

# СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НЕСОГЛАСОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ<sup>33</sup>

Гулюкина С.И., Уткин В.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65  
gulyukina.s.i@mail.ru, vicutkin@ipu.ru

*Аннотация* : В данной работе предлагается новая философия синтеза скользящих режимов с использованием метода расширения пространства состояний и блочного принципа в управлении. Важной особенностью разрабатываемых алгоритмов синтеза инвариантных систем, в отличие от систем с глубокими обратными связями, является ограниченность по модулю управлений и координат вектора состояния.

Ключевые слова : метод расширения пространства состояний, блочный подход, скользящие режимы, несогласованные возмущения, задача слежения, ограничения на фазовые переменные и управление.

## Введение

Рассматривается задача обеспечения инвариантности выходных переменных линейного объекта управления по отношению к внешним, несогласованным возмущениям с учетом ограничений на управление и фазовые переменные. Возмущения полагаются неизвестными, ограниченными по модулю функциями.

В развитии теории инвариантности систем автоматического управления в настоящее время можно выделить три основных направления. Первый подход (начиная с работы [1]) основывается на свойстве неуправляемости выходных переменных относительно возмущений в многосвязных линейных системах [2] (полная инвариантность). Второй подход основан на расширении пространства состояний за счет автономных динамических моделей с известными параметрами и неизвестными начальными условиями, имитирующих внешние воздействия [2], в которых инвариантность выходных переменных обеспечивается в асимптотике. И, наконец, классическим способом подавления произвольных, ограниченных по модулю возмущений являются скользящие режимы [3,4] (точная компенсация возмущений за конечное время) и системы с глубокими обратными связями [5] (стабилизация выходных переменных с заданной точностью,  $\varepsilon$  - инвариантность). Существенным ограничением этих подходов является тот факт, что инвариантность обеспечивается только относительно согласованных возмущений (действующим по каналам управления).

Дальнейшее развитие теории инвариантности связано с привлечением идеологии блочного подхода в линейных [6] и нелинейных [7,8] системах. За счет использования в качестве фиктивных управлений компонент вектора состояния удалось решить задачу инвариантности относительно выходных переменных к произвольным ограниченным по модулю возмущениям с использованием глубоких обратных связей [9-10]. Отметим, что использование глубоких обратных связей приводит к неограниченному росту как собственно управлений, так и компонент вектора состояний. В ряде последних публикаций эта проблема решается за счет использования в цепи обратной связи вместо линейных функций непрерывных функций с насыщением [11].

В данной работе предпринимается попытка предложить решение задачи обеспечения инвариантности относительно выходных переменных с заданной точностью с использованием теории скользящих режимов. Предлагаемые методы основываются на блочном подходе, возможности достижения полной инвариантности при движении в скользящем режиме и заведомо ограниченными амплитудами разрывных управлений.

Работе имеет следующую структуру. В разделе 1 описывается постановка задачи. В разделе 2 используется метод расширения пространства состояний за счет низкочастотных фильтров и организации скользящих режимов в виртуальном пространстве смешанных переменных. Основные идеи поясняются на примерах линейных возмущенных систем третьего порядка соответственно и без ограничения общности могут быть распространены на многомерные многосвязные системы. В разделе 3 приведена расчетная схема синтеза вводимых в обратную связь фильтров и даются оценки сверху на изменение координат вектора состояния и управления. В разделе 4 приводится схема расчета постоянных времени фильтров. В разделе 5 приведены результаты численного моделирования в среде Matlab-Simulink.

