

**ОТЧЕТ**  
**о работе молодежной научной школы**  
**Руководитель МНШ: Краснова С.А.,**  
**д.т.н., профессор, г.н.с. лаб 37**

Проект (2021–2023)

«Методы синтеза наблюдателей состояния и дифференциаторов внешних сигналов для информационного обеспечения систем слежения, функционирующих в условиях неопределенности»

**Отчет за первый этап (2021–2022 гг.)**

«Методы синтеза дифференциаторов внешних сигналов для информационного обеспечения систем слежения»

**Докладчик: Кокунько Юлия Георгиевна, м.н.с. лаб. 37**

Заседание Ученого совета ИПУ РАН 19 мая 2022 г.

## Состав молодежной научной школы

№ п/п	ФИО	Ученая степень, ученое звание, должность	Структурное подразделение
	Краснова Светлана Анатольевна – руководитель	д.т.н., проф., г.н.с. (осн., 0,4 ст.)	Лаб. № 37
Молодые ученые			
1	Антипов Алексей Семенович 1992 г. р.	к.т.н., н.с. (осн., 1,0 ст.)	Лаб. № 37
2	Кокунько Юлия Георгиевна 1995 г. р.	м.н.с., соискатель (осн., 1,0 ст.)	Лаб. № 37
3	Уткин Антон Викторович 1980 г. р.	д.т.н., в.н.с. (осн., 1,0 ст.).	Лаб. № 37

## Участие в научных мероприятиях по тематике проекта

---

1. 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021), 17–21 May 2021, Sochi, RF.
2. 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 5–11 September 2021, Sochi, RF.
3. XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами», 6–9 сентября 2021, Москва–Звенигород.
4. 20th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS 2021), 14–17 September 2021, Moscow, ICS RAS.
5. 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2021), 27–29 September 2021, Moscow, ICS RAS.

## Публикации участников МНШ в отчетном периоде

	Обязательства по числу публикаций участников МНШ	Фактическое число публикации за отчетный период	В том числе
<b>Web of Science</b>	3	<b>9</b>	<b>Q1 WoS: 2 публикации; RSCI: 7 публикаций</b>
<b>Scopus</b>	6	<b>7</b>	
<b>РИНЦ</b>	4	<b>7</b>	
<b>Итого</b>	13	<b>23</b>	

### Список участников МНШ, защитивших диссертации

1. Антипов Алексей Семенович. Диссертация «Блочный метод синтеза сигмоидальных обратных связей для мехатронных систем при действии возмущений» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1, дата защиты 22.11.2021.

## Важнейшие полученные результаты

---

- составлены динамические наблюдатели–дифференциаторы полного и редуцированного порядков, со стандартной структурой в виде наблюдателя, копирующего структуру наблюдаемой системы, и в виде дифференциатора без собственной динамики;
- разработаны декомпозиционные процедуры синтеза кусочно-линейных корректирующих воздействий, обеспечивающих заданную точность и время оценивания.
- разработанные алгоритмы использованы в системах автоматического управления колесными роботами и беспилотными летательными аппаратами при решении задачи слежения на плоскости и в пространстве;
- для нелинейных одноканальных объектов, представимых в треугольной форме вход–выход, в рамках блочного подхода разработана декомпозиционная процедура синтеза S-образных обратных связей. В качестве приложения рассмотрена система управления одноканальным электро-механическим объектом.

# Кокунько Юлия Георгиевна, м.н.с. лаб 37, соискатель

Публикаций за отчетный период **10**, в том числе:

**WoS: 4 (Q1: 1)**

**WoS+Scopus: 7**

**RSCI: 3**

## Участие в научных мероприятиях

1. 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021), 17–21 May 2021, Sochi, RF.
2. 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 5–11 September 2021, Sochi, RF.
3. XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами», 6–9 сентября 2021, Москва–Звенигород.
4. 20th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS 2021), 14–17 September 2021, Moscow, ICS RAS.
5. 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2021), 27–29 September 2021, Moscow, ICS RAS.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

---

Детерминированный задающий сигнал  $g(t) \in R$  поступает в систему управления в реальном времени из автономного источника.

