

Отчет за 2-й этап по гранту для поддержки молодежных научных школ Института на 2021-2022 годы

«Метод разделения движений в задачах обеспечения инвариантности по отношению к внешним и параметрическим возмущения».

- Этап 1 (2020-2021 гг.) Метод расширения пространства состояний в задачах обеспечения инвариантности в линейных системах на скользящих режимах.
- **Этап 2 (2021-2022 гг.) Метод расширения пространства состояний в задачах обеспечения инвариантности в нелинейных системах с приложением к электромеханическим системам и объектам управления в тепло- и электроэнергетике.**

Докладчик: Ткачева Ольга Сергеевна, м.н.с. лаб. 37

Заседание Ученого совета ИПУ РАН 19 мая 2022 г.

Состав участникова МНШ.

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание, должность	Структурное подразделение
1	Уткин Виктор Анатольевич <i>Руководитель МНШ</i>	г.н.с., д.т.н., профессор,	лаб. 16

Молодые ученые

2	Кочетков Сергей Александрович 1982 г.р.	в.н.с., д.т.н., осн. 1,0 ст.	лаб.37
3	Краснов Дмитрий Валентинович 1993 г.р.	н.с., соискатель, осн. 1,0 ст.	лаб.37
4	Гулюкина Светлана Игоревна 1995 г.р.	м.н.с., соискатель, осн. 1,0 ст.	лаб.37
5	Ткачева Ольга Сергеевна 1997 г.р.	м.н.с., аспирант, осн. 0,8 ст.	лаб.37

Участие в научных мероприятиях по тематике проекта в период за 2021 год

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

Публикации участников МНШ в 2020-2022 гг.

	Обязательства по числу публикаций участников МНШ	Фактическое число публикаций за отчетный период (2020-2022)
Web of Science	6	8
Scopus	12	22
ВАК	8	9
РИНЦ	8	28
ИТОГ	34	67

Важнейшие полученные результаты

Достигнуты следующие **цели** проекта:

- ① Синтезированы внутренние скользящие режимы с использованием метода расширения пространства состояний и блочного принципа в управлении.
- ② Разработаны методы синтеза редуцированных робастных наблюдателей состояния в следящей системе при отсутствии измерений регулируемых переменных для полноприводного электромеханического объекта.
- ③ Разработаны алгоритмы построения наблюдателей состояния и систем параметрической идентификации на основе вихревых алгоритмов для электромеханических систем.
- ④ Предложенные подходы применены к ряду прикладных задач, в частности, к управлению мехатронными системами, электроприводами и преобразователями напряжения, к восстановлению сигнала для электрокардиографической системы.

Конкурсная заявка проекта на грант для поддержки молодежных научных школ ИПУ РАН на 2022-2024 гг.

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание, должность	Структурное подразделение
1	Уткин Виктор Анатольевич <i>Руководитель МНШ</i>	г.н.с., д.т.н., профессор,	лаб. 16

Молодые ученые

2	Кочетков Сергей Александрович 1982 г.р.	в.н.с., д.т.н., осн. 1,0 ст.	лаб.37
3	Краснов Дмитрий Валентинович 1993 г.р.	н.с., соискатель, осн. 1,0 ст.	лаб.37
4	Гулюкина Светлана Игоревна 1995 г.р.	м.н.с., соискатель, осн. 1,0 ст.	лаб.37
5	Ткачева Ольга Сергеевна 1997 г.р.	м.н.с., аспирант, осн. 0,8 ст.	лаб.37

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание, должность	Структурное подразделение
6	Хомутов Дмитрий Константинович , 1997 г.р.	математик, аспирант осн. 0,8 ст.	лаб.70
7	Шушко Никита Игоревич , 1999 г.р.	математик, магистрант, осн. 0,5 ст.	лаб.70
8	Кузнецов Александр Владимирович , 1982 г.р.	д.ф.-м.н., доцент, в.н.с., осн. 0,4 ст.	лаб.90
9	Свидинский Даниил Артемович , 1998 г.р.	инженер, магистрант, осн. 0,4 ст.	лаб.90

«Синтез систем управления с униполярным входом при ограничениях на фазовые переменные и разработка методов оптимального управления в мультиагентных системах»

Первый этап (2022–2023)

Разработка законов управления по обратной связи для систем общего вида с униполярным входом при наличии фазовых ограничений и алгоритмов управления многоагентными системами в условиях неопределенности и задержек передачи информации.