<sup>33</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 20-01-00363 А)

## 1 Постановка задачи

Рассмотрим линейную систему третьего порядка при действии внешних неконтролируемых возмущений вида

$$\dot{x}_1 = x_2 + \eta_1(x, t), \dot{x}_2 = x_3 + \eta_2(x, t), \dot{x}_3 = u + \eta_3(x, t) \quad (1)$$

где  $(x_1, x_2, x_3)^T \in R^3$  – вектор состояния, доступный для измерения,  $x_1$  – выходная переменная,  $u \in R$  – управление,  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3)^T$  – вектор внешних возмущений, возмущения  $\eta_{1,2}(x, t)$  являются не согласованным,  $\eta_3(x, t)$  – согласованным. На переменные системы (1) наложены ограничения вида

$$|x_i| \leq X_i, |\eta_i(x, t)| \leq N_i, i = 1, 2, 3, |u| \leq U, X_i, N_i, U = \text{const}, \quad (2)$$

а также полагаются выполненными необходимые условия

$$X_2 > N_1, X_3 > N_2, U > N_3. \quad (3)$$

Ставится задача синтеза динамической обратной связи, обеспечивающей инвариантность выходной переменной по отношению к внешним возмущениям с заданной точностью

$$|x_1(t)| \leq \Delta_0 = \text{const}, \forall t > T_1 > 0, \quad (4)$$

с выполнением условий (2).

Отметим, что ввод зависимости внешних возмущений от компонент вектора состояний приводит к нелинейной модели объекта управления (1).

## 2 Обеспечение инвариантности по выходу

Ниже представлено решение в рамках метода расширения пространства состояний, а именно, система (1) дополняется подсистемой фильтров с устойчивыми собственными движениями

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + v_i, i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

где  $|v_i(t)| \leq M_i = \text{const}, i = 1, 2, 3$  – ограниченные по модулю входные воздействия фильтров, определяемые далее.

При выборе начальных условий в фильтрах (5), ограниченной областью  $|a_i z_i(0)| < M_i, i = 1, 2, 3$ , справедливы следующие оценки

$$|a_i z_i| < M_i, |\dot{z}_i| < 2M_i, i = 1, 2, 3, \text{ для } \forall t > 0. \quad (6)$$

Эти свойства следуют из решения системы (5):

$$z_i(t) = e^{-a_i t} \left[ z_i(0) + \int_0^t e^{a_i \tau} v_i(\tau) d\tau \right] \Rightarrow |z_i(t)| \leq \left| \left( z_i(0) - \frac{M_i}{a_i} \right) e^{-a_i t} + \frac{M_i}{a_i} \right| < \frac{M_i}{a_i} \quad \text{в} \quad \text{силу}$$

$$-\frac{2M_i}{a_i} < z_i(0) - \frac{M_i}{a_i} < 0.$$

Введем динамическую замену переменных с учетом (1), (5)

$$\bar{x}_1 = x_1 - z_1, \bar{x}_2 = x_2 - z_2 + a_1 z_1, \bar{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2 \quad (7)$$

и запишем систему (1) с выбранной обратной связью

$$u = -a_3 z_3 \quad (8)$$

относительно новых переменных (7):

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= \bar{x}_2 + z_2 - v_1 + \eta_1, \\ \dot{\bar{x}}_2 &= \bar{x}_3 + z_3 - v_2 + a_1 \dot{z}_1 + \eta_2, \\ \dot{\bar{x}}_3 &= -v_3 + a_2 \dot{z}_2 + \eta_3. \end{aligned} \quad (9)$$

Основная идея предлагаемого подхода состоит в следующем. Решение задачи стабилизации системы (9) выбором фиктивных управлений  $v_i$ , приводит, согласно оценкам (6), к следующим соотношениям относительно исходных переменных системы (1):

$$\begin{aligned}
\bar{x}_1 = x_1 - z_1 = 0 &\Rightarrow |x_1| \leq \frac{M_1}{a_1}, \\
\bar{x}_2 = x_2 - z_2 + a_1 z_1 = 0 &\Rightarrow |x_2| \leq \frac{M_2}{a_2} + M_1, \\
\bar{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2 = 0 &\Rightarrow |x_3| \leq \frac{M_3}{a_3} + M_2, \\
u = -a_3 z_3 &\Rightarrow |u| \leq M_3.
\end{aligned} \tag{10}$$

Выбор в первом соотношении (10) условия  $\frac{M_1}{a_1} \leq \Delta_0$  решает задачу стабилизации выходной переменной с заданной точностью (4). С другой стороны, неравенства

$$\begin{aligned}
|x_1| \leq \frac{M_1}{a_1} \leq \Delta_0, \quad |x_2| \leq \frac{M_2}{a_2} + M_1 \leq X_2, \\
|x_3| \leq \frac{M_3}{a_3} + M_2 \leq X_3, \quad |u| \leq M_3 \leq U
\end{aligned} \tag{11}$$

определяют ограничения (2).

