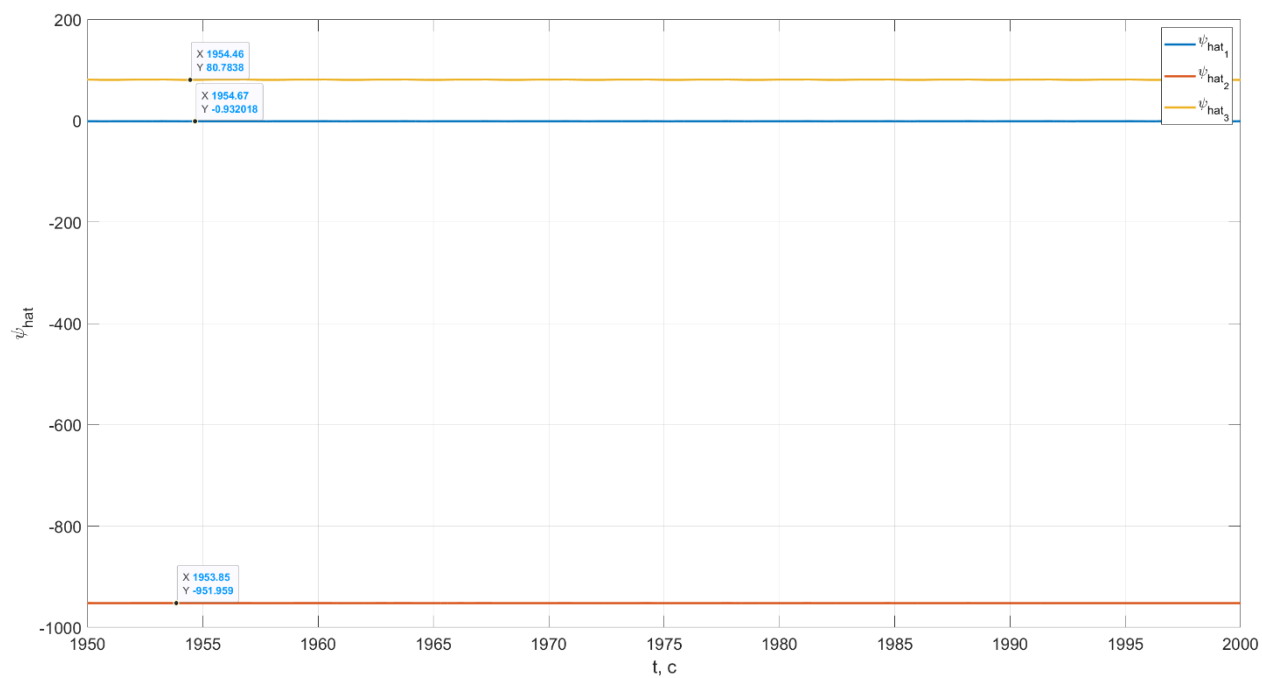


Рисунок 14. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 100$  при меньшем диапазоне.

**$\gamma = 300$**

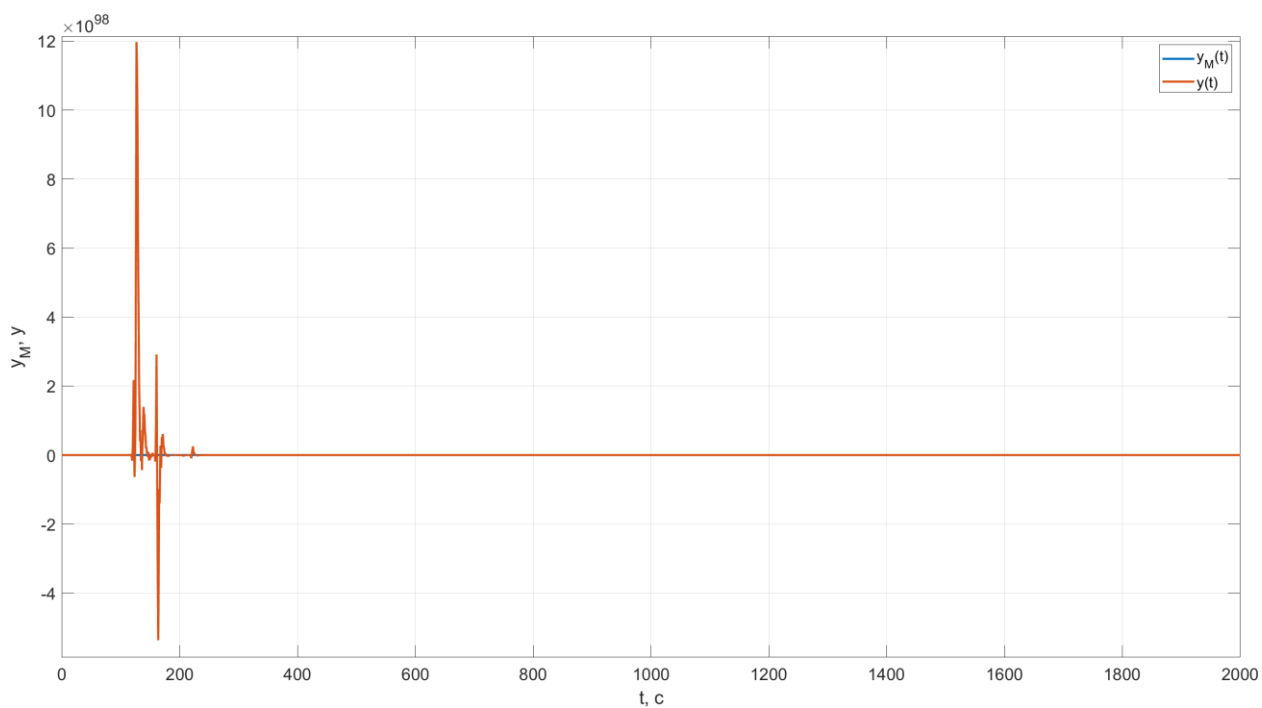


Рисунок 15. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 300$ .

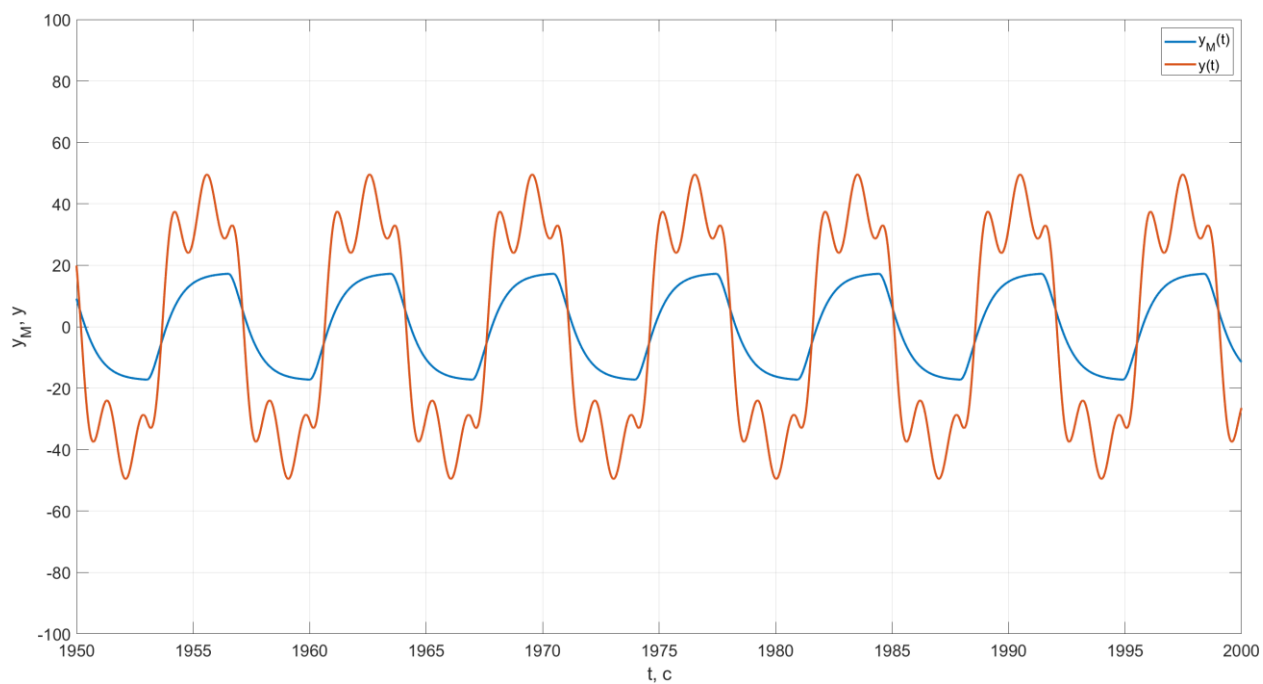


Рисунок 16. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma = 300$  при меньшем диапазоне.