Ставится задача восстановления его производных  $\dot{g}(t), \ddot{g}(t), \dots, g^{(n)}(t)$  с помощью дифференциатора, который реализуется в виде динамического наблюдателя виртуальной канонической модели

$$\dot{g}_i = g_{i+1}, i = \overline{1, n+1},$$

где  $g_1(t) = g(t)$  – известный выход;

$g_{i+1}(t) = g^{(i)}(t), i = \overline{1, n}$  – неизвестные переменные состояния, подлежащие оцениванию;

$g_{n+2}(t)$  – неизвестный вход, трактуется как внешнее ограниченное возмущение  $|g_{n+2}(t)| \leq G_{n+2}, t \geq 0$ .

# НАБЛЮДАТЕЛЬ СТАНДАРТНОЙ СТРУКТУРЫ

$$\dot{z}_i = z_{i+1} + v_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad \dot{z}_{n+1} = v_{n+1},$$

где  $z = (z_1, \dots, z_{n+1})^T \in R^{n+1}$  – вектор состояния наблюдателя,

$v_i$  – корректирующие воздействия.

Система относительно ошибок наблюдения  $\varepsilon_i = g_i - z_i, i = \overline{1, n+1}$ :

$$\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_{i+1} - v_i, \quad i = \overline{1, n},$$

$$\dot{\varepsilon}_{n+1} = g_{n+2} - v_{n+1}.$$

Цель: стабилизация ошибок наблюдения с заданной точностью

$$|\varepsilon_j(t)| \leq \delta \Rightarrow |g_j(t) - z_j(t)| \leq \delta, \quad i = \overline{1, n+1}, t \geq T.$$

Стандартный метод решения: линейные корректирующие воздействия с большим коэффициентом  $l \gg 1$ :

$$v_1 = a_1 l \varepsilon_1, v_2 = a_2 l^2 \varepsilon_1, \dots, v_{n+1} = a_{n+1} l^{n+1} \varepsilon_1,$$

$a_i$  – коэффициенты гурвицева полинома  $\lambda^{n+1} + a_1 \lambda^n + a_2 \lambda^{n-1} \dots + a_n \lambda + a_{n+1}$ .



# НАБЛЮДАТЕЛЬ – ДИФФЕРЕНЦИАТОР

$$\dot{z}_i = v_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad \dot{z}_{n+1} = v_{n+1},$$

Система относительно ошибок  $\varepsilon_i = g_i - z_i$ :  $\dot{\varepsilon}_i = g_{i+1} - v_i, \quad i = \overline{1, n+1}. \quad (1)$

Кусочно-линейные корректирующие воздействия:

$$v_1 = p_1 \text{sat}(l_1 \varepsilon_1) = \begin{cases} p_1 \text{sign} \varepsilon_1, & |\varepsilon_1| > 1/l_1, \\ p_1 l_1 \varepsilon_1, & |\varepsilon_1| \leq 1/l_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$v_i = p_i \text{sat}(l_i (v_{i-1} - z_i)) = \begin{cases} p_i \text{sign}(v_{i-1} - z_i), & |v_{i-1} - z_i| > 1/l_i, \\ p_i l_i (v_{i-1} - z_i), & |v_{i-1} - z_i| \leq 1/l_i, \quad i = \overline{2, n+1}. \end{cases}$$

Настраиваемые параметры:  $p_i > 0$  – амплитуда (определяет скорость оценивания),  $l_i > 0$  – коэффициент усиления (определяет точность оценивания).

**Теорема.** Если в системе (1)–(2) внешние сигналы ограничены  $|g_i(t)| \leq G_i$ ,  $t \geq 0$ , то тогда для любых начальных условий  $\varepsilon_i(0), i = \overline{1, n+1}$  и сколь угодно малых  $\delta, T > 0$  найдутся такие положительные действительные числа  $p_i^*, l_i^*$ , что  $\forall p_i, l_i : p_i > p_i^*, l_i > l_i^*$  выполняются неравенства  $|\varepsilon_i(t)| = |z_i(t) - g_i(t)| \leq \delta, \quad i = \overline{1, n+1}, \quad t \geq T.$