В следующем подразделе решается задача стабилизации системы (9) в рамках теории разрывных систем. В разделе 4 приводится схема расчета постоянных времени фильтров. В разделе 5 приводятся результаты моделирования в среде Matlab.

### 3 Синтез виртуальных скользящих режимов

На входы фильтров (5) подадим разрывные сигналы

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + v_i, \quad v_i = M_i \text{sign}(\bar{x}_i), \quad i=1,2,3. \tag{12}$$

Ставится задача выбора параметров фильтров (12) с целью стабилизировать вектор состояния замкнутой системы (9), (12) что, в отличие от исходной системы (1), оказывается возможным.

На основе достаточных условий возникновения скользящих режимов  $\bar{x}_i \dot{\bar{x}}_i < 0, i=1,2,3, \bar{x}_i \neq 0$  применительно к системе (9), (12) и с учетом (6), имеем нижние оценки на выбор амплитуд:

$$M_1 > N_1 + \frac{M_2}{a_2}, M_2 > N_2 + \frac{M_3}{a_3} + 2a_1 M_1, M_3 > N_3 + 2a_2 M_2. \tag{13}$$

Условия (13) получены исходя из следующих соображений: сначала скользящий режим возникает в третьей подсистеме (9)  $\bar{x}_3 = 0$ , затем во второй  $\bar{x}_2 = 0$  и, наконец в первой  $\bar{x}_1 = 0$ .

Так, выбор амплитуды  $M_3 > 0$ , обеспечивающей скользящий режим по плоскости  $\bar{x}_3 = 0$ , определяется на основе второго метода Ляпунова:  $V = 0.5x_3^2$ .

Производная функции Ляпунова имеет вид:  $\dot{V} = \bar{x}_3 \dot{\bar{x}}_3 \leq |\bar{x}_3|(-M_3 + 2a_2 M_2 + N_3) < 0$ , откуда следует неравенство, определяющее выбор амплитуды  $M_3 > 2a_2 M_2 + N_3$ . Таким образом, при выполнении условия  $M_3 > 2a_2 M_2 + N_3$  возникает скользящий режим по плоскости  $\bar{x}_3 = 0$ .

Получим оценку времени возникновения скользящего режима по плоскости  $\bar{x}_3 = 0$ . Пусть  $\Delta M_3 = M_3 - 2a_2 M_2 - N_3, \Delta M_3 = \text{const} > 0$ . Заметим, что полученная оценка производной функции Ляпунова мажорируется решением дифференциального уравнения вида  $\dot{V} \leq -|\bar{x}_3| \Delta M_3 = -\Delta M_3 \sqrt{2V} < 0$ , которое решается в явном виде  $V(t) = (-0.5\sqrt{2}\Delta M_3 t + V^{1/2}(0))^2$  с начальным значением  $V(0) = 0.5\bar{x}_3^2(0)$  и конечным значением  $V(t_1) = 0$ . Получаем оценку времени возникновения скользящего режима по плоскости  $\bar{x}_3 = 0$ :  $V(t_1) = 0 \Rightarrow t_1 \geq \frac{\sqrt{2}V^{1/2}(0)}{\Delta M_3} = \frac{|\bar{x}_3(0)|}{\Delta M_3}$ .