Второй этап (2023–2024)

Решение ряда прикладных задач управления:

- 1) синхронным и асинхронным генераторами, тепловыми установками, мобильными роботами и биологическими системами с учетом униполярности входа и фазовых ограничений;
- 2) в электроэнергетических, робототехнических и социальных системах с использованием предложенных алгоритмов синтеза мультиагентных систем.

Ожидаемые научные результаты

На первом этапе предполагается разработка теоретических основ синтеза робастных и инвариантных линейных систем с униполярными управлениями и ограничениями на фазовые переменные.

Будут синтезированы внутренние скользящие режимы с использованием метода расширения пространства состояний и блочного принципа в управлении. Управления, так и фиктивные управления в локальных обратных связях являются непрерывными функциями.

Будут разработаны:

- алгоритмы построения оптимального или близкого к такому маршрута агентом, не имеющим полного знания о местности, не полностью осведомленного о цели или же имеющего противоречащие друг другу цели.
- механизмы коммуникации агентов друг с другом на примере взаимного позиционирования и совместного движения роботов с направленными антеннами.

Ожидаемые научные результаты

На втором этапе методы, разработанные для линейных систем на первом этапе данного проекта, будут использованы для решения задач инвариантности применительно к широкому классу нелинейных систем и ряда прикладных задач. В частности, будут

- разработаны методы синтеза редуцированных робастных наблюдателей состояния в следящей системе при отсутствии измерений регулируемых переменных для полноприводного электромеханического объекта без предположений о гладкости внешних и параметрических возмущений.
- разработаны алгоритмы построения наблюдателей состояния и систем параметрической идентификации на основе вихревых алгоритмов для электромеханических систем.
- синтезированы законы управления асинхронным и синхронным генераторами, электромеханическими и биологическими системами, тепловыми установками.

С использованием методов синтеза мультиагентных систем будут:

- разработаны многоагентные математические модели для исследования влияния численности экономически активного населения на общее благосостояние региона.
- предложены алгоритмы решения задачи планирования режимов работы электросети в приближении переменного тока.

Публикаций за отчетный период 2021-2022 6, в том числе:
WoS: 1, WoS+Scopus: 2, РИНЦ: 4.

Участие в научных мероприятиях

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

Отчетный период. Построение наблюдателей для нелинейных систем с векторным выходом

Объект исследования – динамическая система с выходом:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ f(\mathbf{x}) \\ x_4 \\ g(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \quad y = (x_1, x_3)^T. \quad (1)$$

Цели:

- Рассмотреть общую задачу построения нелинейного наблюдателя с линейной динамикой ошибки для систем 4-го порядка с векторным выходом.
- Построить нелинейный наблюдатель с линейной динамикой ошибки для четырехмерной динамической системы, моделирующей распространения трансмембранного потенциала в двух сердечных узлах. Измерению доступны только значения потенциалов.

Если система вида (1) сводится к системе вида (2):

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi}_1^1 \\ \dot{\xi}_1^2 \\ \dot{\xi}_2^1 \\ \dot{\xi}_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1^1 \\ \xi_1^2 \\ \xi_2^1 \\ \xi_2^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_1(\xi_2^1, \xi_2^2) \\ \psi_2(\xi_2^1, \xi_2^2) \\ \psi_3(\xi_2^1, \xi_2^2) \\ \psi_4(\xi_2^1, \xi_2^2) \end{pmatrix} \quad (2)$$
$$y = (\xi_2^1, \xi_2^2)^T,$$

Функции $\psi_i(\xi_2^1, \xi_2^2)$ — нелинейные и зависят только от выхода.

