УПРАВЛЕНИЕ СЕТЬЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АГЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Имангазиева А.В.[1]
(*ФГБОУ ВО Астраханский государственный технический университет, Астрахань*)

Предлагается структура системы управления синхронизацией сети идентичных агентов в условиях нестационарности и параметрической неопределенности моделей агентов. При синхронизации требуется обеспечить согласованное во времени поведение однотипных агентов сети с учетом действующих на каждый агент внешних возмущений. В подсистемах осуществляется слежение за скалярным выходом ведущего агента-лидера, агенты зависимы. Измерению доступны скалярные входы и выходы агентов. Для решения поставленной сетевой задачи в каждом агенте строятся законы управления на основе метода вспомогательного контура, в основе которого лежит принцип динамической компенсации. Предварительно формируются сигналы, несущие информацию, негативно влияющую на регулирование подсистемы, а затем осуществляется их компенсация. В каждом агенте требуется информация о производных промежуточных сигналов, для чего используются наблюдатели Халила. Для иллюстрации работоспособности предложенной системы синхронизации рассмотрен числовой пример управления сетевым объектом, состоящим из четырех агентов, каждый из которых подвержен действию внешних, различных по амплитуде, возмущений. Проведено моделирование в MATLAB Simulink. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и показали хорошую работоспособность системы синхронизации в условиях неопределенности и нестационарности моделей агентов сети.

Ключевые слова: управление, синхронизация, нестационарность, сеть агентов, параметрическая неопределенность, наблюдатель, вспомогательный контур, возмущения.

1. Введение

Актуальность задач управления сетевыми объектами управления вызвана широким применением таких агентов сетей как подвижные роботы, беспилотные летательные аппараты, высокотехнологичные установки, суда и т.д. Рост производственных мощностей и связанных с этим задач предполагает многократное увеличение производительности в различных от-

---

[1] *Алия Владимировна Имангазиева, к.т.н., доцент* (aliya111@yandex.ru).

раслях промышленности, что обуславливает необходимость внедрения новых современных сетевых систем управления, предназначенных для большого числа агентов управления в условиях неточных знаний о параметрах их моделей. При управлении такими сетями агентов ставятся различные цели: синхронизация, десинхронизация, роение, консенсус и т.д. Так, например, в работе [16] решается задача робастной синхронизации сети взаимосвязанных агентов с лидером, в которой каждая локальная подсистема сети описывается линейным дифференциальным уравнением с параметрической и функциональной неопределенностью, изменяющейся во времени. В работе [7] устанавливается связь между колебательностью и десинхронизацией для диффузионно-связанных сетей из простейших моделей нейронов ФитцХью – Нагумо, а также предложена их полная десинхронизация. В [24] предложен алгоритм стайного поведения агентов управления. В публикации [28] исследуется консенсус линейных мультиагентных систем на неориентированных графах. Проблемы робастного H_∞-управления цепочками поставок в условиях переключаемой топологии и неопределенных требований предложены в работах [21, 27]. С обзором проблем и моделей сетевого управления можно ознакомиться в работе [9].

Важной проблемой управления является влияние переменных параметров модели объекта на функционирование системы управления [3, 4, 6, 10, 22, 26]. Это связано с тем, что параметры, например, технологических объектов и протекающие в них процессы, при которых они функционируют, не всегда постоянны: меняется качество поставляемого сырья, изнашиваются агрегаты, устаревает технологическое оборудование и т.д. Кроме того технологические объекты управления функционируют в условиях неопределенности [8, 14, 15, 25], а также постоянно действующих возмущений [1, 2, 11–14, 20, 23]. Получение эффективных законов управления, компенсирующих влияние меняющихся во времени параметров, а также действие контролируемых и неконтролируемых возмущений, является одной из важных задач при проектировании систем управления нестационарными объектами. Получены разные решения задач управления нестационарными объектами. Так, например, в работах

[6, 22] приведены исследования по магнитному управлению положением, формой и током плазмы в токамак-реакторе, модель которого описывается системой двух дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

Метод вспомогательного контура [15], основанный на принципе динамической компенсации, позволяет синхронизировать сеть агентов с учетом перекрестных связей, нелинейности модели, наличии запаздывания в условиях интервальной неопределенности параметров и подверженных действиям внешних неконтролируемых возмущений [5, 16, 19]. При синхронизации требуется обеспечить согласованное поведение агентов сети.