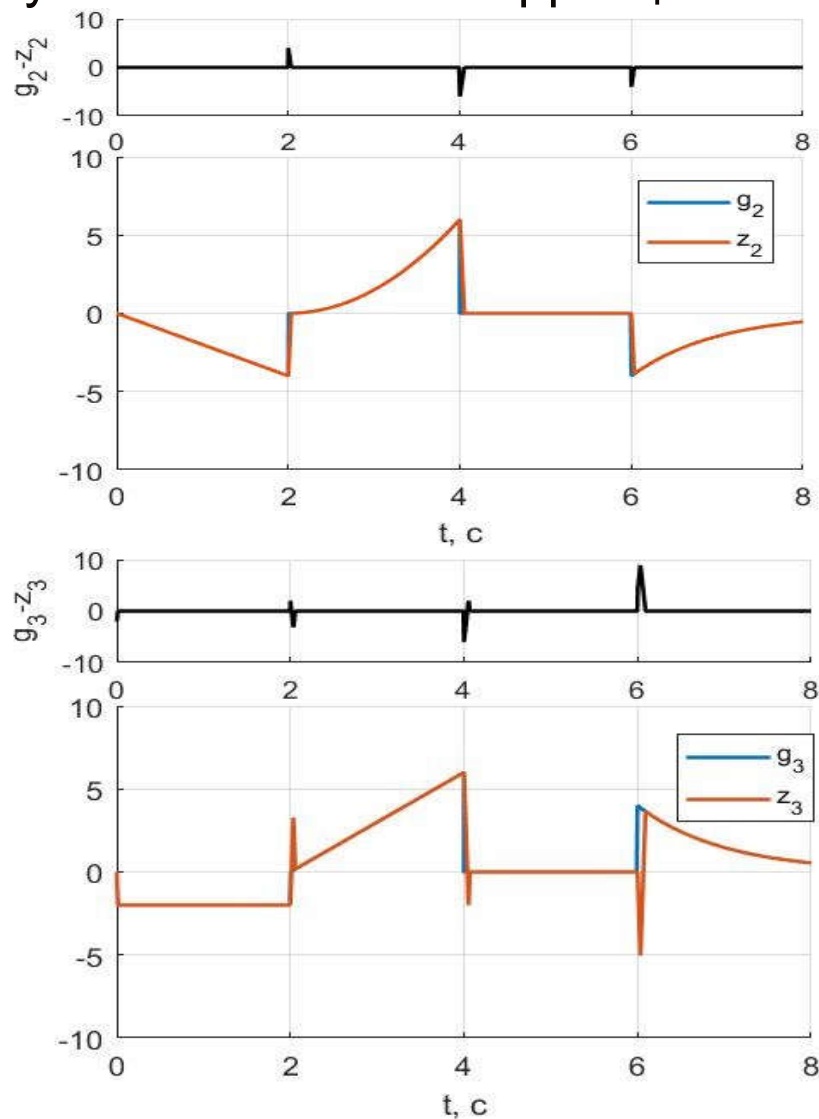
## Основные отличия дифференциатора от стандартного линейного наблюдателя с глубокими обратными связями