Применяя аналогичный анализ для второй и первой подсистем (9) получим оценку времени возникновения скользящих движений в системе:  $T = t_3 + t_2 + t_1, t_1 \geq \frac{|\bar{x}_3(0)|}{M_3 - 2a_2 M_2 - N_3}$ ,

$$t_2 \geq \frac{|\bar{x}_2(t_1)|}{M_2 - N_2 - \frac{M_3}{a_3} - 2a_1M_1}, \quad t_3 \geq \frac{|\bar{x}_1(t_2)|}{M_1 - N_1 - \frac{M_3}{a_3}}, \quad \text{где} \quad |\bar{x}_2(t_1)| \leq (\bar{x}_3(0) + \frac{M_3}{a_3} - M_2 + 2a_1M_1 + N_2)t_1,$$

$$|\bar{x}_1(t_2)| \leq (x_2(t_1) - M_3 + 2a_2M_2 + N_2)t_2.$$

Увеличение запаса в неравенствах (13) уменьшает время возникновения скользящих режимов по всем плоскостям.

#### 4 Схема выбора постоянных времени фильтров

Получим оценки точности стабилизации исходных переменных (1) менее консервативные, чем (10) с учетом возникновения скользящих режимов в системе (9) и, кроме того, не зависящие от выбора амплитуд разрывных управлений в фильтрах.

Согласно методу эквивалентного управления [3] определим эквивалентные значения управлений из (9) (приравниваем вектор производных состояния нулю и решаем алгебраическую систему уравнений относительно управлений)

$$v_{1eq} = z_2 + \eta_1, \quad v_{2eq} = z_3 + a_1\dot{z}_1 + \eta_2, \quad v_{3eq} = a_2\dot{z}_2 + \eta_3 \quad (14)$$

и подставим их в уравнения фильтров (5), описывающих поведения системы фильтров при функционировании системы (9) в скользящем режиме:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -a_1z_1 + z_2 + \eta_1, \\ \dot{z}_2 &= -a_2z_2 + z_3 + a_1\dot{z}_1 + \eta_2, \\ \dot{z}_3 &= -a_3z_3 + a_2\dot{z}_2 + \eta_3. \end{aligned} \quad (15)$$

Отсюда получим менее консервативные оценки чем (6) на переменные фильтров и их производные. Заменяя амплитуды в (6) на значения

$$\bar{M}_1 = |z_2| + N_1, \quad \bar{M}_2 = |z_3| + |a_1\dot{z}_1| + N_2, \quad \bar{M}_3 = |a_2\dot{z}_2| + N_3 \quad (16)$$

имеем оценки, аналогично (6)

$$|a_i z_i| \leq \bar{M}_i < M_i, \quad |\dot{z}_i| \leq 2\bar{M}_i < 2M_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{для} \quad \forall t > 0. \quad (17)$$

Следующие пошаговые выкладки дают расчетную схему выбора постоянных времени фильтров с учетом корректируемых в процессе выбора соотношений (16), (17).

Учитывая выполнение условия (4) в первой подсистеме должны выполняться соотношения

$$\bar{x}_1 = 0, \quad x_1 = z_1 \Rightarrow |a_1 z_1| \leq \bar{M}_1^* = |z_2| + N_1 \leq a_1 \mathcal{A}_0.$$

В этом случае справедливы следующие оценки:

$$|z_1| \leq \mathcal{A}_0, \quad |z_2| \leq a_1 \mathcal{A}_0 - N_1, \quad |\dot{z}_1| \leq 2a_1 \mathcal{A}_0 \quad \text{и} \quad \bar{M}_2^* = |z_3| + 2a_1^2 \mathcal{A}_0 + N_2.$$

Применительно ко второй подсистеме (15) выполняются следующие соотношения

$$|a_2 z_2| \leq \bar{M}_2^* = |z_3| + 2a_1^2 \mathcal{A}_0 + N_2 \leq a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1).$$

В этом случае справедливы следующие оценки:

$$|z_3| \leq a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) - (2a_1^2 \mathcal{A}_0 + N_2), \quad |\dot{z}_2| \leq 2a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) \quad \text{и} \quad \bar{M}_3^* = 2a_2^2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) + N_3.$$