Наблюдатель состояния для системы 4-го порядка

То наблюдатель имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{\eta}_1^1 \\ \dot{\eta}_2^1 \\ \dot{\eta}_1^2 \\ \dot{\eta}_2^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1^1 \\ \eta_2^1 \\ \eta_1^2 \\ \eta_2^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & g_{11} & 0 & g_{12} \\ 0 & g_{21} & 0 & g_{22} \\ 0 & g_{31} & 0 & g_{32} \\ 0 & g_{41} & 0 & g_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_1^1 - \xi_1^1 \\ \eta_2^1 - \xi_2^1 \\ \eta_1^2 - \xi_1^2 \\ \eta_2^2 - \xi_2^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_1(\xi_1^1, \xi_2^2) \\ \psi_2(\xi_2^1, \xi_2^2) \\ \psi_3(\xi_2^1, \xi_2^2) \\ \psi_4(\xi_2^1, \xi_2^2) \end{pmatrix}$$

$y = (\xi_2^1, \xi_2^2)^T$

(3)

Матрица $\begin{pmatrix} 0 & g_{11} & 0 & g_{12} \\ 1 & g_{21} & 0 & g_{22} \\ 0 & g_{31} & 0 & g_{32} \\ 0 & g_{41} & 1 & g_{42} \end{pmatrix}$ должна быть гурвицева.

- Для того чтобы система (1) приводилась к виду (2), необходимо чтобы функции f и g являлись квадратичными по переменным x_2, x_4 .

Случай векторного выхода. Наблюдатель состояния для 4-мерной модели сердца

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 (x_1 - w_{1_0})(x_1 - w_{1_1}) - x_1 (x_1 + d_1)(x_1 + e_2), \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -a_2 x_4 (x_3 - w_{2_0})(x_3 - w_{2_1}) - x_3 (x_3 + d_2)(x_3 + e_2) + \\ \quad + k_{21}(x_3 - x_1), \\ y = (x_1, x_3)^T. \end{cases} \quad (4)$$

Замена переменных:

$$\begin{aligned} \xi_1^1 &= a_1 \left(\frac{1}{3} x_1^3 - \frac{(w_{1_0} + w_{1_1})}{2} x_1^2 + w_{1_0} w_{1_1} x_1 \right) + x_2; \\ \xi_2^1 &= x_1; \\ \xi_1^2 &= a_2 \left(\frac{1}{3} x_3^3 - \frac{(w_{2_0} + w_{2_1})}{2} x_3^2 + w_{2_0} w_{2_1} x_3 \right) + x_4; \\ \xi_2^2 &= x_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Случай векторного выхода. Наблюдатель состояния для 4-мерной модели сердца

Система (4) приводима к системе:

$$\dot{\xi} = D\xi + \Psi(\xi_1^1, \xi_2^2), \quad y = (\xi_2^1, \xi_2^2) \quad (6)$$

где

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$
$$\Psi(\xi) = \begin{pmatrix} -\xi_2^1(\xi_2^1 + d_1)(\xi_2^1 + e_2) \\ -a_1 \left(\frac{1}{3}(\xi_2^1)^3 - \frac{(w_{1_0} + w_{1_1})}{2}(\xi_2^1)^2 + w_{1_0} w_{1_1} \xi_2^1 \right) \\ -\xi_2^2(\xi_2^2 + d_2)(\xi_2^2 + e_2) + k_{21}(\xi_2^2 - \xi_2^1) \\ -a_2 \left(\frac{1}{3}(\xi_2^2)^3 - \frac{(w_{2_0} + w_{2_1})}{2}(\xi_2^2)^2 + w_{2_0} w_{2_1} (\xi_2^2) \right) \end{pmatrix}.$$

Наблюдатель состояния для системы 4-го порядка

Наблюдатель:

$$\dot{\eta} = D\eta + GC(\eta - \xi) + \Psi(\xi_2^1, \xi_2^2). \quad (7)$$

Где:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{pmatrix} \text{ матрица } M_e = D + GC \text{ — гурвицева.}$$

Ошибка наблюдения: $e = \xi - \eta$

Наблюдатель состояния для системы 4-го порядка

В рамках исследования для ДС 4-го порядка с векторным выходом достигнуты следующие результаты:

- 1 Сформулированы условия на правую часть системы четвертого порядка, при выполнении которых, система приводится к системе специального вида, который является необходимым для построения нелинейного наблюдателя с линейной динамикой ошибки.
- 2 Найден общий вид замены переменных, приводящий систему к специальному виду.
- 3 Для системы, описывающей распространение потенциала в двух сердечных узлах, сконструирован нелинейный наблюдатель с линейной динамикой ошибки.

Планируемые результаты

Проверить применимость полученных методов к другим биологическим системам, в том числе и для моделей, описывающей антиангиогенную терапию и химиотерапию глиомы.