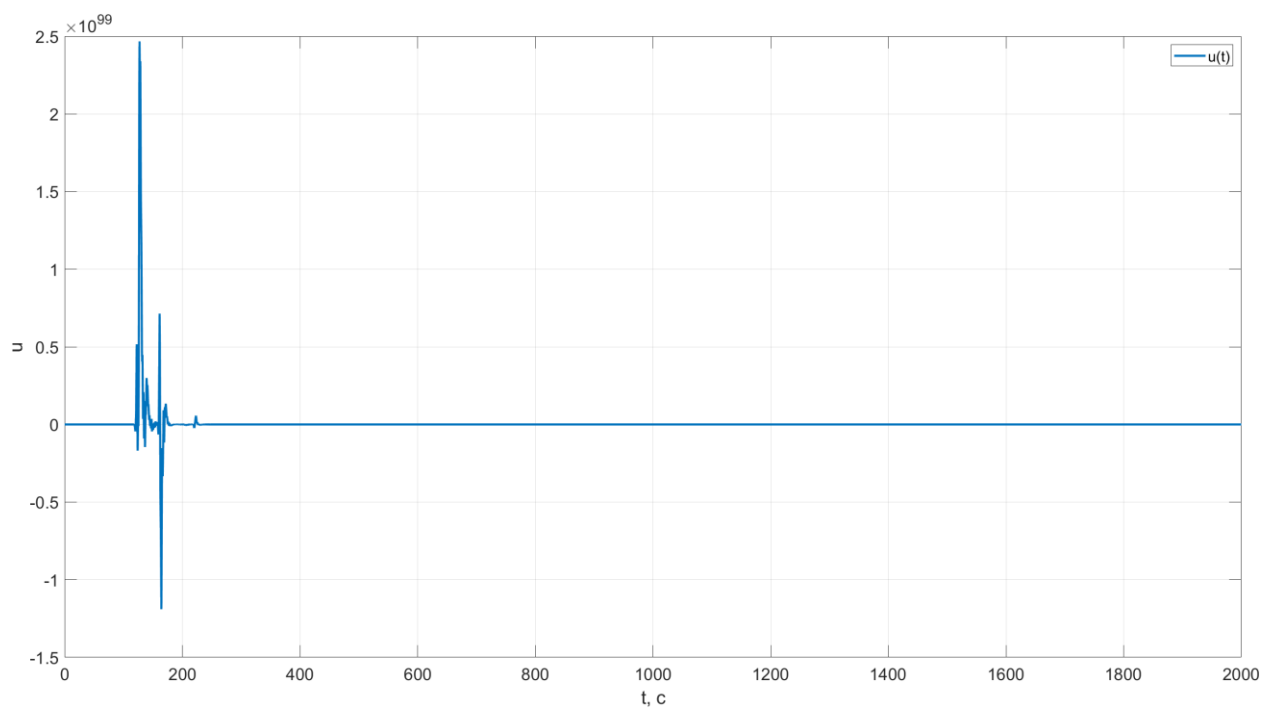


Рисунок 17. График управляющего воздействия при  $\gamma = 300$ .

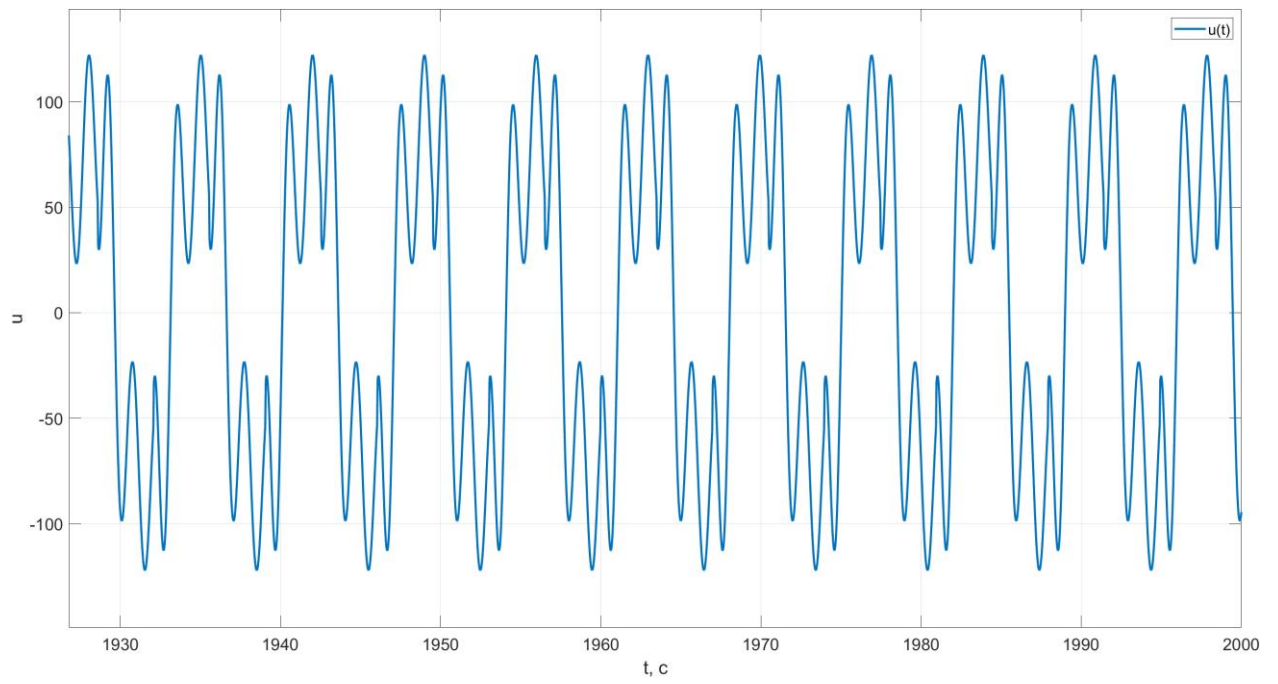


Рисунок 18. График управляющего воздействия при  $\gamma = 300$  при меньшем диапазоне.

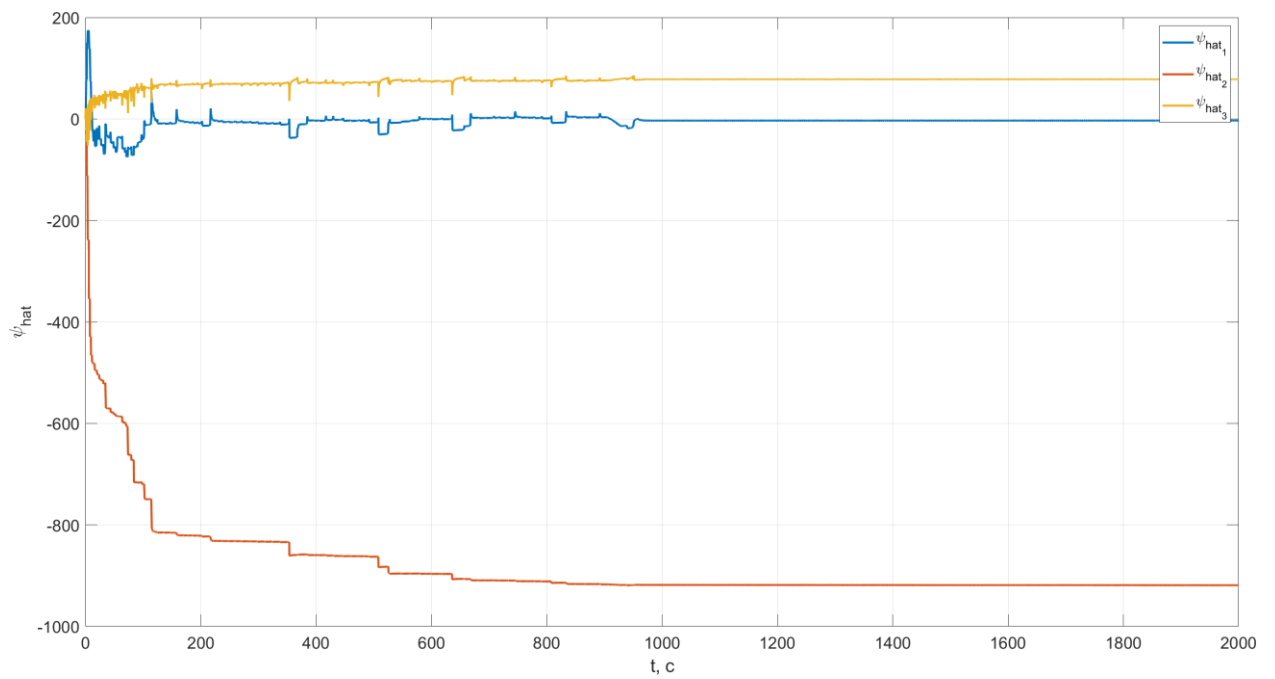


Рисунок 19. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 300$ .

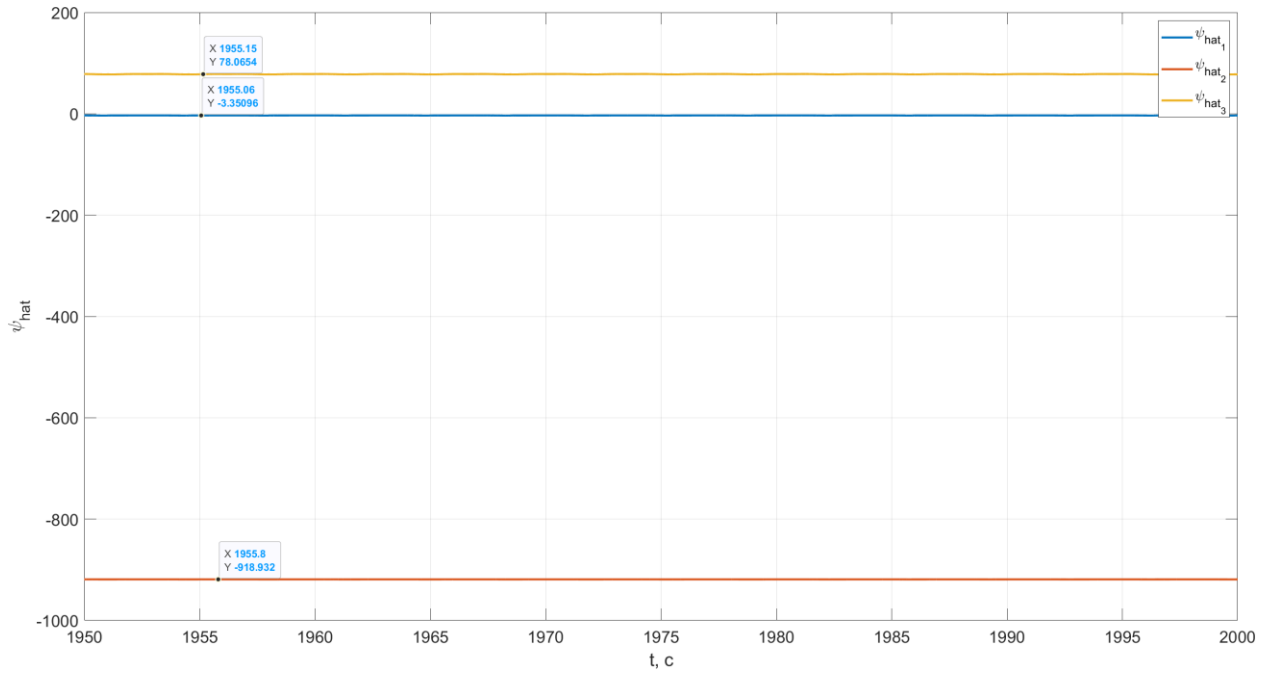


Рисунок 20. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma = 100$  при меньшем диапазоне.