Применительно к третьей подсистеме (15) выполняются следующие соотношения

$$|a_3 z_3| \leq \bar{M}_3^* = 2a_2^2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) + N_3 \leq a_3(a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) - (2a_1^2 \mathcal{A}_0 + N_2)).$$

Введем обозначения  $\bar{\bar{M}}_1^* = a_1 \mathcal{A}_0$ ,  $\bar{\bar{M}}_2^* = a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1)$ ,  $\bar{\bar{M}}_3^* = a_3(a_2(a_1 \mathcal{A}_0 - N_1) - (2a_1^2 \mathcal{A}_0 + N_2))$ ,

тогда согласно оценкам  $|a_i z_i| \leq \bar{\bar{M}}_i^*$ ,  $|\dot{z}_i| \leq 2\bar{\bar{M}}_i^*$ , где  $\bar{\bar{M}}_i^*$  – верхние границы соответствующих величин  $\bar{\bar{M}}_i^*, \bar{M}_i \leq \bar{M}_i^* \leq \bar{\bar{M}}_i^* < M_i$ .

Объединяя приведенный выше анализ, перепишем оценки сверху на переменные исходной системы (1):

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 = x_1 - z_1 = 0 &\Rightarrow |x_1| \leq \frac{\bar{M}_1^*}{a_1} \leq \Delta_0, \\ \bar{x}_2 = x_2 - z_2 + a_1 z_1 = 0 &\Rightarrow |x_2| \leq \frac{\bar{M}_2^*}{a_2} + \bar{M}_1^* \leq 2a_1 \Delta_0 - N_1 \leq X_2, \\ \bar{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2 = 0 &\Rightarrow |x_3| \leq \frac{\bar{M}_3^*}{a_3} + \bar{M}_2^* \leq 2a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - (2a_1^2 \Delta_0 + N_2) \leq X_3. \\ |u| \leq |a_3 z_3| \leq \bar{M}_3^* &\leq a_3(a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - (2a_1^2 \Delta_0 + N_2)) \leq U\end{aligned}\quad (18)$$

С учетом физических ограничений (4), системы (18) и оценок (17) приведем систему неравенств на выбор постоянных времени фильтров:

$$\begin{aligned}\frac{N_1}{\Delta_0} < a_1 \leq \frac{X_2 + N_1}{2\Delta_0} \\ \frac{N_2 + 2a_1^2 \Delta_0}{(a_1 \Delta_0 - N_1)} < a_2 \leq \frac{X_3 + 2a_1^2 \Delta_0 + N_2}{2(a_1 \Delta_0 - N_1)}, \\ \frac{2a_2^2(a_1 \Delta_0 - N_1) + N_3}{a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2 \Delta_0} < a_3 \leq \frac{U}{a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2 \Delta_0}.\end{aligned}\quad (19)$$

Сделаем несколько замечаний относительно системы неравенств (19):

1. Существенно, что выбор постоянных фильтров согласно (19) не зависит от выбора амплитуд фиктивных управлений фильтров.
2. Выбор постоянных времени фильтров согласно (19) задают их иерархию вида  $a_3 > a_2 > a_1$ , а запас в обеспечении неравенств задает скорость сходимости замкнутой системы (9) в заданную окрестность (4).
3. Величина постоянных времени фильтров (12) полностью определяется заданной точностью стабилизации выходной переменной (4): с ростом заданной точности  $\Delta_0 \rightarrow \infty$ , постоянные времени стремятся к нулю.

Таким образом, последовательность синтеза фильтров (12) состоит из двух шагов. На первом шаге находятся постоянные времена фильтров из соотношений (19). На втором шаге определяются амплитуды разрывных воздействий фильтров согласно соотношениям (13).

## 5 Результаты моделирования

В качестве примера рассматривалась система третьего порядка вида (1)

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + 0.5\sin(8\pi t), \\ \dot{x}_2 &= x_3 + 2\cos(10\pi t), \\ \dot{x}_3 &= u + 0.8\sin(5\pi t).\end{aligned}\quad (20)$$

Физические ограничения модели объекта управления задавались следующим образом:

$$N_1 = 0.5, N_2 = 2, N_3 = 0.8, \Delta_0 = 0.02, X_2 = 20, X_3 = 50, U = 3500.$$

Начальные условия:  $x_1(0) = 0.8, x_2(0) = 10, x_3(0) = 0.05$ .