Исследовать устойчивость четырехмерной системы для модели ВИЧ-инфекции.

Краснов Дмитрий Валентинович
н.с. лаб 37, соискатель

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

WoS: 2 WoS+Scopus: 3 RSCI: 3

Участие в научных мероприятиях

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

Синтез динамической обратной связи в следящих электромеханических системах без измерения регулируемых переменных

Отчетный период

Разработка методов синтеза **редуцированных робастных наблюдателей** состояния в следящей системе при отсутствии измерений регулируемых переменных для полноприводного электромеханического объекта **без предположений о гладкости** внешних и параметрических возмущений.

Объект управления: робот-манипулятор с жесткими звеньями (1), эластично соединенными с валами редукторов, на которых установлены электрические исполнительные устройства (2)

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2, \quad q_1 \in R^n \\ \dot{q}_2 &= \mathbf{H}^{-1}(q_1)[K(\varphi - q_1) - \mathbf{C}(q_1, q_2)q_2 + \mathbf{f}(t)]; \end{aligned}$$

$$(2) \quad \dot{\varphi} = \omega, \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi i - K(\varphi - q_1) - D\omega), \quad i = L^{-1}(u - Ri - \Psi\omega),$$

где $f(t) \in R^n$ – внешние **несогласованные возмущения**,

параметры матриц J, Ψ, K, D известны; H, C, L, R – **неизвестны**.

Измеряются углы поворотов валов редукторов $\varphi(t)$ и токи якорей $i(t)$.

Задача: слежение обобщенных координат $q_1(t)$ за заданиями $g(t)$.

Цель управления: стабилизация ошибок слежения $e_1 = q_1 - g \in R^n$.

Проблема: с помощью наблюдателя состояния получить оценки неизмеряемых переменных:

$\omega(t)$ – угловых скоростей валов редукторов;

$q_1(t), q_2(t)$ – векторов обобщенных координат и скоростей.

Стандартный подход к синтезу редуцированного наблюдателя

$$\dot{q}_1 = q_2,$$

Используемая ММ ОУ: $\dot{q}_2 = \mathbf{H}^{-1}(q_1)[\mathbf{K}(\varphi - q_1) - \mathbf{C}(q_1, q_2)q_2 + \mathbf{f}(t)],$

$$\dot{\omega} = J^{-1}(\Psi i - D\omega - K(\varphi - q_1)).$$

Тип управляющих воздействий в наблюдателе: линейные.

Разработанный подход

Используемая ММ ОУ: $\dot{\varphi} = \omega, \dot{\omega} = J^{-1}(\Psi i - D\omega - K(\varphi - q_1)), \dot{q}_1 = q_2$

Наблюдатель: $\dot{z}_1 = z_2 + v_1, \dot{z}_2 = J^{-1}(\Psi i - Dz_2 - K(\varphi - z_3)) + v_2, \dot{z}_3 = v_3$

Тип управляющих воздействий в наблюдателе: кусочно-линейные

$$v_{1j} = \begin{cases} m_{1j} \text{sign}(\varepsilon_{1j}), & |\varepsilon_{1j}| > 1/k_{1j}, \\ m_{1j} k_{1j} \varepsilon_{1j}, & |\varepsilon_{1j}| \leq 1/k_{1j}; \end{cases} \quad v_{ij} = \begin{cases} m_{ij} \text{sign}(v_{i-1,j}), & |v_{i-1,j}| > 1/k_{ij}, \\ m_{ij} k_{ij} v_{i-1,j}, & |v_{i-1,j}| \leq 1/k_{ij}, \quad i = 2, 3, \end{cases}$$

$$k_{ij}, m_{ij} = \text{const} > 0, \quad \varepsilon_1 = \varphi - z_1, \quad \varepsilon_2 = \omega - z_2, \quad \varepsilon_3 = q_1 - z_3, \quad \varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \dots, \varepsilon_{in})$$

Результат:

$$z_2(t) \approx \omega(t), \quad z_3(t) \approx q_1(t), \quad v_3(t) \approx q_2(t), \quad t \geq T > 0$$

Научная новизна полученных результатов

Задача наблюдения неизмеряемых (в том числе, регулируемых) переменных рассматривалась в узкой постановке, когда идентификация неизвестных параметров и построение генераторов внешних возмущений не предусмотрены.