На основе полученных графиков можно сделать вывод о том, что при данном адаптивном законе динамическая система имеет крайне большие перерегулирования, однако закон управления всё равно позволяет достичь задачу управления. Так как мы не накладывали никаких условий на качество переходного процесса при синтезе настраиваемого регулятора и алгоритма адаптации, то переходный процесс может быть любым.

При изменении коэффициента адаптации  $\gamma$  качество переходных процессов меняется. При  $\gamma = 300$  получили переходный процесс с наименьшим  $t_{\text{п}}$  и наименьшим перерегулированием  $\sigma_{\text{п}}$ .

### 3. Способ №2 ( $b_m$ неизвестно)

Закон управления в данной ситуации формируется в виде

$$u = \hat{\psi}^T \omega$$

Введем в рассмотрение сигнал расширенной ошибки:

$$\hat{e} = e + \hat{k}\xi,$$

$$\text{где } \omega = [v_1, v_2, y, g], \bar{\omega} = \frac{1}{K_M(s)} [\omega], \xi = \frac{1}{K_M(s)} [\hat{\psi}^T \omega] - \hat{\psi}^T \bar{\omega}.$$

Алгоритм адаптации примет следующий вид:

$$\dot{\hat{\psi}} = \gamma_1 \frac{\bar{\omega}}{1 + \bar{\omega}^T \bar{\omega}} \hat{e}, \quad \dot{\hat{k}} = -\gamma_2 \frac{\xi}{1 + \bar{\omega}^T \bar{\omega}} \hat{e}.$$

## Схема моделирования

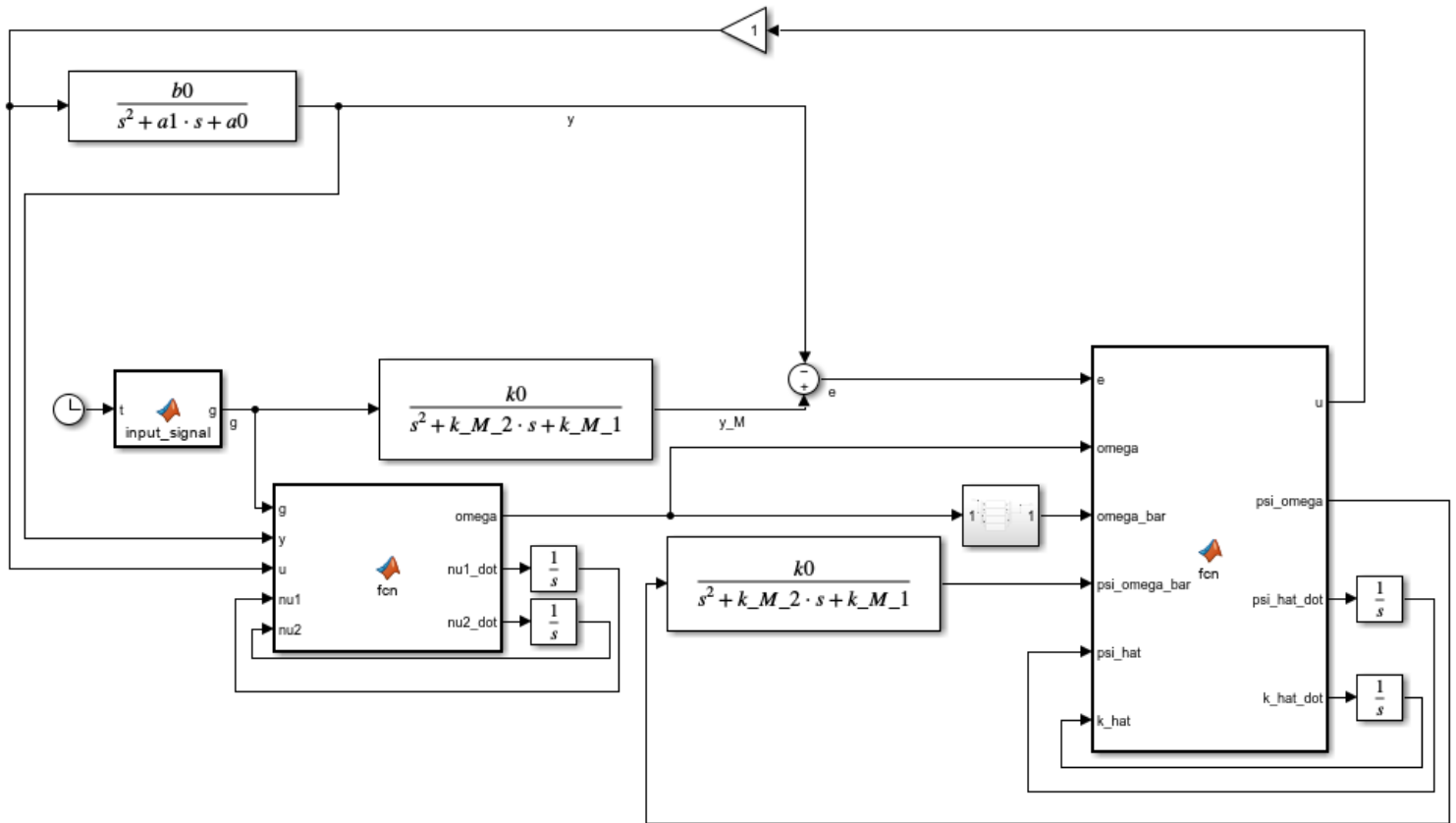


Рисунок 21. Схема моделирования системы с адаптивным регулятором №2.

$$\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$$

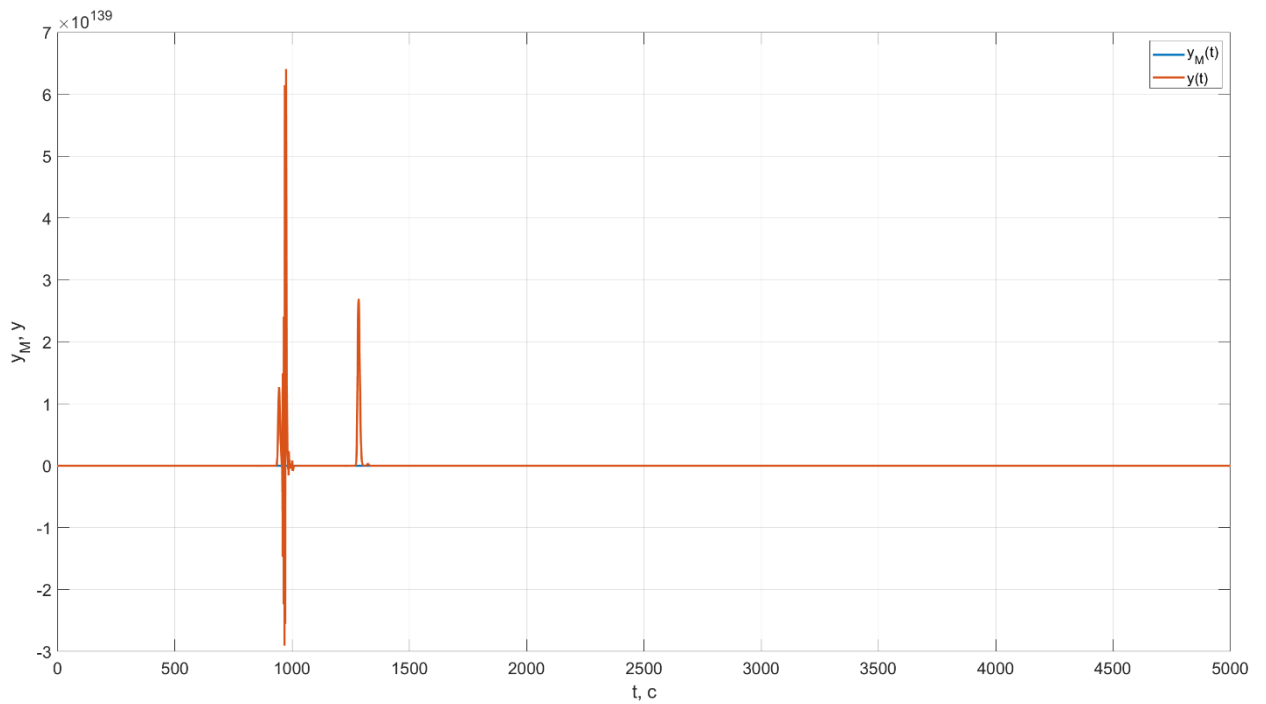


Рисунок 22. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$ .