Выбор постоянных времени фильтров определялся неравенствами вида (19):

$$25 < a_1 \leq 512 \Rightarrow a_1 = 30, 380 < a_2 \leq 440 \Rightarrow a_2 = 400, 5334 < a_3 \leq 5833 \Rightarrow a_3 = 5500.$$

Амплитуды разрывных корректирующих воздействий были выбраны в соответствии с неравенствами (13)  $0.57 < M_1 \Rightarrow M_1 = 1.25, 9 < M_2 \Rightarrow M_2 = 30, 32\,000.8 < M_3 \Rightarrow M_3 = 32500$

На рис. 1.-3 представлены графики компонент вектора состояния в зависимости от времени

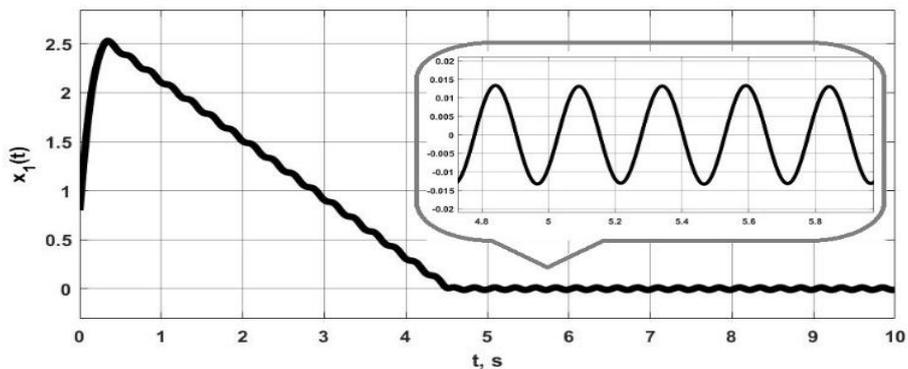


Рис.1. График зависимости  $x_1(t)$