В данной работе для решения сетевой задачи предлагается одна из возможных структур управления синхронизацией с использованием метода вспомогательного контура. Предлагается в каждом агенте сети формировать управляющие воздействия, используя метод вспомогательного контура: осуществляется параметризация [18], выделяется сигнал, несущий информацию о нестационарных составляющих, внешних и параметрических возмущениях, а затем компенсируется его негативное влияние на подсистему с помощью введенного вспомогательного контура. При построении такой системы синхронизации требуется информация о производных промежуточных сигналов системы, для чего используются, специальным образом, два наблюдатели Халила. Второй наблюдатель Халила позволяет компенсировать погрешность наблюдения первого наблюдателя, в отличие от работы [15], где в каждом агенте сети управляющий сигнал формируется с использованием в контуре управления агентом одного наблюдателя. Кроме того, в отличие от других работ, например, [3], данная схема не требует реализации фильтров состояния для формирования вектора регрессии, что существенно уменьшает порядок замкнутой системы.

В дальнейшем изложении будем рассматривать сеть, состоящую из однотипных агентов.

2. Постановка задачи

Пусть задана сеть взаимосвязных r агентов, динамические процессы в которой описываются нестационарными уравнениями в операторной форме

$$Q_l(p,t)y_l(t) = k_l R_l(p,t)u_l(t) + \sum_{j=1,\, j\neq l}^{r} \overline{N}_{lj}(p)y_j(t) + f_l(t), \tag{1}$$

$$p^i y_l(0) = y_{li},\ i = 0,\dots,n-1,\ l = 1,\dots,r,$$

где $y_l(t)$, $u_l(t)$ – выходы и входы агентов, $y_l(t) \in R$, $u_l(t) \in R$, $p = d/dt$ – оператор дифференцирования, $Q_l(p, t) = p^n + q_{l1}(t)p^{n-1} + \dots + q_{ln}(t)$, $R_l(p, t) = p^m + r_{l1}p^{m-1} + \dots + r_{lm}(t)$ – дифференциальные операторы порядков n_l и m_l соответственно, $\deg \overline{N}_{lj}(p) \le n_l - 1$, $j = 1, \dots, r$, $j \neq l$, $f_l(t)$ – внешние возмущающие воздействия, коэффициенты $k_l > 0$, y_{li} – известные начальные условия.

Будем решать задачу построения системы синхронизации для заданной сети нестационарных агентов с учетом параметрической неопределенности и влияния внешних возмущений.

Задано уравнение ведущего агента – лидера:

$$Q_m(p)y_m(t) = k_m g(t), \tag{2}$$

где $g(t)$ – задающее воздействие, $k_m > 0$, $y_m(t)$ – выход эталонной модели, $y_m(t) \in R$, $\deg Q_m(p) = n_l - m_l$.

Проектируемая система синхронизации r агентов должна обеспечить выполнение целевого условия

$$|y_l(t) - y_m(t)| < \delta \text{ при } t \ge T,\ l = 1, \dots, r. \tag{3}$$

где δ – некоторое достаточно малое положительное число, $T > 0$.

Предположения.

П.1. Коэффициенты $q_{li}(t)$, $r_{li}(t)$ операторов $Q_l(p, t)$, $R_l(p, t)$ такие, что $q_{li} = q_{li0} + \Delta q_{li}(t)$, $i = 1, \dots, n$, $r_{lj} = r_{lj0} + \Delta r_{lj}(t)$, $|\Delta q_{li}(t)| < \gamma'_{li}$, $|\Delta r_{lj}(t)| < \gamma''_{lj}$, $\gamma'_{li}, \gamma''_{lj}$ – некоторые положительные числа, $j = 1, \dots, m$, $l = 1, \dots, r$.

П.2. Величины q_{lj0}, r_{lj0} и величина k_l зависят от вектора неизвестных параметров $\xi_l \in \Xi$, где Ξ – известное ограниченное множество возможных значений вектора ξ_l, $l = 1, \dots, r$.

П.3. Внешние возмущения $f_l(t)$ и задающее воздействие $g(t)$ являются ограниченными функциями, $l = 1, \ldots, r$.

П.4. Полиномы $R_l(\lambda, t)$ – гурвицевы при любом фиксированном t, λ– комплексная переменная в преобразовании Лапласа, $l = 1, \ldots, r$.

П.5. $\deg Q_l(p, t) = n_l$, $\deg R_l(p, t) = m_l$. Полином $Q_m(\lambda)$ – гурвицев, $l = 1, \ldots, r$.