Показано, что для полноприводного электромеханического объекта эта задача имеет решение, если наблюдатель строить на основе подсистемы с известными параметрами.

Разработана процедура синтеза редуцированного наблюдателя с кусочно-линейными обратными связями, обеспечивающими заданную точность оценивания за заданное время.

В системе с бездатчиковым манипулятором и динамической обратной связью ошибка слежения стабилизируется с заданной точностью за заданное время при изменении задающих и возмущающих воздействий в допустимых диапазонах без перенастройки параметров регулятора.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Распространение разработанного подхода к синтезу редуцированных робастных наблюдателей состояния на линейные и нелинейные систем слежения общего вида с несогласованными и негладкими возмущениями.

Формализация условий, при которых задача оценивания неизмеряемых переменных состояния осуществима без дополнительной идентификации параметрических и внешних возмущений.

Публикаций за отчетный период 7, в том числе:
WoS:0, WoS+Scopus: 3, RSCI:3.

Участие в научных мероприятиях

- International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2021), September 5-11, 2021, Sochi, Russia.
- XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами», 6–9 сентября 2021, Москва–Звенигород.
- 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2021), 27–29 September 2021, Moscow, ICS RAS.

Синтез инвариантных систем при несогласованных возмущениях на основе теории скользящих режимов

Модель объекта управления – нелинейная SISO система:

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

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.

Физические ограничения:

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

Необходимые условия инвариантности: $X_2 > N_1, X_3 > N_2, U > N_3$

Задача:

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

$$|x_1(t)| \leq \Delta_0, \forall t > T_1 > 0 \quad (3)$$

Обеспечение инвариантности по выходу

Система фильтров с устойчивыми собственными движениями:

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + \nu_i, z_i(0) = 0, i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

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

Оценки компонент фильтров: $|a_i z_i| < M_i, |\dot{z}_i| < 2M_i, i = 1, 2, 3$

Замена переменных: $\bar{x}_1 = x_1 - z_1, \bar{x}_2 = x_2 - z_2 + a_1 z_1, \bar{x}_3 = x_3 - z_3 + a_2 z_2$

Обратная связь: $u = -a_3 z_3$

Система относительно новых переменных:

$$\dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2 + z_2 - \nu_1 + \eta_1, \dot{\bar{x}}_2 = \bar{x}_3 + z_3 - \nu_2 + a_1 \dot{z}_1 + \eta_2, \dot{\bar{x}}_3 = -\nu_3 + a_2 \dot{z}_2 + \eta_3, \quad (5)$$

Неравенства, определяющие ограничения (2):

$$|x_1| \leq \frac{M_1}{a_1} \leq \Delta_0, |x_2| \leq \frac{M_2}{a_2} + M_1 \leq X_2, |x_3| \leq \frac{M_3}{a_3} + M_2 \leq X_3, |u| \leq M_3 \leq U \quad (6)$$

Выбор условия $\frac{M_1}{a_1} \leq \Delta_0$ решает задачу стабилизации выходной переменной с заданной точностью (3).

Выбор корректирующих воздействий фильтров

$$\dot{z}_i = -a_i z_i + \nu_i, \nu_i = M_i \text{sign}(\bar{x}_i), i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Кандидаты функции Ляпунова: $V_i = \bar{x}_i \dot{\bar{x}}_i, i = 1, 2, 3$

Нижние оценки на выбор амплитуд:

$$M_1 > N_1 + \frac{M_2}{a_2}, M_2 > N_2 + \frac{M_3}{a_3} + 2a_1 M_1, M_3 > N_3 + 2a_2 M_2 \quad (8)$$

Время возникновения скользящих режимов:

- по плоскости $\bar{x}_3 = 0$: $t_1 \geq \frac{\bar{x}_3(0)}{\Delta M_3}$
- по плоскости $\bar{x}_2 = 0$: $t_2 \geq \frac{\bar{x}_2(t_1)}{M_2 - N_2 - \frac{M_3}{a_3} - 2a_1 M_1}$
- по плоскости $\bar{x}_1 = 0$: $t_3 \geq \frac{\bar{x}_1(t_2)}{M_1 - N_1 - \frac{M_3}{a_3}}$