---

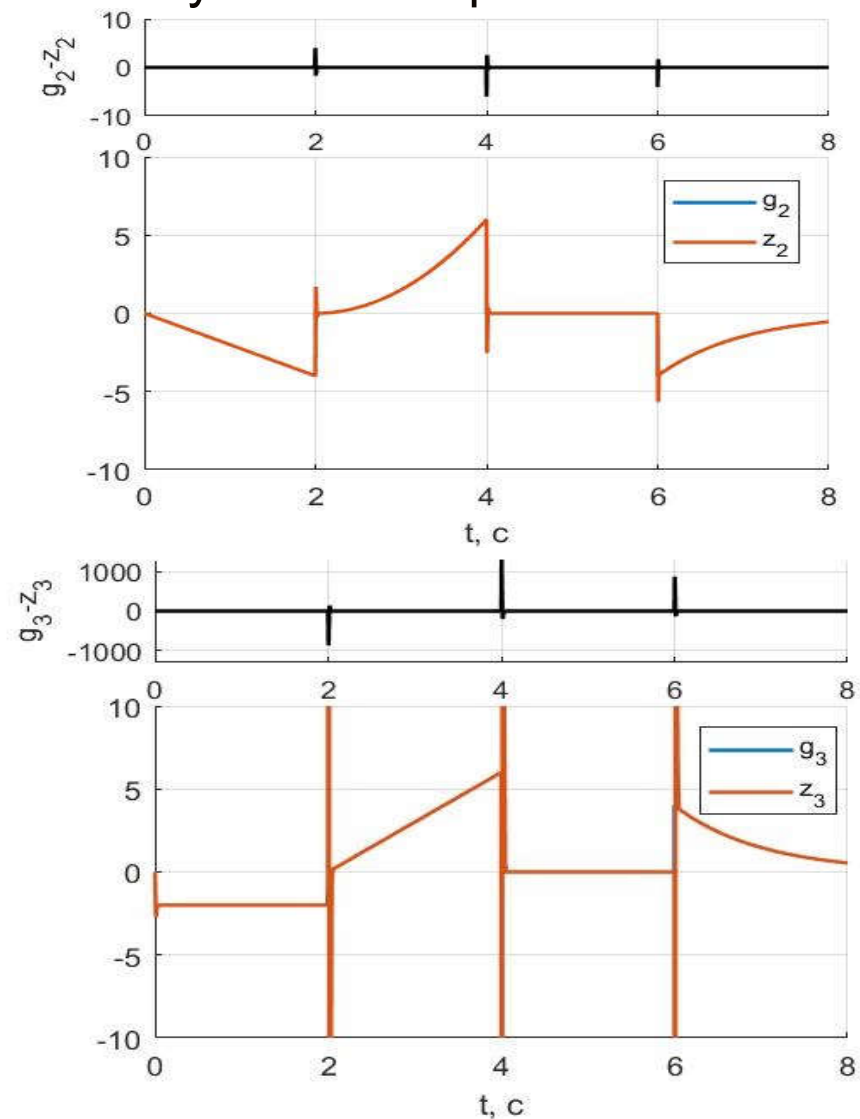
1. Настройка параметров кусочно-линейной коррекции основана на неравенствах и не требует составления эталонных полиномов.
2. Кусочно-линейные корректирующие воздействия всюду ограничены, поэтому существенно ограничены и всплески оценочных сигналов производных в начале переходных процессов, которые обусловлены сменой формы  $g(t)$ . Всплески же оценочных сигналов наблюдателя с линейными глубокими обратными связями увеличиваются на порядок с ростом порядка оцениваемой производной, поэтому их использование в практических приложениях требует дополнительных ограничительных мер.
3. Использование кусочно-линейной коррекции расширяет класс оцениваемых сигналов за счет кусочно-дифференцируемых функций.

# ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Дифференциатор  
с кусочно-линейной коррекцией



Наблюдатель с линейными  
глубокими обратными связями



## ЗАЯВКА НА ПРОДЛЕНИЕ ПРОЕКТА НА ГРАНТ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ МОЛОДЕЖНЫХ НАУЧНЫХ ШКОЛ ИПУ РАН НА 2022-2023 гг. В ТОМ ЖЕ СОСТАВЕ

№ п/п	ФИО	Ученая степень, ученое звание, должность	Структурное подразделение
	Краснова Светлана Анатольевна – руководитель	д.т.н., проф., г.н.с. (осн., 0,4 ст.)	Лаб. № 37
Молодые ученые			
1	Антипов Алексей Семенович 1992 г. р.	к.т.н., н.с. (осн., 1,0 ст.)	Лаб. № 37
2	Кокунько Юлия Георгиевна 1995 г. р.	м.н.с., соискатель (осн., 1,0 ст.)	Лаб. № 37
3	Уткин Антон Викторович 1980 г. р.	д.т.н., в.н.с. (осн., 1,0 ст.).	Лаб. № 37

## **Заявка на продление проекта на второй год**

---

### **Проект (2021–2023)**

«Методы синтеза наблюдателей состояния и дифференциаторов внешних сигналов для информационного обеспечения систем слежения, функционирующих в условиях неопределенности»

### **Второй этап, 2022-2023 гг.:**

«Методы синтеза динамических генераторов реализуемых задающих воздействий с учетом ограничений на переменные состояния объекта управления»

## Ожидаемые научные результаты

---

В детерминированной постановке будут разработаны методы и алгоритмы для решения проблем, связанных с генерацией **реализуемых** путей следования для автономных мобильных роботов.