П.6. В системе управления доступны измерению скалярные входы $u_l(t)$ и выходы $y_l(t)$ агентов, $l = 1, \ldots, r$.

3. Метод решения

Для решения поставленной задачи в каждом из l агентов сети, $l = 1, \ldots, r$, применим робастный алгоритм управления, предложенный в работе [4]. Для этого представим операторы $Q_l(p, t)$ и $R_l(p, t)$ в виде сумм стационарных и нестационарных слагаемых $Q_l(p, t) = Q_{l0}(p) + \Delta Q_l(p, t)$, $R_l(p,t) = R_{l0}(p) + \Delta R_l(p, t)$, где $Q_{l0}(p)$, $R_{l0}(p)$ – дифференциальные операторы с постоянными неизвестными коэффициентами, зависящими от векторов неизвестных параметров $\xi_l \in \Xi$. $\Delta Q_{l0}(p, t)$ и $\Delta R_{l0}(p, t)$ нестационарные операторы, коэффициенты которых являются ограниченными непрерывными функциями времени такие, что

$$\Delta Q_l(p,t) = \Delta q_{l1}(t) p^{n-1} + \ldots + \Delta q_{\ln}(t),$$

$$\Delta R_l(p,t) = \Delta r_{l1}(t) p^{m-1} + \ldots + \Delta r_{lm}(t).$$

$\deg Q_{l0}(p) = n_l$, $\deg \Delta Q_l(p, t) = n_l - 1$, $\deg R_{l0}(p) = m_l$, $\deg \Delta R_l(p, t) = m_l - 1$. Тогда уравнение (1) примет вид

$$Q_{l0}(p) y_l(t) = k_l R_{l0}(p) u_l - \Delta Q_l(p,t) y_l + k_l \Delta R_l(p,t) u_l + \sum_{j=1, j\neq l}^{r} \overline{N}_{lj}(p) y_j(t) + f_l(t). \tag{4}$$

Применим известную параметризацию [18], получим

$$\begin{aligned} Q_{lm}(p) y_l(t) &= k_l u_l + \frac{N_{l1}(p)}{M_l(p)} u_l(t) + \frac{N_{l2}(p)}{M_l(p)} y_l(t) + \\ &+ \sum_{j=1, j\neq l}^{r} \frac{S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)}{M_l(p)} y_j(t) - \frac{S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t) y_l(t)\right] + \\ &+ \frac{kS_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t) u_l(t)\right] + \frac{S_l(p)}{M_l(p)} f_l(t) + \varepsilon_l(t), \end{aligned} \tag{5}$$

где $M_l(\lambda)$, $S_l(\lambda)$ – гурвицевы полиномы, $\deg M_l(p) = n_l - 1$, $\deg S_l(p) = n_l - m_l - 1$, $\deg N_{l1}(p) = n_l - 2$, $\deg N_{l2}(p) = n_l - 1$; $\varepsilon_l(t)$ – экспоненциально затухающие функции, определяемые начальными условиями, $l = 1, \ldots, r$. Рассмотрим сеть, состоящую из однотипных агентов, поэтому $Q_{lm} = Q_m$.

Составим уравнения относительно ошибок $e_l(t) = y_l(t) - y_{lm}(t)$, вычитая (2) из (5):

$$Q_m(p)e_l(t) = k_l u_l(t) + \frac{N_{l1}(p)}{M_l(p)}u_l(t) + \frac{N_{l2}(p)}{M_l(p)}y_l(t) +$$

$$+\sum_{j=1,\, j\neq l}^{r} \frac{S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)}{M_l(p)} y_j(t) - \frac{S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t)y_l(t)\right] + \tag{6}$$

$$+\frac{k_l S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t)u_l(t)\right] + \frac{S_l(p)}{M_l(p)} f_l(t) + \varepsilon_l(t) - k_m g(t).$$

Запишем уравнение (6) в виде

$$Q_m(p)e_l(t) = k_l u_l(t) + \psi_l(t), \tag{7}$$

где

$$\psi_l(t) = \frac{N_{l1}(p)}{M_l(p)}u_l(t) + \frac{N_{l2}(p)}{M_l(p)}y_l(t) + \sum_{j=1,\, j\neq l}^{r} \frac{S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)}{M_l(p)} y_j(t) -$$

$$-\frac{S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t)y_l(t)\right] + \frac{k_l S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t)u_l(t)\right] +$$

$$+\frac{S_l(p)}{M_l(p)} f_l(t) + \varepsilon_l(t) - k_m g(t), \quad l = 1,\ldots,r.$$