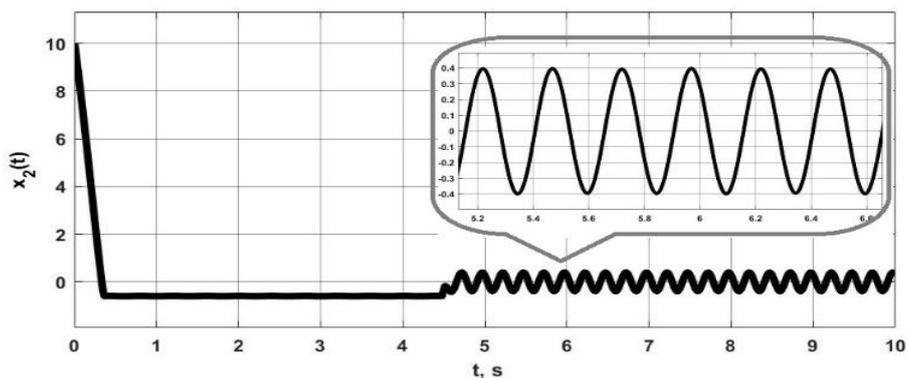


Рис.2. График зависимости  $x_2(t)$

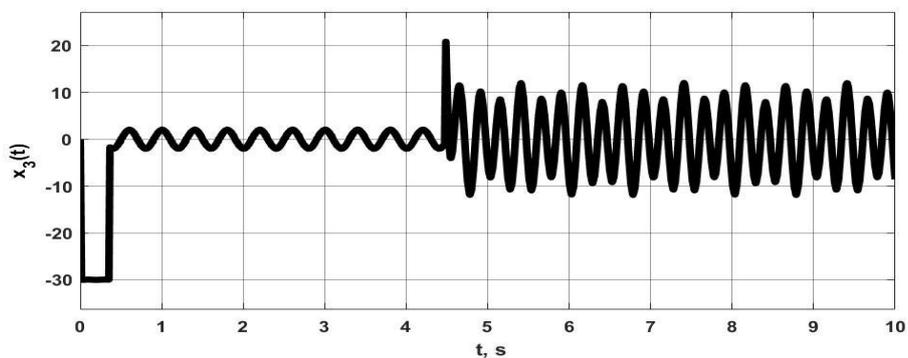


Рис.3. График зависимости  $x_3(t)$

На рис.4-6 представлены графики зависимости компонент фильтра от времени.

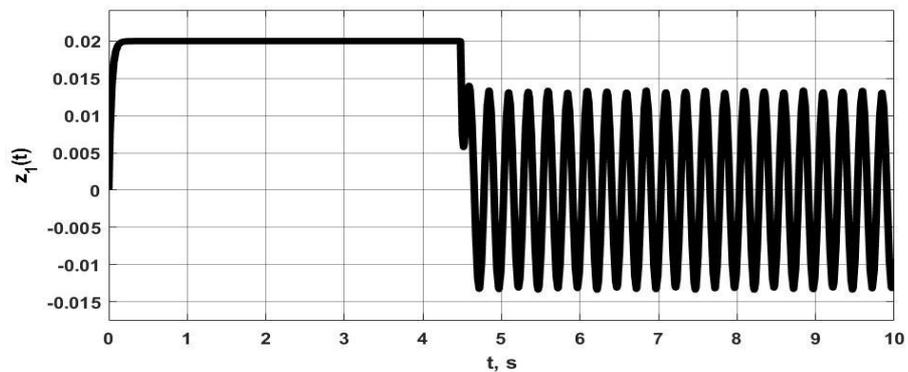


Рис.4. График зависимости  $z_1(t)$

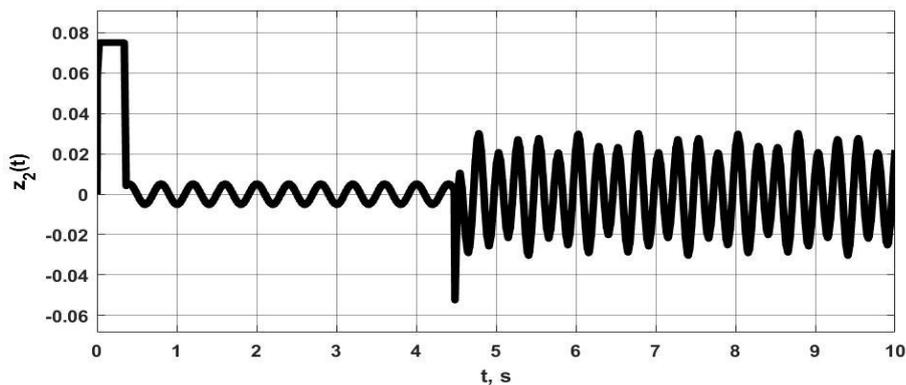


Рис.5. График зависимости  $z_2(t)$

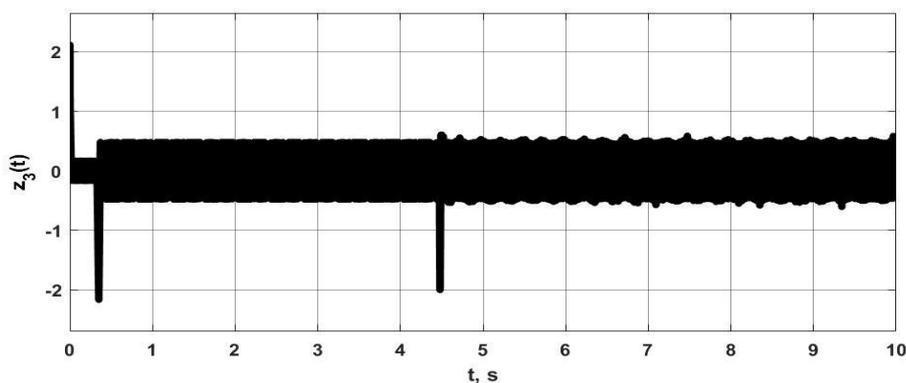


Рис.6. График зависимости  $z_3(t)$

На рис.7. представлен график среднего значения управления в зависимости от времени.