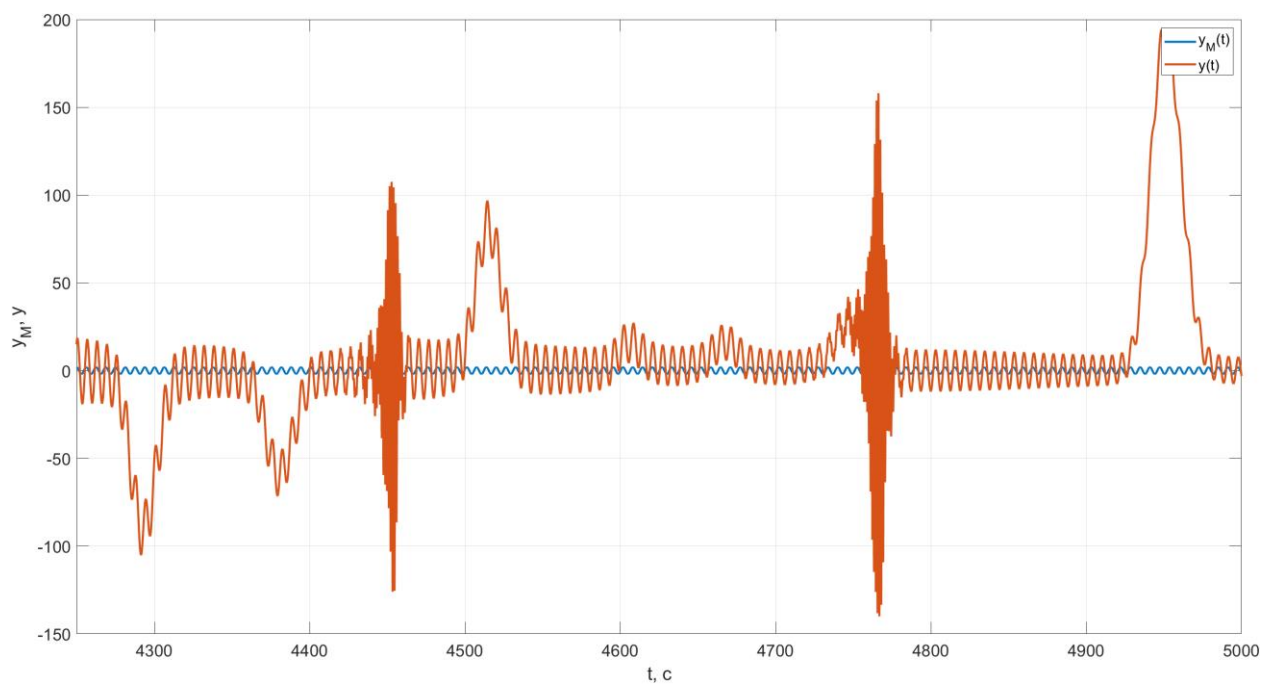


Рисунок 23. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$  при меньшем диапазоне.

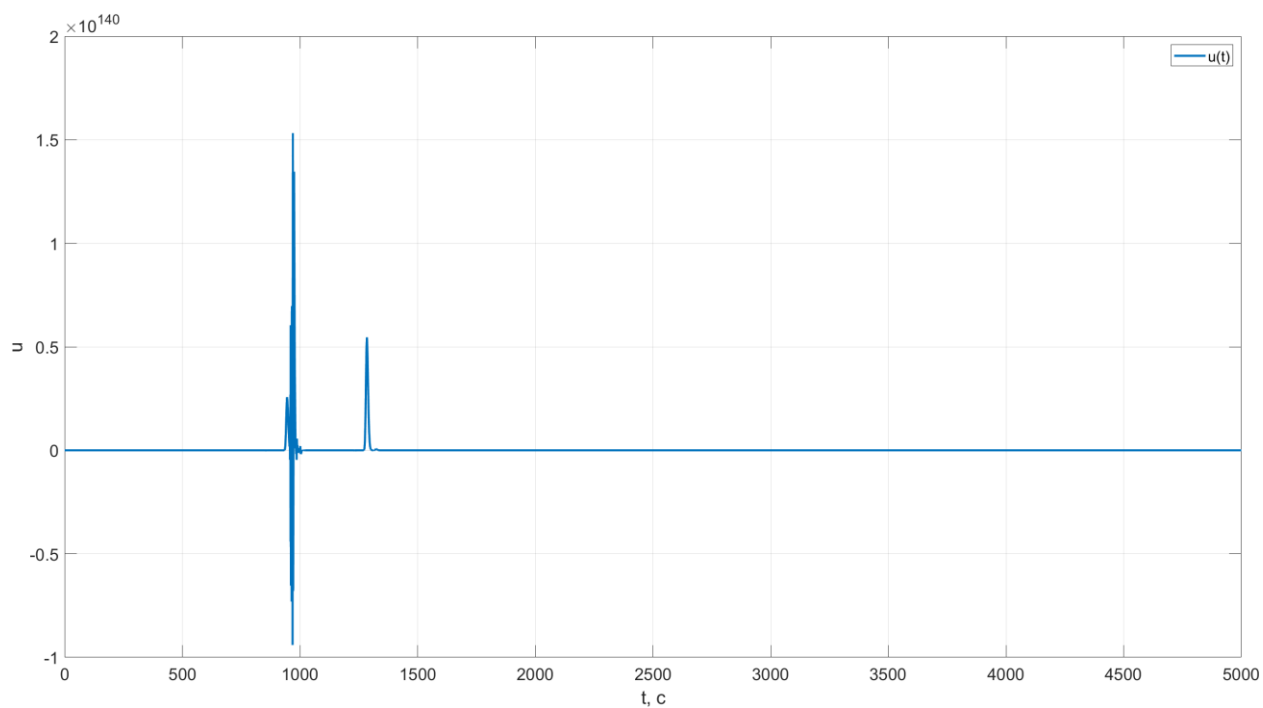


Рисунок 24. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$ .

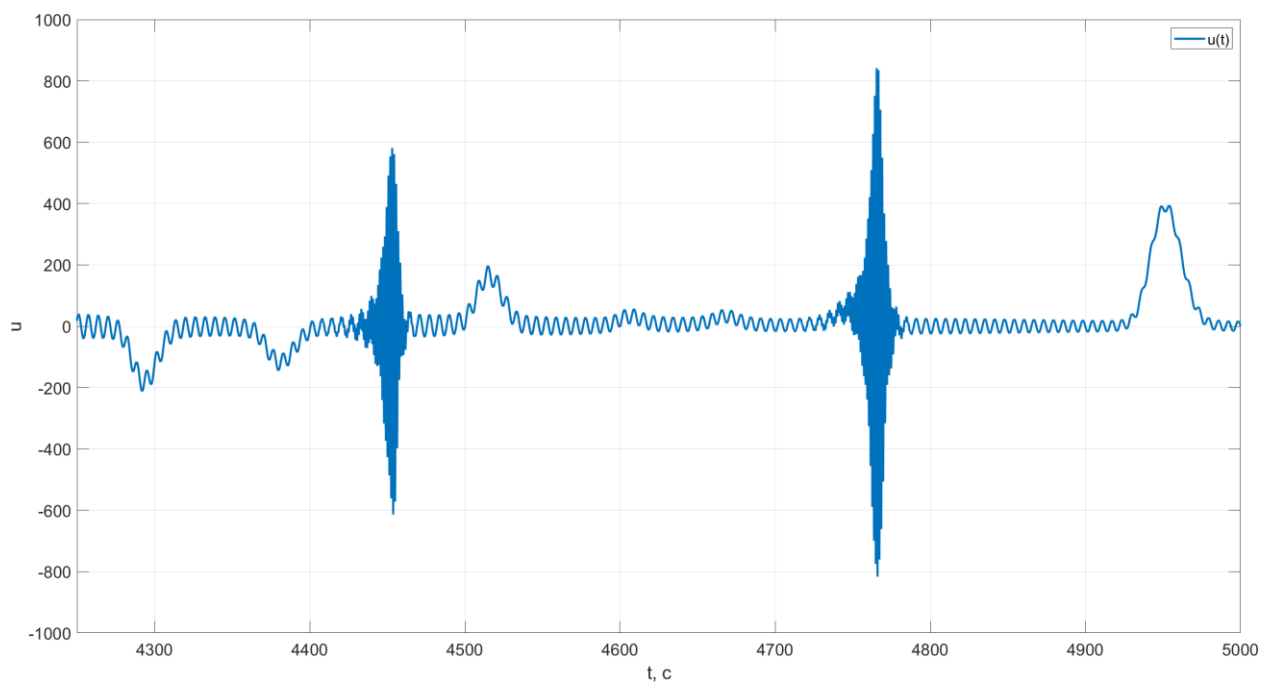


Рисунок 25. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$  при меньшем диапазоне.

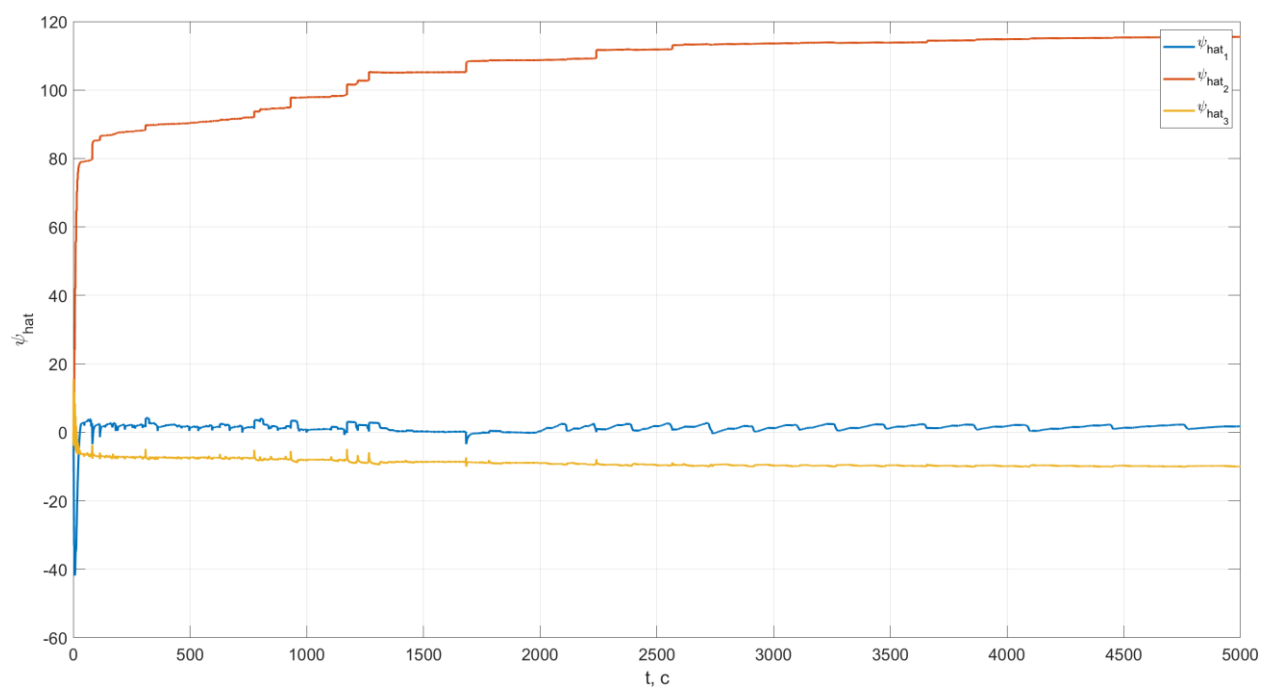


Рисунок 26. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$ .