Применим обратное преобразование Лапласа к уравнению (7) и представим полученные уравнения в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} &\dot{\Delta}_l(t) = A_{ml}\Delta_l(t) + D_0 k_l u_l(t) + D_0 \psi_l(t), \\ &e_l(t) = L\Delta_l(t), \quad l = 1,..,r, \end{aligned} \tag{8}$$

где $A_{ml} = \begin{pmatrix} -q_{lm1} & I_{n_l - m_l - 1} \\ . & \\ . & \\ . & \\ -q_{lm(n_l - m_l)} & 0 \end{pmatrix}$, $q_{lm1}, q_{lm2}, \ldots, q_{lm(n_l - m_l)}$ – коэффициенты многочленов Q_{lm} из предположения П.5; $I_{n_l - m_l - 1}$ – единичные матрицы соответствующих размерностей; $D_0 = [0, \ldots, 0, 1]^{\mathrm{T}}$, $L = [1, \ldots, 0]$.

Зададим закон изменения $u_l(t)$ в виде

(9) $u_l(t) = T_l(p)\bar{v}_l(t), \ \bar{v}_l(t) = \alpha_l v_l(t), \ l = 1,\ldots,r.$

где $\alpha_l > 0$, $v_l(t)$ – новые управляющие сигналы; $T_l(p)$ – линейный дифференциальный оператор такой, что выполнено условие $T_l(\lambda)/Q_{lm}(\lambda) = 1/(\lambda + \alpha_{lm})$, $\alpha_{lm} > 0$. Тогда уравнение (7) можно преобразовать, в результате чего получим

(10) $(p + a_{lm})e_l(t) = \beta_l v_l(t) + \varphi_l(t), \ \ l = 1,\ldots, r.$

Здесь

$$\phi_l(t) = \frac{N_{1l}(p)}{T_l(p)M_l(p)}u_l(t) + \frac{N_{l2}(p)}{T_l(p)M_l(p)}y_l(t) + \sum_{j=1,\, j\neq l}^{r} \frac{S_l(p)\bar{N}_{lj}(p)}{T_l(p)M_l(p)}y_j(t) -$$

$$-\frac{S_l(p)}{T_l(p)M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t)y_l(t)\right] + \frac{kS_l(p)}{T_l(p)M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t)u_l(t)\right] +$$

$$+\frac{S_l(p)}{T_l(p)M_l(p)} f_l(t) + \frac{1}{T_l(p)}(\varepsilon_l(t) - k_m g(t)) + (k_l\alpha_l - \beta_l)v_l(t), \ l = 1,\ldots,r.$$

Функции $\varphi_l(t)$, $l = 1, \ldots, r$ описывают сигналы, которые несут информацию о неопределенности и нестационарности параметров модели, перекрестных связях, внешних неконтролируемых возмущениях агентов сети. Будем строить систему управления так, чтобы компенсировать негативное влияние этих сигналов на всю сеть. Для этого введем в каждом агенте вспомогательные контуры

(11) $(p + a_{lm})\bar{e}_l(t) = \beta_l v_l(t)$,

и получим уравнения для рассогласований $\zeta_l(t) = e_l(t) - \bar{e}_l(t)$:

(12) $(p + a_{lm})\zeta_l(t) = \varphi_l(t)$, $l = 1,\ldots, r.$

Если сформировать управляющее воздействие $v_l(t)$ в виде

(13) $v_l(t) = -\dfrac{1}{\beta_l}(p + a_{lm})\zeta_l(t) = -\dfrac{1}{\beta_l}\varphi_l(t), \ l = 1,\ldots, r.$

то из (10) получим

(14) $(p + a_{lm})e_l(t) = 0$, $l = 1,\ldots, r.$

Из (14) следует, что $\lim\limits_{t\to\infty} e_l(t)=0$, $l=1,\dots,r$.