Для решения проблемы сглаживания составных маршрутов будет спроектирован динамический генератор, построенный как копия уравнений движений конкретного объекта управления. Разработка декомпозиционной процедуры синтеза S-образных гладких корректирующих воздействий генератора, в которых используется опорный негладкий векторный сигнал, описывающий маршрут движения в первом приближении, будет рассматриваться на примере систем управления БПЛА и трехколесной платформы. При настройке генератора будут учитываться ограничения на переменные состояния и управления конкретного робота. Таким образом, генератор будет порождать гладкие выходные сигналы (пути следования), а также их производные, реализуемые конкретным роботом.

Данные алгоритмы реализуются в реальном времени и не потребуют больших вычислительных затрат, а также сложных геометрических расчетов на стадии планирования движения.

# Антипов Алексей Семенович, к.т.н., н.с. лаб 37

---

Публикаций за отчетный период **7**, в том числе:

**WoS: 3 (Q1: 1)**

**WoS+Scopus: 4**

**RSCI: 3**

## Участие в научных мероприятиях

- 1 XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами», 6–9 сентября 2021, Москва–Звенигород.
- 2 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2021), 27–29 September 2021, Moscow, ICS RAS.

Диссертация «Блочный метод синтеза сигмоидальных обратных связей для мехатронных систем при действии возмущений» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. **Дата защиты 22.11.2021.**

## Математическая модель объекта управления:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t) + b_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t)x_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-1}, \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) + b_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t)u,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $x = \text{col}(x_1, \dots, x_n) \in X \subset R^n$  – измеряемый вектор состояния,  
 $x_1 \in X_1 \subset R$  – выходная (регулируемая) переменная,  
 $f_i, b_i$  – функции от переменных состояния и внешних воздействий,  
 $u \in R$  – управление.

### Предположения:

$$\begin{aligned}|f_i(t)| &\leq F_i = \text{const} > 0, \\ b_i(t) &\neq 0,\end{aligned}\quad (2)$$

$$0 < b_{i,\min} \leq |b_i(t)| \leq b_{i,\max},$$

$$t \geq 0, i = \overline{1, n};$$

$$g(t) \in G \subseteq X_1,$$

$$|\dot{g}(t)| \leq G_1, t \geq 0.$$

### Цель управления:

$$\begin{aligned}|e_1(t)| &\leq \Delta_1, t \geq t_1, \\ e_1(t) &= x_1(t) - g(t),\end{aligned}\quad (3)$$

где  $\Delta_1, t_1$  – заданы.



## Блочный синтез обратных связей

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t) + b_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t)x_{i+1}, \quad i = \overline{1, n-1}, \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) + b_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t)u.\end{aligned}\quad (1)$$

**Замена переменных:**

$$e_1 = x_1 - g, \quad (4)$$

$$e_i = x_i - x_i^* = x_i + \text{sign}(b_{i-1})m_{i-1}\sigma(k_{i-1}e_{i-1}),$$

$$m_{i-1}, k_{i-1} = \text{const} > 0, \quad i = \overline{2, n}.$$

**Управление:**

$$u = -\text{sign}(b_n)m_n\sigma(k_n e_n), \quad k_n, m_n = \text{const} > 0. \quad (5)$$

$$\dot{e}_1 = -|b_1| m_1 \sigma(k_1 e_1) + f_1 - \dot{g} + b_1 e_2; \quad (6)$$

$$\dot{e}_i = -|b_i| m_i \sigma(k_i e_i) + f_i + \Lambda_{i-1} + b_i e_{i+1}, i = \overline{2, n-1};$$

$$\dot{e}_n = -|b_n| m_n \sigma(k_n e_n) + f_n + \Lambda_{n-1},$$

где  $\Lambda_i = \text{sign}(b_i) m_i \frac{k_i (1 - \sigma^2(k_i e_i))}{2} \dot{e}_i, i = \overline{1, n-1}$ .