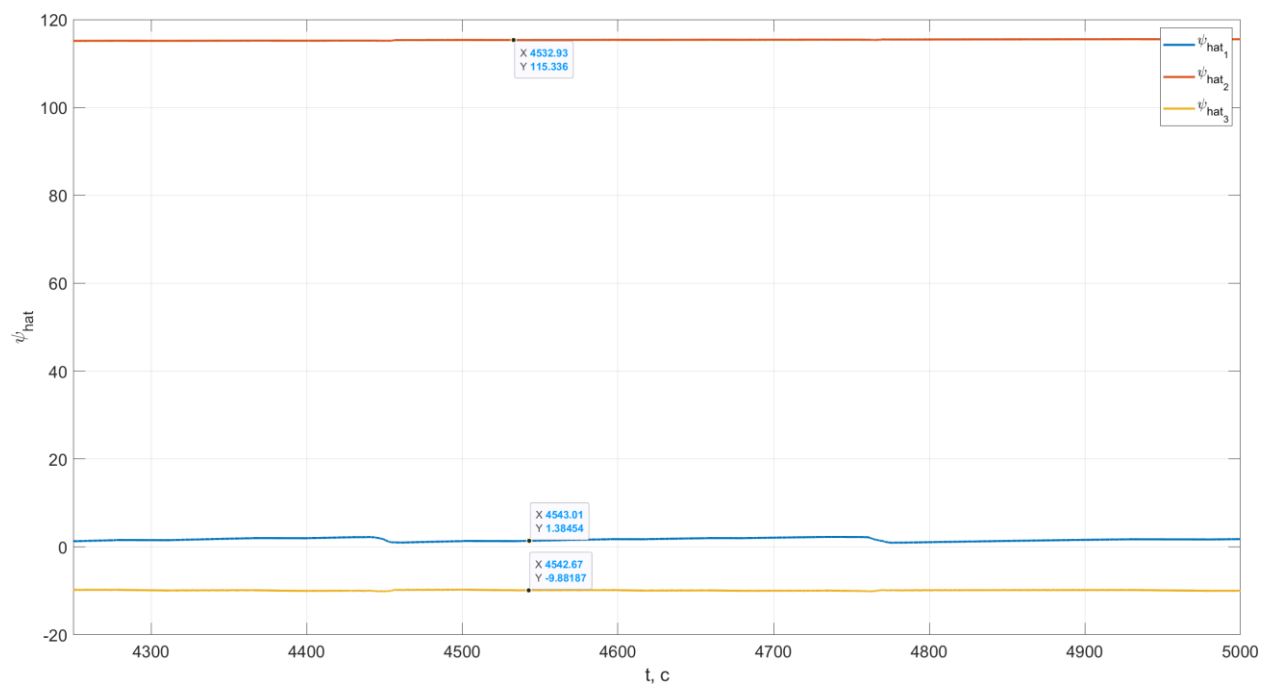


Рисунок 27. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 1$  при меньшем диапазоне.

**$\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$**

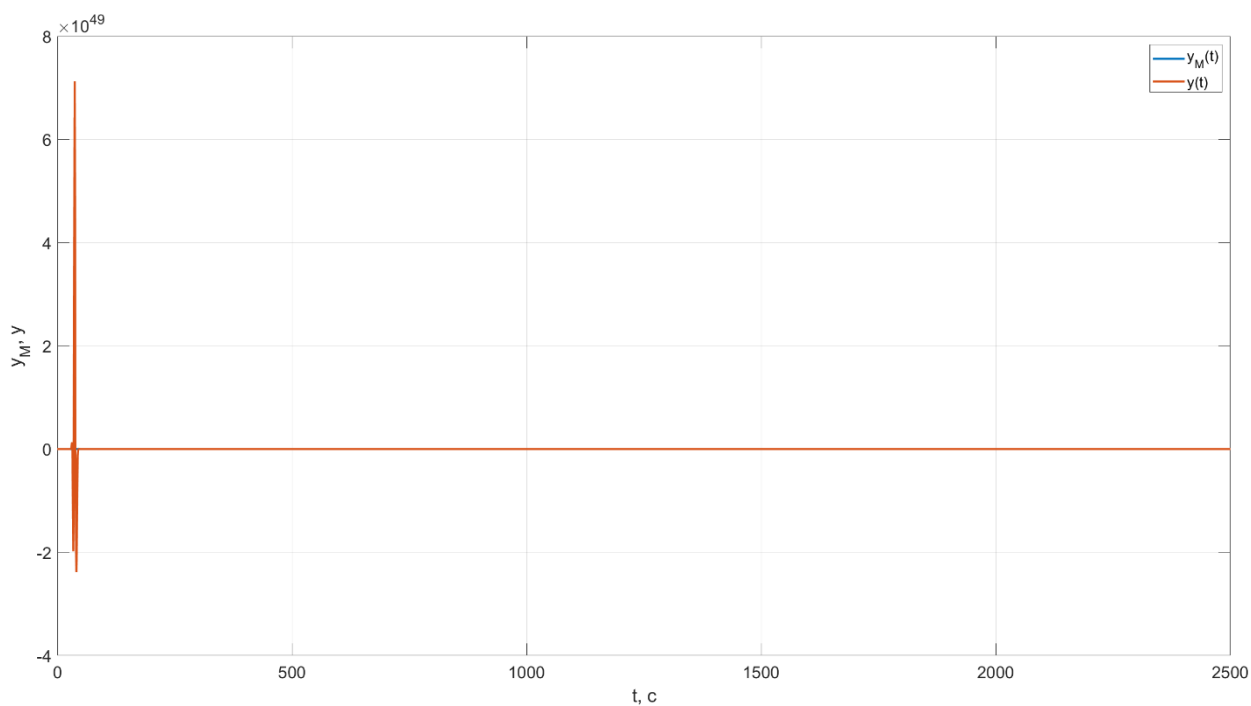


Рисунок 28. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$ .

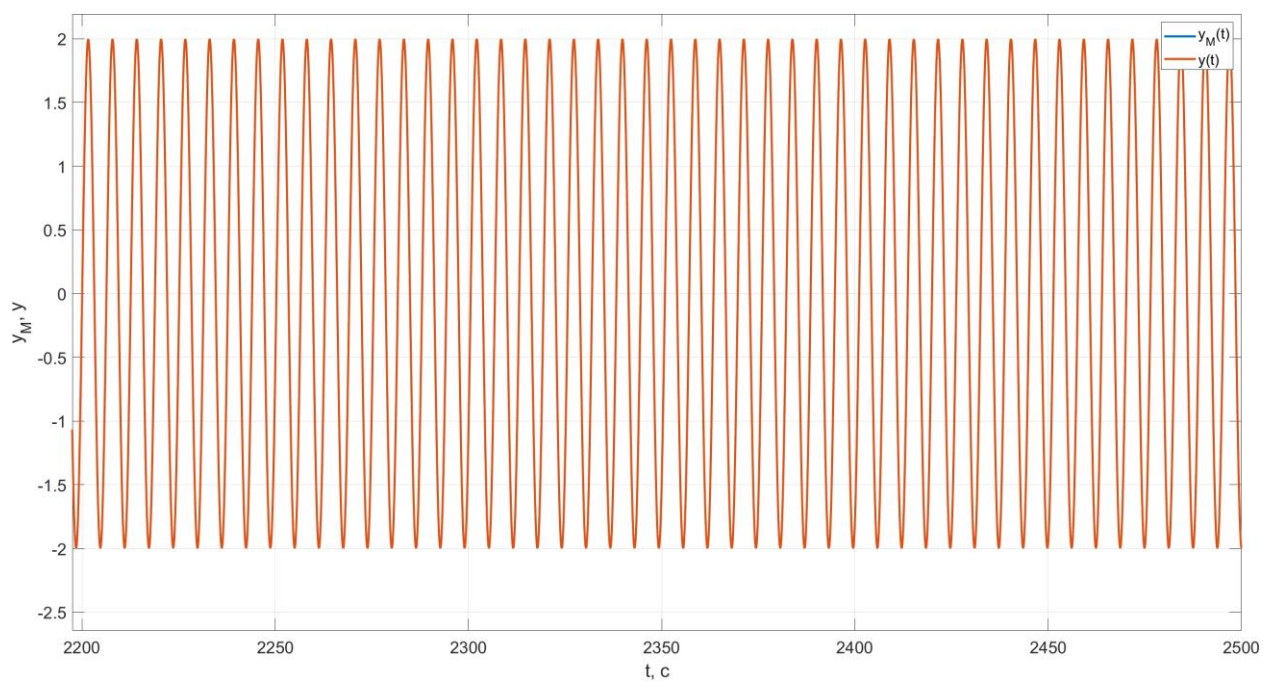


Рисунок 29. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$  при меньшем диапазоне.