Докажем ограниченность всех сигналов проектируемой системы. Подставив $\varphi_l(t)$ в (13), получим

$$v_l(t)=-\frac{1}{\beta_l}(k_l\alpha_l-\beta_l)v_l(t)-\frac{N_{l1}(p)}{\beta_l T_l(p)M_l(p)}u_l(t)-\frac{\varphi_{l1}(t)}{\beta_l}, \tag{15}$$

где

$$\phi_{l1}(t)=\frac{N_{l2}(p)}{T_l(p)M_l(p)}y_l+\sum_{j=1,\,j\neq l}^{r}\frac{S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)}{T_l(p)M_l(p)}y_j(t)-$$
$$-\frac{S_l(p)}{T_l(p)M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t)y_l(t)\right]+\frac{kS_l(p)}{T_l(p)M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t)u_l(t)\right]+$$
$$+\frac{S_l(p)}{T_l(p)M_l(p)}f_l(t)+\frac{1}{T_l(p)}(\varepsilon_l(t)-k_m g(t)).$$

Выразим из уравнения (15) переменную $v_l(t)$ и подставим полученное выражение в (9):

$$u_l(t)=-\frac{1}{k_l}\left(\frac{N_{l1}(p)}{M_l(p)}u_l(t)+\frac{N_{l2}(p)}{M_l(p)}y_l(t)-\right.$$
$$+\sum_{j=1,\,j\neq l}^{r}\frac{S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)}{M_l(p)}y_j(t)-\frac{S_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta Q_l(p,t)y_l(t)\right]+ \tag{16}$$
$$\left.+\frac{kS_l(p)}{M_l(p)}\left[\Delta R_l(p,t)u_l(t)\right]+\frac{S_l(p)}{M_l(p)}f_l(t)+\varepsilon_l(t)-k_m g(t)\right).$$

Подставим (16) в (6), в результате чего получим

$$Q_m(p)e_l(t)=0, \tag{17}$$

откуда следует ограниченность не только величин $y_l(t)$, но и n_l-m_l их производных, а следовательно, и переменных $y_l(t)$ и их производных в силу предположений П.3 и П.5. Представим уравнение (16) в следующем виде:

$$(k_l M_l(p)+N_{l1}(p)+kS_l(p)\Delta R_l(p;t))u_l(t)=$$
$$=-(N_{l2}(p)y_l(t)+\sum_{j=1,\,j\neq l}^{r}S_l(p)\overline{N}_{lj}(p)y_j(t)- \tag{18}$$
$$-S_l(p)\Delta Q_l(p;t)y_l(t)+S_l(p)f_l(t)+M_l(p)\varepsilon_l(t)-M_l(p)k_m g(t)).$$

Положим $k_lM_l(p) + N_{l1}(p) + k_lS_l(p)\Delta R_l(p, t) = k_lS_l(p)R_l(p, t)$, где полиномы $S_l(\lambda)$ гурвицевы, а $R_l(p, t)$ – устойчивы в силу предположения П.4. Кроме того, $y_l(t)$, $f_l(t)$, $\varepsilon_l(t)$, $g(t)$, – ограниченные функции, следовательно, $u_l(t)$ – ограниченные функции. Из чего следует и ограниченность сигналов $\varphi_l(t)$, $l = 1, \ldots, r$. Тогда из выражения (12) следует ограниченность переменных $\zeta_l(t)$ и их производных.

В силу предположения П.6 реализацию производных сигнала $v_l(t)$ осуществим с помощью наблюдателя[17]. Для этого зададим законы изменения $u_l(t)$ в виде

(19) $u_l(t) = \overline{T_l}\xi_l(t)$, $l = 1,\ldots, r$,

где $\overline{T_l} = [s_{l0}, s_{l1},\ldots,s_{l(n_l-m_l-1)}]$, $s_{l0}, s_{l1},\ldots,s_{l(n_l-m_l-1)}$ – коэффициенты полиномов $T_l(\lambda)$, $\xi_l(t)$ – векторы состояний, полученные с наблюдателей [17], которые представлены в виде

(20) $\dot{\xi}_l = F_{l0}\xi_l(t) + B_{l0}(v_l(t) - \bar{v}_l(t))$, $\bar{v}_l(t) = L\xi_l(t)$, $l = 1,\ldots, r$,

Здесь $\xi_l(t) \in R^{n_l-m_l}$, F_{l0} – матрицы в форме Фробениуса с нулевой нижней строкой, $L = [1, 0,\ldots, 0]$, $B_{l0}^{\mathrm{T}} = \left[\frac{b_{l1}}{\mu_l},\ldots,\frac{b_{n_l-m_l}}{\mu_l^{n_l-m_l}}\right]$, $l = 1, \ldots, r$. Параметры $b_{l1},\ldots,b_{l(n_l-m_l)}$ выбираются так, чтобы матрицы $F_l = F_{l0} + B_lL$ были гурвицевыми, $B_l^{\mathrm{T}} = [b_{l1},\ldots,b_{l(n_l-m_l)}]$, $\mu_l > 0$ – достаточно малые числа, $l = 1, \ldots, r$.