**Теорема.** Если в системе (6) выполняются условия (2), то тогда для любых начальных условий  $x(0) \in X$  и любых, сколь угодно малых  $\Delta_1 > 0$ ,  $t_1 > 0$  найдутся такие действительные числа  $\bar{k}_i > 0, i = \overline{1, n}, 0 < \bar{m}_i < \bar{\bar{m}}_i, i = \overline{1, n-1}, \bar{m}_n > 0$ , что при любых  $k_i \geq \bar{k}_i, m_i : \bar{m}_i < m_i \leq \bar{\bar{m}}_i, m_n \geq \bar{m}_n$  выполняется неравенство  $|e_i(t)| \leq \Delta_1, t \geq t_1$ .

### Требуемая точность:

$$|e_n(t)| \leq \Delta_n (t \geq t_n > 0) \Rightarrow |e_{n-1}(t)| \leq \Delta_{n-1} (t \geq t_{n-1} > t_n) \Rightarrow \dots \Rightarrow |e_1(t)| \leq \Delta_1 (t \geq t_1 > t_2). \quad (7)$$

### Выбор $k_i$ :

$$k_i^* \geq \bar{k}_i = 2,2 / \Delta_i, i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

### Выбор $m_i$ :

$$\max\{m_{11}; m_{12}\} < \bar{m}_1 < \bar{\bar{m}}_1,$$

$$m_{11} = \frac{|e_1(0)| - \Delta_1 + (F_1 + G_1 + b_{1,\min} \Delta_2)(t_1 - t_2^*)}{0,8b_{1,\min} t_1 - (0,8b_{1,\min} + 3b_{1,\max}) t_2^*}, m_{12} = \frac{|x_2(0)| - \Delta_2}{2}, \bar{\bar{m}}_1 = \frac{E_1 - |e_1(0)|}{3b_{1,\max} t_2^*};$$

$$\max\{m_{i1}; m_{i2}\} < \bar{m}_i < \bar{\bar{m}}_i,$$

$$m_{i1} \geq \frac{|x_i(0)| + m_{i-1}^* - \Delta_i^* + (F_i + k_{i-1}^* (m_{i-1}^*)^2 b_{i-1,\max} + b_{i,\min} \Delta_{i+1})(t_i^* - t_{i+1})}{0,8b_{i,\min} t_i^* - (0,8b_{i,\min} + 3b_{i,\max}) t_{i+1}}, \quad (9)$$

$$m_{i2} = \frac{|x_{i+1}(0)| - \Delta_{i+1}}{2}, \bar{\bar{m}}_i = \frac{2m_{i-1}^* + \Delta_i^* - |x_i(0)|}{3b_{i,\max} t_{i+1}^*}, i = \overline{2, n-1};$$

$$m_n \geq \bar{m}_n = \frac{1,25}{b_{n,\min}} \left( \frac{|x_n(0)| + m_{n-1}^* - \Delta_n^*}{t_n^*} + F_n + k_{n-1}^* (m_{n-1}^*)^2 b_{n-1,\max} \right).$$

## Результаты моделирования для перевернутого маятника

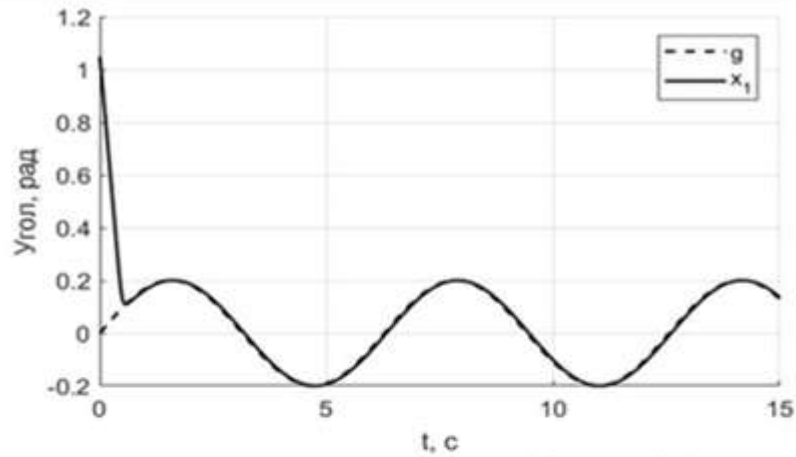
$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = a_{21} \sin x_1 - a_{22} x_2 + b_2 x_3 + \eta(t), \dot{x}_3 = -a_{32} x_2 - a_{33} x_3 + b_3 u, \quad (10)$$

где  $a_{21} = \tilde{g} / l, a_{22} = \kappa / l, b_2 = k_a / (\tilde{m} l^2), a_{32} = c / L, a_{33} = R / L, b_3 = 1 / L$  – неопределенные параметры.