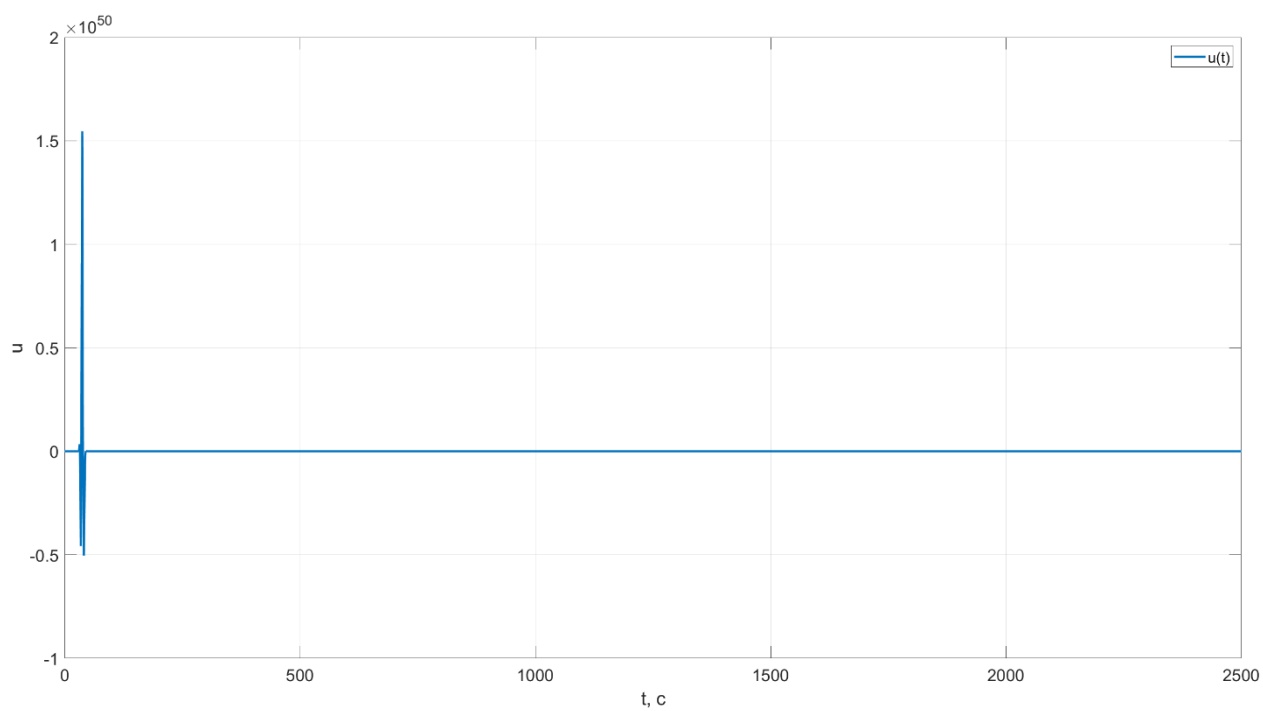


Рисунок 30. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$ .

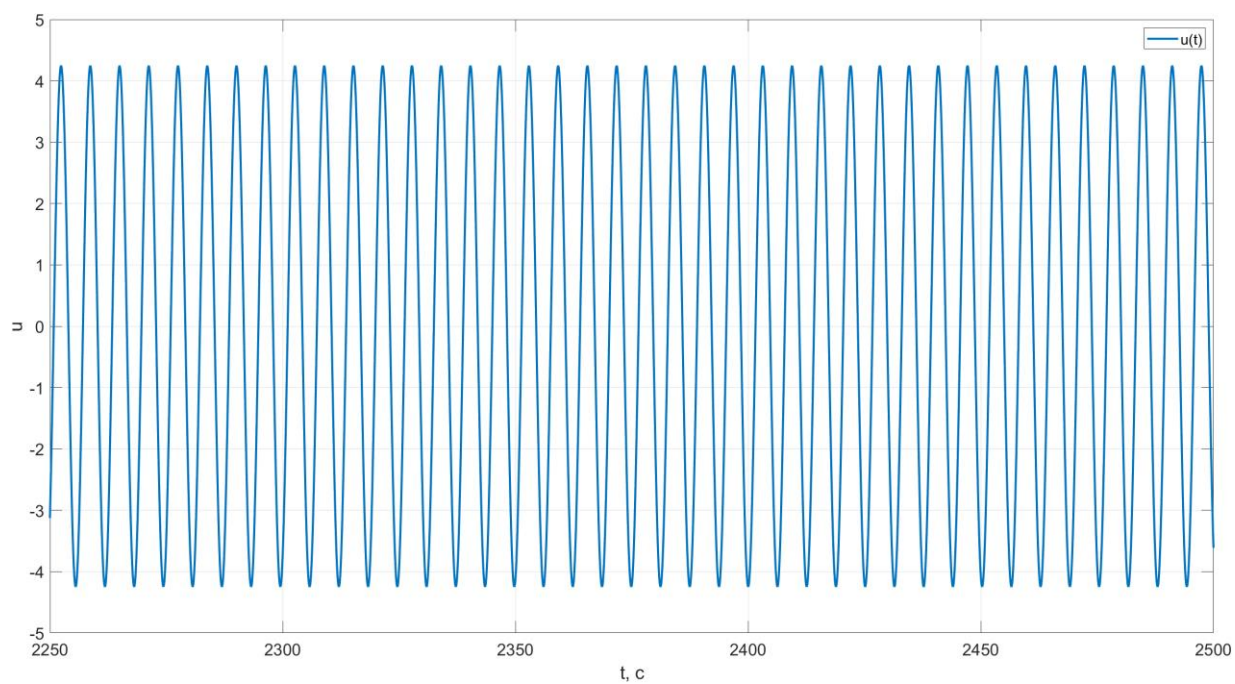


Рисунок 31. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$  при меньшем диапазоне.

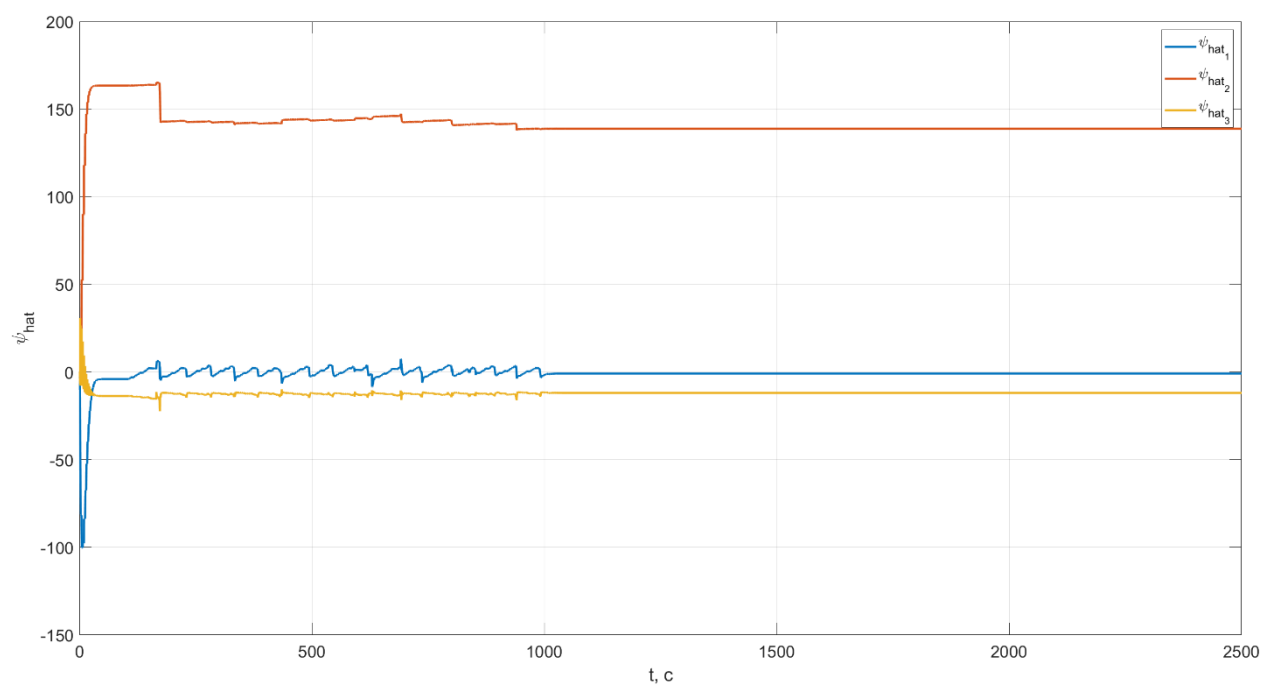


Рисунок 32. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$ .

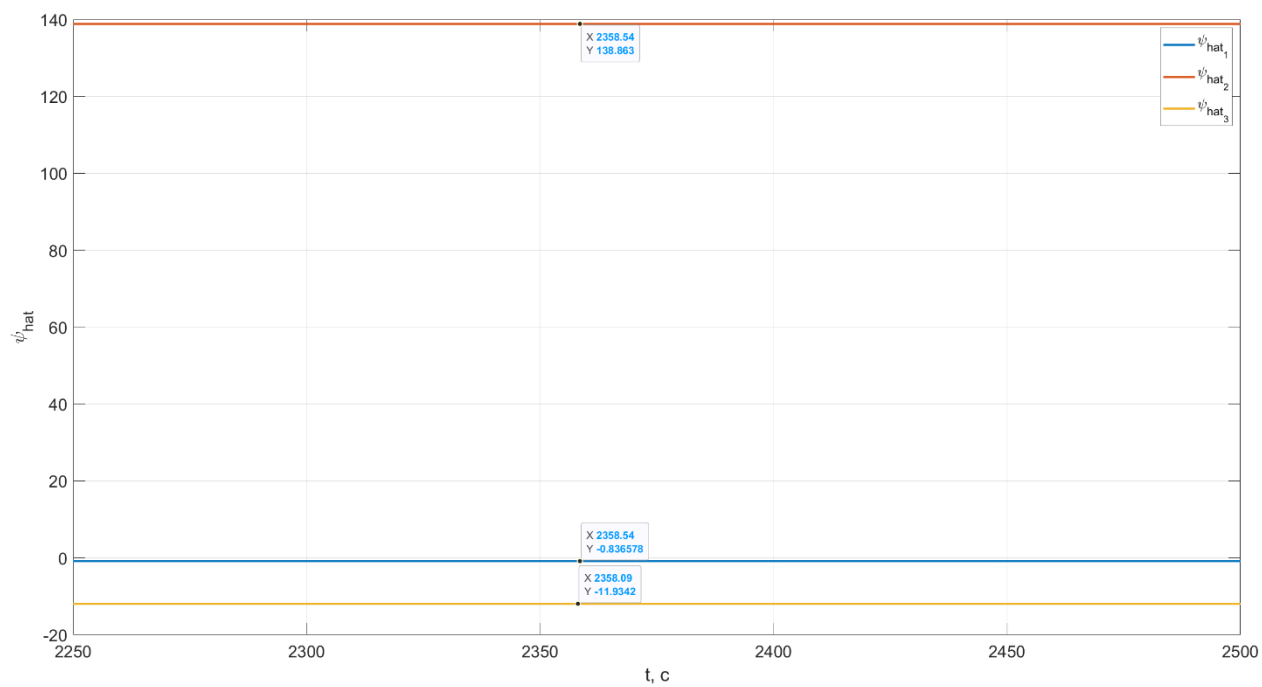


Рисунок 33. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 300, \gamma_2 = 0.1$  при меньшем диапазоне.