Схема выбора постоянных времени фильтров

Эквивалентные значения корректирующих воздействий:

$$\nu_{1eq} = z_2 + \eta_1, \nu_{2eq} = z_3 + a_1 \dot{z}_1 + \eta_2, \nu_{3eq} = a_2 \dot{z}_2 + \eta_3, \quad (9)$$

Система (7) с учетом (9):

$$\dot{z}_1 = -a_1 z_1 + z_2 + \eta_1, \dot{z}_2 = -a_2 z_2 + z_3 + a_1 \dot{z}_1 + \eta_2, \dot{z}_3 = -a_3 z_3 + a_2 \dot{z}_2 + \eta_3, \quad (10)$$

Обозначения:

$$\bar{M}_1 = |z_2| + N_1, \bar{M}_2 = |z_3| + |a_1 \dot{z}_1| + N_2, \bar{M}_3 = |a_2 \dot{z}_2| + N_3 \quad (11)$$

Оценки на переменные фильтров и их производные:

$$|a_i z_i| \leq \bar{M}_i < M_i, |\dot{z}_i| \leq 2\bar{M}_i < 2M_i, i = 1, 2, 3. \quad (12)$$

Расчетная схема выбора постоянных времени фильтров:

1) $\bar{x}_1 = 0, x_1 = z_1 \Rightarrow |a_1 z_1| \leq \bar{M}_1^* = |z_2| + N_1 \leq a_1 \Delta_0$

Оценки: $|z_1| \leq \Delta_0, |z_2| \leq a_1 \Delta_0 - N_1, |\dot{z}_1| \leq 2a_1 \Delta_0$ и $\bar{M}_2^* = |z_3| + 2a_1^2 \Delta_0 + N_2$.

2) $|a_2 z_2| \leq \bar{M}_2^* = |z_3| + 2a_1^2 \Delta_0 + N_2 \leq a_2(a_1 \Delta_0 - N_1)$

Оценки: $|z_3| \leq a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - (2a_1^2 \Delta_0 + N_2), |\dot{z}_2| \leq 2a_2(a_1 \Delta_0 - N_1)$ и

$\bar{M}_3^* = 2a_2^2(a_1 \Delta_0 - N_1) + N_3$.

3) $|a_3 z_3| \leq \bar{M}_3^* = 2a_2^2(a_1 \Delta_0 - N_1) + N_3 \leq a_3(a_2(a_1 \Delta_0 - N_1) - (2a_1^2 \Delta_0 + N_2)).$

Система неравенств на выбор постоянных времени фильтров:

$$\begin{aligned} \frac{N_1}{\Delta_0} < a_1 \leq \frac{X_2 + N_1}{2\Delta_0}, \\ \frac{N_2 + 2a_1^2\Delta_0}{a_1\Delta_0 - N_1} < a_2 \leq \frac{X_3 + 2a_1^2\Delta_0 + N_2}{2a_1\Delta_0 - N_1}, \\ \frac{2a_2^2(a_1\Delta_0 - N_1) + N_3}{a_2(a_1\Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2\Delta_0} < a_3 \leq \frac{U}{a_2(a_1\Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2\Delta_0} \end{aligned} \quad (13)$$

Замечания:

- Существенно, что выбор постоянных фильтров согласно (13) не зависит от выбора амплитуд фиктивных управлений фильтров.
- Выбор постоянных времени фильтров согласно (13) задает их иерархию вида $a_3 > a_2 > a_1$, а запас в обеспечении неравенств задает скорость сходимости замкнутой системы (5) в заданную окрестность (3).
- Величина постоянных времени фильтров (13) полностью определяется заданной точностью стабилизации выходной переменной (4): с ростом заданной точности $\Delta_0 \rightarrow \infty$, постоянные времени стремятся к нулю.