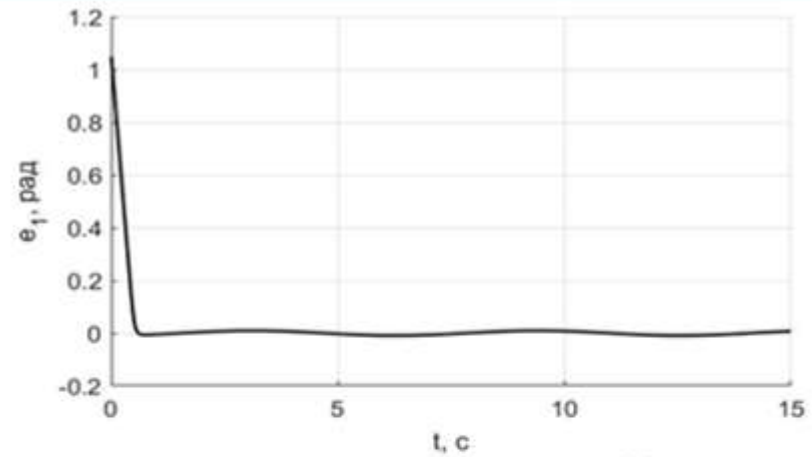
$$\text{Цель: } |x_1(t) - g(t)| \leq 0,1 \text{ [рад]}, t \geq t_1 = 5 \text{ [с]} \quad (11)$$

	Диапазон изменения	Вид или значение			
		Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3	Эксперимент 4
$\eta(t)$	$[-0,5; 0,5]$	$0,25t, t \in [(k-1)T, kT), k = 1, 2, \dots, T = 2$		$0,5 \cos t$	$0,3 \sin t$
$g(t)$	$[-0,5; 0,5]$ $ \dot{g}(t)  \leq 0,5$	$0,2 \sin t$		$0,5  \sin t $	$0,25 \sin 2t$
$\tilde{m}$	$[0,18; 0,25]$	0,18	0,25	$0,07  \cos(t/2)  + 0,18$	
$l$	$[0,2; 0,3]$	0,2	0,3	0,25	0,23
$\kappa$	$[2; 4]$	2	4	3	3,8
$c$	$[0,27; 0,33]$	0,27	0,33	0,3	0,28
$R$	$[4,15; 4,2]$	4,15	4,2	4,18	4,1
$L$	$[0,012; 0,013]$	0,012	0,013	0,013	0,012
$k_a$	$[1,68; 1,75]$	1,68	1,75	1,7	1,69