**$\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$**

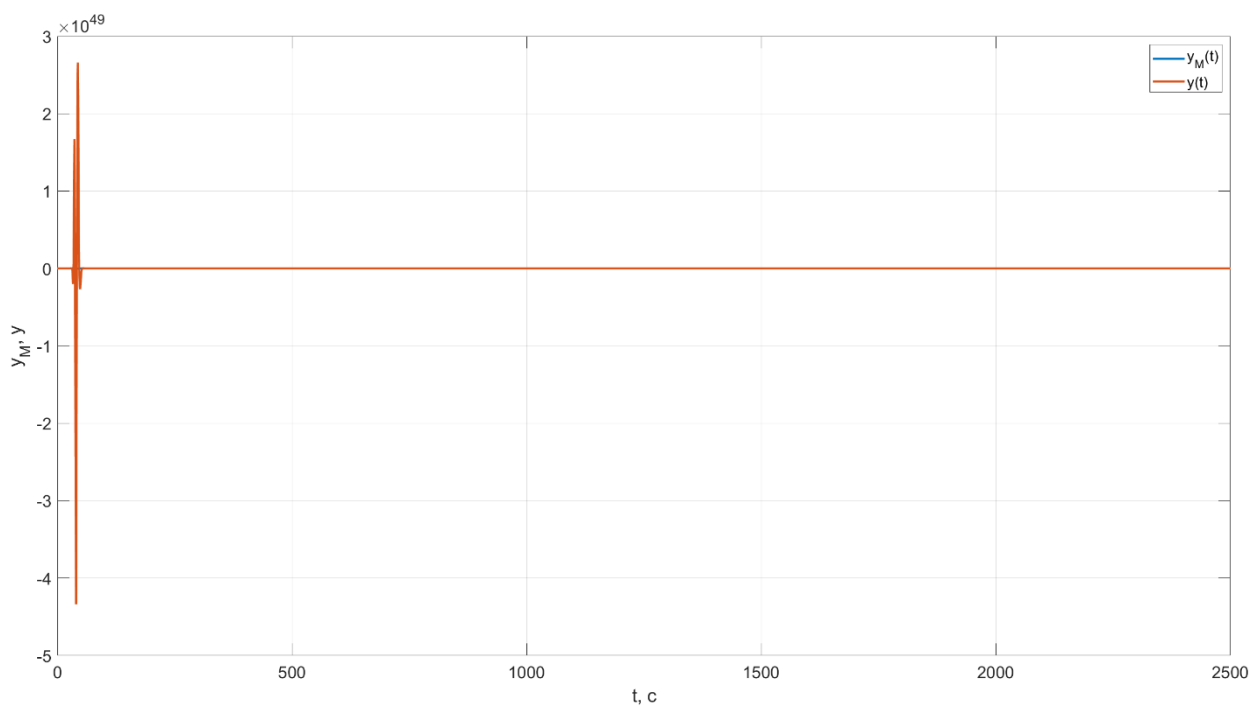


Рисунок 34. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$ .

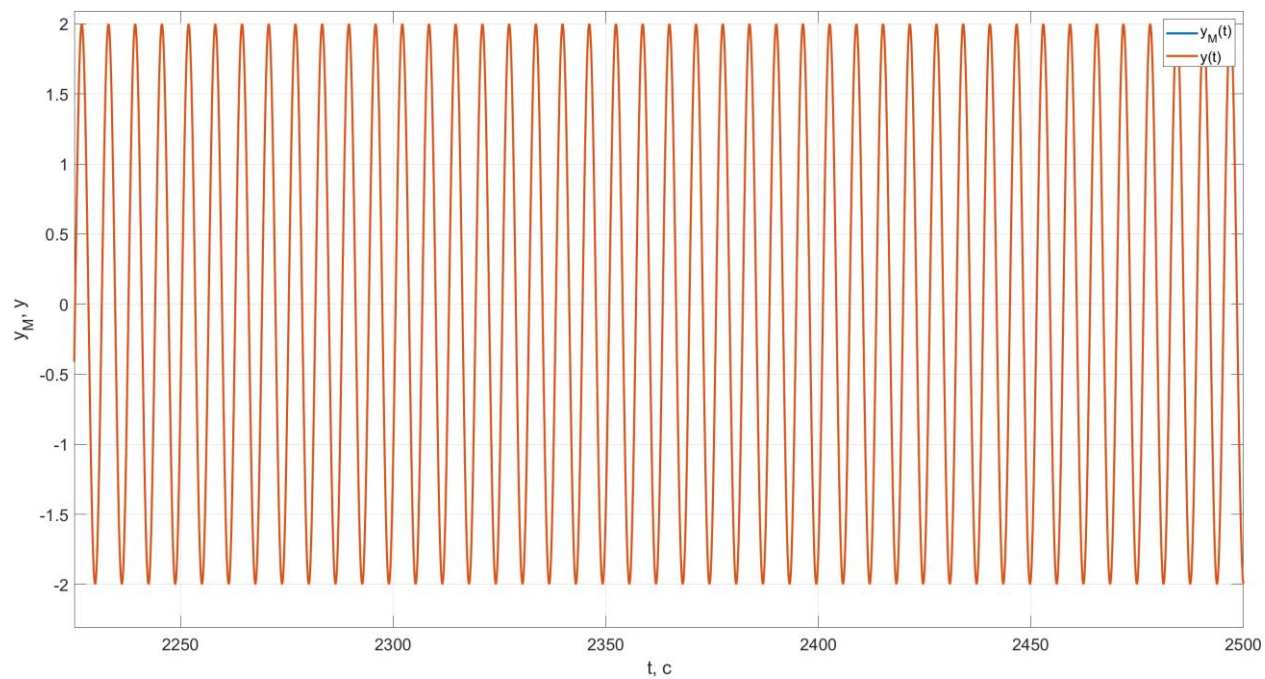


Рисунок 35. Графики выхода объекта управления и эталонного объекта при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$  при меньшем диапазоне.

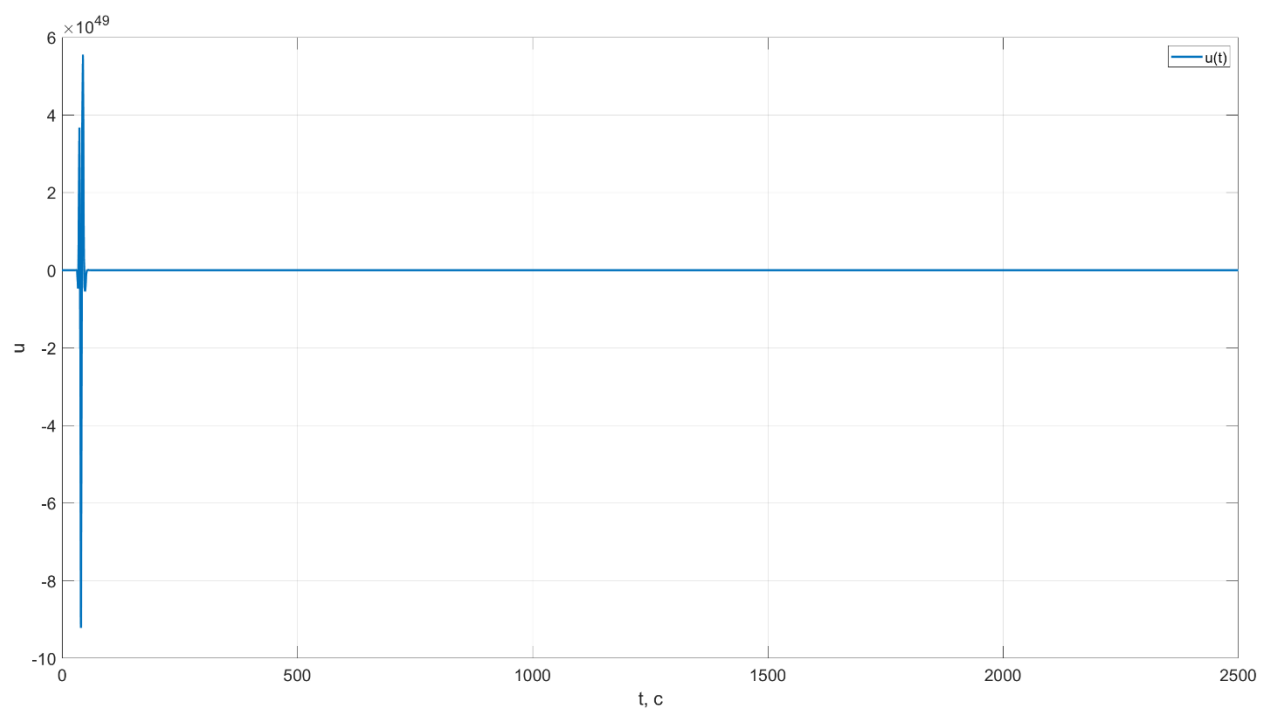


Рисунок 36. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$ .