Подставим (19) в (6) и, выбрав полиномы $T_l(\lambda)$, $l = 1, \ldots, r$, так, чтобы передаточные функции удовлетворяли условию $T_l(\lambda)/Q_{lm}(\lambda) = 1/(\lambda + \alpha_{lm})$, $\alpha_{lm} > 0$, получим

(21) $(p + a_{lm})e_l(t) = \beta_l v_l(t) + \overline{\varphi_l}(t)$, $l = 1,\ldots, r$,

где $\overline{\varphi_l}(t) = \varphi_l(t) + \beta_l(\bar{v}_l(t) - v_l(t))$.

Функции $\overline{\varphi_l}(t)$, $l = 1, \ldots, r$, описывают информацию о неопределенностях параметров моделей агентов управления, внешних неконтролируемых возмущениях, погрешностях оценок переменных $v_l(t)$ и их $n_l - m_l - 1$ производных.

Система строится при выполнении предположения П.6, поэтому промежуточные сигналы $v_l(t)$ будем формировать в виде

(22) $v_l(t) = -\frac{1}{\beta_l}(p + a_{lm})\bar{\zeta}_l(t),\ l = 1,..., r,$

где $\bar{\zeta}_l(t)$ – оценка, получаемая с наблюдателя (20) в виде

(23) $\begin{aligned} &\dot{z}_l = \bar{F}_{l0} z_l(t) + \bar{B}_{l0}(\zeta_l(t) - \bar{\zeta}_l(t)), \\ &\bar{\zeta}_l(t) = L_2 z_l(t), \end{aligned}$

где $z_l(t) \in R^2$, $\bar{F}_{l0} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\bar{B}_{l0} = \begin{bmatrix} \frac{d_{l1}}{\mu_l}, \frac{d_{l2}}{\mu_l^2} \end{bmatrix}$, $L_2 = [1,0]$. Параметры d_{l1}, d_{l2} выбираются аналогично, как в наблюдателе (20), $l = 1, \ldots, r$.

Введем в рассмотрение составные векторы

$$\begin{aligned} &\Delta(t) = \mathrm{col}(\Delta_1, \ldots, \Delta_r), \quad k = \mathrm{col}(k_1,..., k_r), \\ &u = \mathrm{col}(u_1, \ldots, u_r), \quad \psi = \mathrm{col}(\psi_1, \ldots, \psi_r), \\ &e = \mathrm{col}(e_1, \ldots, e_r), \quad \bar{e} = \mathrm{col}(\bar{e}_1, \ldots, \bar{e}_r), \\ &v = \mathrm{col}(v_1, \ldots, v_r), \quad \bar{v} = \mathrm{col}(\bar{v}_1, \ldots, \bar{v}_r), \\ &\zeta = \mathrm{col}(\zeta_1, \ldots, \zeta_r), \quad \bar{\zeta} = \mathrm{col}(\bar{\zeta}_1, \ldots, \bar{\zeta}_r), \\ &\phi = \mathrm{col}(\phi_1, \ldots, \phi_r), \quad \omega = \mathrm{col}(\omega_1, \ldots, \omega_r), \\ &\xi = \mathrm{col}(\xi_1, \ldots, \xi_r), \quad z = \mathrm{col}(z_1, \ldots, z_r) \end{aligned}$$

и блочно-диагональные матрицы

$$\begin{aligned} &A_m = \mathrm{diag}\{A_{m1}, \ldots, A_{mr}\},\ D = \mathrm{diag}\{D_0, \ldots, D_0\},\ \bar{T} = \mathrm{diag}\{\bar{T}_1, \ldots, \bar{T}_r\}, \\ &\beta = \mathrm{diag}\{\beta_1, \ldots, \beta_r\},\ L_0 = \mathrm{diag}\{L, \ldots, L\},\ \alpha = \mathrm{diag}\{\alpha_1, \ldots, \alpha_r\}, \\ &F_0 = \mathrm{diag}\{F_{10}, \ldots, F_{r0}\},\ B_0 = \mathrm{diag}\{B_{10}, \ldots, B_{r0}\}. \end{aligned}$$