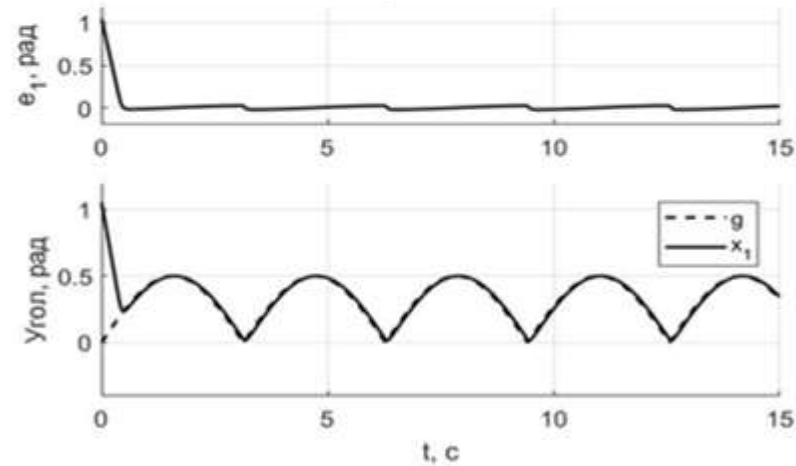
5/7



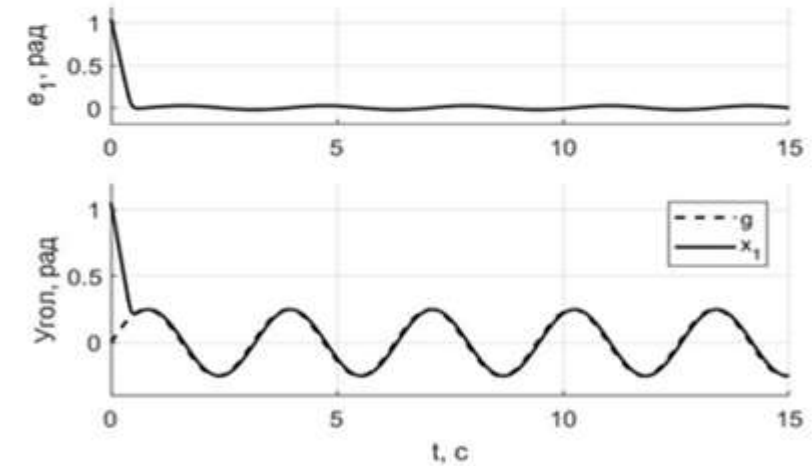
**Рис. 1.** Графики  $g(t)$ ,  $x_1(t)$   
(эксперимент 1)



**Рис. 2.** Графики  $e_1(t)$   
(эксперимент 2)



**Рис. 3.** Графики  $g(t)$ ,  $x_1(t)$ ,  
 $e_1(t) = x_1(t) - g(t)$   
(эксперимент 3)



**Рис. 4.** Графики  $g(t)$ ,  $x_1(t)$ ,  
 $e_1(t) = x_1(t) - g(t)$   
(эксперимент 4)

## **Планы на будущий этап и ожидаемые результаты**

**Применение в комплексе S-образных функций для синтеза обратной связи, наблюдателя состояния и планирования движения для электромеханического объекта управления– ходовой тележки однобалочного мостового крана с грузом, закрепленным на тросе.**

**Особенности объекта: дефицит управлений, параметрическая неопределенность, действие несогласованных возмущений, наличие проектных ограничений, неполный комплект датчиков.**

### **Ожидаемые результаты:**

- разработка методов планирования S-образных траекторий, обеспечивающих плавные разгон и торможение тележки и, как следствие, уменьшение колебаний груза, закрепленного на тросе;**
- разработка методов синтеза динамической S-образной обратной связи, обеспечивающей отслеживание заданной траектории инвариантно по отношению к параметрическим и внешним несогласованным возмущениям в системе с неполными измерениями.**

# Уткин Антон Викторович, д.т.н., в.н.с. лаб. 37

Публикаций за отчетный период **7**, в том числе:

**WoS: 4 (Q1: 1)**

**WoS+Scopus: 6**

**RSCI: 2**

## Участие в научных мероприятиях

1. 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 5–11 September 2021, Sochi, RF.
2. 20th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS 2021), 14–17 September 2021, Moscow, ICS RAS.
3. 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2021), 27–29 September 2021, Moscow, ICS RAS.

## Важнейшие полученные результаты

---

Предложен новый подход к синтезу робастного управления для практически значимого класса линейных стационарных параметрически неопределенных систем, в которых структурные свойства управляемости номинальной системы не изменяются при вариации параметров в допустимых пределах.

Для частного случая систем с показателем управляемости, равным двум, детально формализованы процедуры синтеза стабилизирующей обратной связи, в которых комплексно используются понятия регулярной формы и сверхустойчивости. Концептуально показана возможность распространения данного подхода на управляемые системы общего вида.

На численных примерах показана принципиальная возможность ограничения управляющих воздействий, а также работоспособность предложенного метода в нестационарных системах.

**Планы на будущий этап:** строгая формализация разработанных алгоритмов робастного управления применительно: 1) к системам с ограничениями на управляющие воздействия; 2) к нестационарным линейным параметрически неопределенным системам.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**