Алгоритм выбора параметров фильтров:

Шаг 1.

$$\begin{aligned} \frac{N_1}{\Delta_0} < a_1 \leq \frac{X_2 + N_1}{2\Delta_0}, \\ \frac{N_2 + 2a_1^2\Delta_0}{a_1\Delta_0 - N_1} < a_2 \leq \frac{X_3 + 2a_1^2\Delta_0 + N_2}{2a_1\Delta_0 - N_1}, \\ \frac{2a_2^2(a_1\Delta_0 - N_1) + N_3}{a_2(a_1\Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2\Delta_0} < a_3 \leq \frac{U}{a_2(a_1\Delta_0 - N_1) - N_2 - 2a_1^2\Delta_0} \end{aligned} \quad (14)$$

Шаг 2.

$$M_1 > N_1 + \frac{M_2}{a_2}, M_2 > N_2 + \frac{M_3}{a_3} + 2a_1M_1, M_3 > N_3 + 2a_2M_2 \quad (15)$$

Проверка:

$$|x_1| \leq \frac{M_1}{a_1} \leq \Delta_0, |x_2| \leq \frac{M_2}{a_2} + M_1 \leq X_2, |x_3| \leq \frac{M_3}{a_3} + M_2 \leq X_3, |u| \leq M_3 \leq U \quad (16)$$

Предлагаемый подход позволяет:

- свести задачу инвариантности общего вида к задаче инвариантности с согласованными возмущениями, за счет использования в качестве фиктивных управлений компонент вектора состояния в рамках идеологии блочного подхода;
- обеспечить заданную точность стабилизации выходной переменной при возникновении скольльзящих режимов за счет выбора структуры фильтров;
- декомпозировать задачи синтеза инвариантных систем на последовательно решаемые подзадачи меньшей размерности.

Продолжить развитие методов синтеза робастных систем управления с учетом физических ограничений при действии несогласованных внешних возмущений и применить их к объектам энергетики, в частности:

- рассмотреть задачу стабилизации угловой частоты вращения синхронного генератора посредством регулирования напряжения на обмотке возбуждения с учетом ограничений на компоненты вектора состояния и управление за счет введения нелинейной замены переменных в виде линейных функций с насыщением (sat-функций);
- рассмотреть задачу синтеза робастного управления парогенератором с учетом ограничений на фазовые переменные и управление под действием внешних неконтролируемых возмущений (задача поддержания давления перед задвижкой на уровне заданного значения).

Публикаций за отчетный период 15, в том числе:

WoS: 1 (Q1: 1) WoS+Scopus: 8 RSCI: 6

Участие в научных мероприятиях:

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

Отчетный период. Скользящие режимы второго рода.

Объект управления

$$\begin{aligned}\dot{s}_1 &= s_2, \\ \dot{s}_2 &= u + \xi(t),\end{aligned}\tag{17}$$

где $s_1, s_2 \in \mathbb{R}$ – измеряемые переменные, $u \in \mathbb{R}$ – управление, $|\xi(t)| < \Xi = \text{const} > 0$ – неизвестное внешнее возмущение

$$|\dot{\xi}(t)| \leq \bar{\Xi} = \text{const} > 0,\tag{18}$$

константы $\Xi, \bar{\Xi}$ известны.

Задача стабилизации за конечное время

$$s_1(t) = s_2(t) = 0, \quad \forall t > t_r\tag{19}$$

за счет статической обратной связи $u = U(s_1, s_2)$.

Закон управления

$$u = -\alpha s_2 - \alpha |s_2|^\beta \text{sign}(s_2) - M \text{sign}(s_1), \quad \beta = \text{const} > 0, \quad 0 < \beta < 1; \quad (20)$$

$$\alpha(M - \Xi) > \Xi, \quad M > \Xi, \quad \alpha = \text{const} > 0, \quad M = \text{const} > 0.$$

Функция Ляпунова $V = \left(|s_1| - \frac{\xi}{M} s_1 + \frac{(\alpha s_1 + s_2)^2}{2M} \right)^{\frac{1-\beta}{2}}$.

Среднее значение производной функции Ляпунова на периоде колебаний

$$\dot{V}_{av} \leq - \frac{2^{\frac{\beta}{2}} \alpha M^{\frac{\beta-1}{2}} (M - \Xi)}{\sqrt{2}(2 + \beta)(M + \Xi) \left(2 + \frac{\varepsilon_2}{2 \left[\frac{M-\Xi}{\alpha} - |s_{2\min}|^\beta \right] \left(1 - e^{-\alpha \frac{\varepsilon_2}{M-\Xi}} \right)} \right)} < 0.$$

- Разработка теоретических основ синтеза робастных и инвариантных линейных систем с униполярными управлениями и ограничениями на фазовые переменные.
- Законы управления асинхронным и синхронным генераторами, а также группами таких генераторов.