Преобразуем уравнения (8), (11), (13), (19), (20), (22), (23) в векторно-матричные уравнения

(24) $\begin{aligned} &\dot{\Delta}(t) = A_m \Delta(t) + D_0 k u(t) + D_0 \psi(t), \\ &e(t) = L\Delta(t), \end{aligned}$

(25) $\dot{\bar{e}} + a_m \bar{e} = \beta v(t)$,

(26) $\beta v(t) = -(\dot{\zeta}_l(t) + a_m \zeta(t)),$

(27) $u_l(t) = \bar{T}_l \xi_l(t)$, $l = 1,..., r,$

(28) $\dot{\xi} = F_0\xi(t) + B_0(v(t) - \bar{v}(t)),\ \bar{v}(t) = L\xi(t)$,

(29) $\beta v(t) = -(\dot{\bar{\zeta}} + a_m\bar{\zeta}_l(t)),$

где $\bar{\zeta}_l(t)$ – оценки, получаемые с наблюдателей

(30) $$\begin{aligned}&\dot{z} = \bar{F}_0 z(t) + \bar{B}_0(\zeta(t) - \bar{\zeta}(t)),\\ &\bar{\zeta}(t) = L_2 z(t),\end{aligned}$$

Утверждение. Пусть выполнены условия предположений П.1 – П.6, тогда для любого $\delta > 0$ в (3) существуют числа $\mu_0 > 0$, $T > 0$ такие, что при $\mu \le \mu_0$ и $t \ge T$ для системы (24)–(30) выполнено целевое условие (3) и все переменные в системе ограничены.

Доказательство утверждения приведено в Приложении.

4. Числовой пример

Рассмотрим однородную сеть, состоящую из четырех взаимосвязных нестационарных агентов, заданных следующими системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами

$$\begin{cases}\dot{x}_{11} = x_{12},\\ \dot{x}_{12} = x_{13},\\ \dot{x}_{13} = x_{14} + c_{10}u_1 + n_{12}y_2 + n_{13}y_3 + n_{14}y_4,\\ \dot{x}_{14} = -q_{14}(t)x_{11} - q_{13}(t)x_{12} - q_{12}(t)x_{13} - q_{11}(t)x_{14} + c_{11}(t)u_1 +\\ +n_{12}y_2 + n_{13}y_3 + n_{14}y_4 + f_1(t),\\ y_1 = x_{11};\end{cases}$$

$$\begin{cases}\dot{x}_{21} = x_{22},\\ \dot{x}_{22} = x_{23},\\ \dot{x}_{23} = x_{24} + c_{20}u_2 + n_{21}y_1 + n_{23}y_3 + n_{24}y_4,\\ \dot{x}_{24} = -q_{24}(t)x_{21} - q_{23}(t)x_{22} - q_{22}(t)x_{23} - q_{21}(t)x_{24} + c_{21}(t)u_2 +\\ +n_{21}y_1 + n_{23}y_3 + n_{24}y_4 + f_2(t),\\ y_2 = x_{21};\end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{31} = x_{32}, \\ \dot{x}_{32} = x_{33}, \\ \dot{x}_{33} = x_{34} + c_{30}u_3 + n_{31}y_1 + n_{32}y_2 + n_{34}y_4, \\ \dot{x}_{34} = -q_{34}(t)x_{31} - q_{33}(t)x_{32} - q_{32}(t)x_{33} - q_{31}(t)x_{34} + c_{31}(t)u_3 + \\ +n_{31}y_1 + n_{32}y_2 + n_{34}y_4 + f_3(t), \\ y_3 = x_{31}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_{41} = x_{42}, \\ \dot{x}_{42} = x_{43}, \\ \dot{x}_{43} = x_{44} + c_{40}u_4 + n_{41}y_1 + n_{42}y_2 + n_{43}y_3, \\ \dot{x}_{44} = -q_{44}(t)x_{41} - q_{43}(t)x_{42} - q_{42}(t)x_{43} - q_{41}(t)x_{44} + c_{41}(t)u_4 + \\ + n_{41}y_1 + n_{42}y_2 + n_{43}y_3 + f_4(t), \\ y_4 = x_{41}. \end{cases}$$