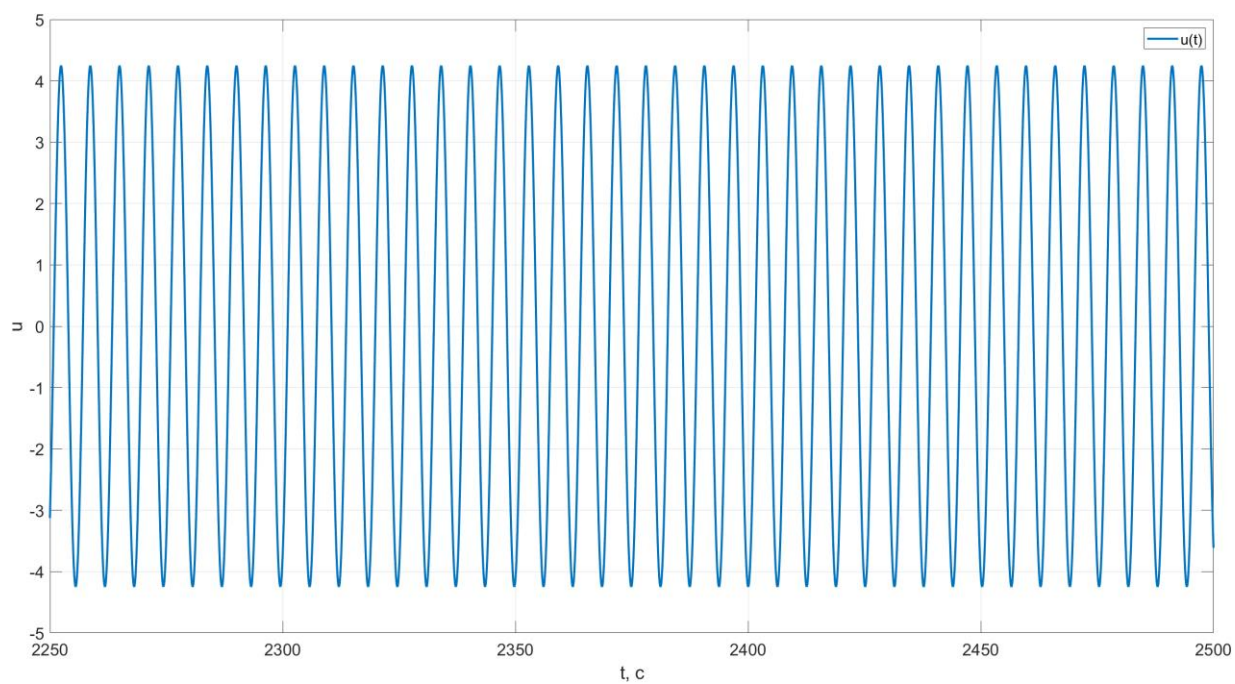


Рисунок 37. График управляющего воздействия при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$  при меньшем диапазоне.

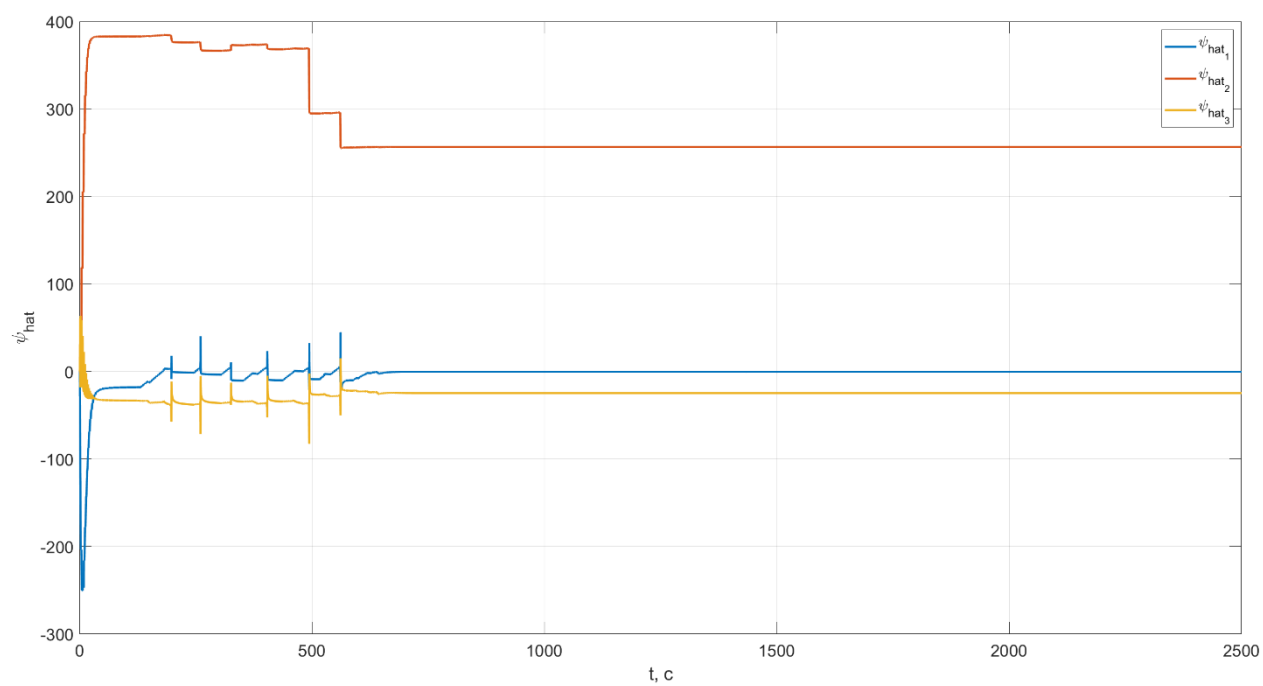


Рисунок 38. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$ .



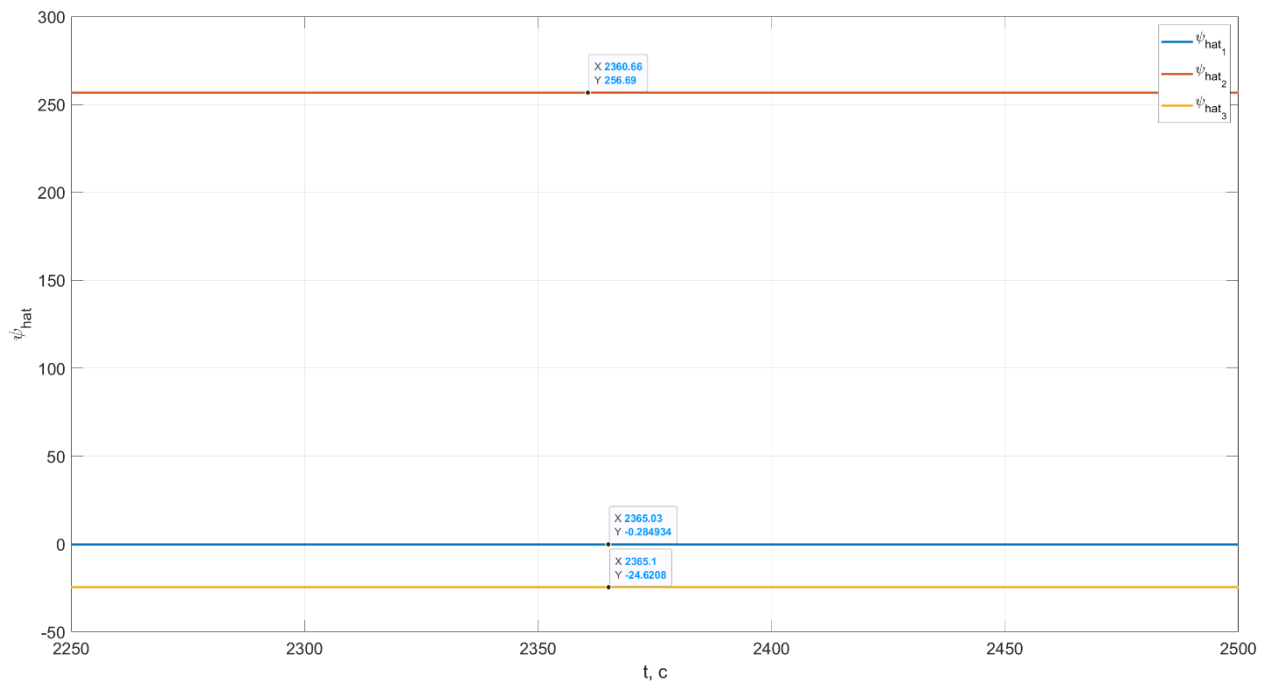


Рисунок 39. График компонент оценки параметров  $\hat{\psi}$  при  $\gamma_1 = 400, \gamma_2 = 0.01$  при меньшем диапазоне.

В случае неизвестного  $b_m$  переходные процессы становятся еще хуже (увеличивается перерегулирование и время переходного процесса).

#### 4. Выводы

В данной лабораторной работе был изучен метод адаптивного управления по выходу с помощью алгоритма адаптации на основе расширенной ошибки. Были рассмотрены два метода: при известном  $b_m$  и при неизвестном  $b_m$ . Оба метода позволяют достичь задачи управления и свести ошибку  $e = y_M - y$  в ноль. Однако качество переходных процессов, из-за не наложенных на них условий при синтезе настраиваемого регулятора и алгоритма адаптации, может быть любым.

В конкретном нашем случае, для достижения цели слежения объектом управления за сигналом  $g(t) = 7\text{sign}(\cos 0.9t)$  мы наблюдаем перерегулирование порядка  $10^{98}$  (в лучшем случае) и время переходного процесса около 300 секунд (в лучшем случае).