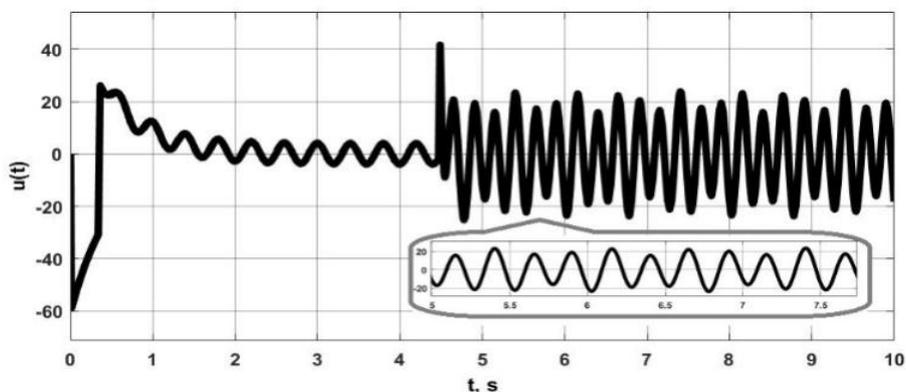


Рис.7. График зависимости среднего значения  $u(t)$  от времени

Скользящий режим в системе возникает за время  $T = t_3 + t_2 + t_1 = 4.47\text{s}$ .

## Заключение

В работе на примере динамической системы третьего порядка предложен метод синтеза  $\varepsilon$ -инвариантных систем на основе метода расширения пространства состояний и организации многомерного скользящего режима иерархической структуры. Нелинейные свойства определяются, во-первых, наличием нелинейных компонент собственно в модели объекта управления и, во-вторых, использованием в цепи обратной связи разрывных функций компонент вектора состояния. При этом использование разрывных управлений и создание скользящих режимов в виртуальной среде обеспечивает их физическую реализуемость, а ограниченность по модулю позволяет решить задачу учета ограничений на компоненты вектора состояния и управлений. Результаты моделирования показали эффективность предложенного подхода к синтезу инвариантных систем.

## Литература

1. *Щипанов Г.В.* Гироскопические приборы слепого полета: Теория, подсчет и методы конструирования. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности. 1997. – 421 с.
2. *Уонэм У.М.* Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход. – М.: Наука. 1980. – 376 с.
3. *Utkin V.I., Guldner J. and Shi J.* Sliding mode control in electro-mechanical systems. –New York.: CRC Press. 2009. –503 p.
4. *Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A.* Sliding mode control and observation // Control Engineering: Birkhauser. 2012. – 356 p.
5. *Мееров М.В.* Системы многосвязного регулирования. М.:Наука. 1967. С 628-639.
6. Дракунов С.В., Изосимов Д.Б., Лукьянов А.Г., Уткин В.А. и др Принцип блочного управления//АиТ. Выпуск 6. 1990. – С.20-31.
7. *Loukianov A.* Robust block decomposition sliding mode control design// Mathematical Problems in Engineering. Vol.8. 2002. – P. 349-365.
8. *Krstic M., Kanellakopoulos I., and Kokotovic P.* Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley-Interscience. 1995. – 576 p.
9. *Уткин В.А., Уткин В.И.* Синтез инвариантных систем методом разделения движений // АиТ. 1983, № 12. – С. 39-48.
10. *Уткин В.А.* Инвариантность и автономность в системах с разделяемыми движениями // АиТ. 2001, № 11. – С. 73-94.
11. *Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.* Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // АиТ. 2017, № 12. – С. 26-53.