Перейдем от канонических форм описания агентов к операторным формам описания. Тогда уравнения в операторных формах примут вид (1):

$$(p^4 + q_{l1}(t)p^3 + q_{l2}(t)p^2 + q_{l3}(t)p + q_{l4}(t))y_l(t) =$$

$$= (r_{l0}p + r_{l1}(t))u_l + \sum_{j=1,\, j\neq l}^{4} \overline{N}_{lj}(p)y_j(t) + f_l(t), \; l = 1, 2, 3, 4,$$

где коэффициенты $r_{l0} = c_{l0}$, $r_{l1} = c_l(t) + c_{l0}q_{l1}(t)$, $\overline{N}_{lj}(p) = n_{lj}p + n_{lj}$, $l = 1, 2, 3, 4$, $l \neq j$, $l = 1, 2, 3, 4$. Представив коэффициенты $q_{li}(t)$, $r_{l\gamma}(t)$, $l = 1, 2, 3, 4$, в виде сумм стационарных и нестационарных составляющих $q_{li}(t) = q_{li0} + \Delta q_{li}(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$, $r_{l\gamma}(t) = r_{l\gamma 0} + \Delta r_{l\gamma}(t)$, $\gamma = 0, 1$, $l = 1, 2, 3, 4$, получим уравнение (4):

$$(p^4 + q_{l10}p^3 + q_{l20}p^2 + q_{l30}p + q_{l40}) = (r_{l0}p + r_{l10})u_l - (\Delta q_{l1}(t)p^3 +$$

$$+\Delta q_{l2}(t)p^2 + \Delta q_{l3}(t)p + \Delta q_{l4}(t)) + \Delta r_{l1}(t)u_l + \sum_{j=1,\, j\neq l}^{4} \overline{N}_{lj}(p)y_j(t) +$$

$$+ f_l(t), \; l = 1, 2, 3, 4.$$

Заметим, что $r_{l0} = k_l$, $l = 1, 2, 3, 4$.

Уравнение ведущего агента-лидера: $(p + 3)^3 y_m(t) = 81r(t)$.

Предположим, что известно множество Ξ возможных значений параметров моделей агентов: $-4 \le q_{li0} \le 4$, $-6 \le \Delta q_{li}(t) \le 6$, $i = 1, 2, 3, 4$, $1 \le r_{l0} \le 4$, $-7 \le \Delta r_{l1}(t) \le 25$, $4 \le r_{l10} \le 15$. Внешние возмущения в каждом агенте сети не контролируются, согласно предположению П.3 удовлетворяют условию $|f_l(t)| < 10$, $l = 1, 2, 3, 4$.

Выберем в каждом агенте сети полиномы $T_l(\lambda) = (\lambda + 3)^3$, $\beta_l = 20$, $l = 1, 2, 3, 4$.

Вспомогательные контуры введем в виде $(p+3)\bar{e}_l(t) = 20v_l(t)$, $l = 1, 2, 3, 4$, тогда уравнения наблюдателей (20), (23) примут вид

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{l1}(t) = \xi_{l2}(t) + \dfrac{6}{\mu_l}(v_l(t) - \xi_{l1}(t)), \\ \dot{\xi}_{l2}(t) = \dfrac{8}{\mu_l^2}(v_l(t) - \xi_{l1}(t)), \\ \bar{v}_l(t) = \xi_{l1}(t). \end{cases}$$

Моделирование системы синхронизации сети проводилось при следующих значениях коэффициентов уравнений моделей агентов: $q_{1i0} = 3$, $q_{2i0} = 4$, $q_{3i0} = 2$, $q_{4i0} = -1$, $\Delta q_{l1}(t) = 3\cos 4t$, $i = 1, 2, 3, 4$, $\Delta q_{l4}(t) = \sin 2t$, $\Delta q_{l1}(t) = 3\cos 4t$, $\Delta q_{l2}(t) = 5\cos 4t$, $q_{l3}(t) = 3\sin t$, $c_{l1}(t) = 5+\sin 5t$, $c_{l0} = r_{l0} = k_l = 4$, $r_{l10} = 3$, $\Delta r_{l1}(t) = \sin t$, $l = 1, 2, 3, 4$; $n_{12} = n_{21} = n_{31} = n_{41} = 1$, $n_{13} = n_{23} = n_{32} = n_{42} = 2$, $n_{14} = n_{24} = n_{34} = n_{43} = 3$. Задающее воздействие в уравнении ведущего агента (2) имеет вид $g(t) = 1 + \sin 3t$, $k_m = 81$.

Синхронизируются четыре идентичных агента при условии воздействия на них разных по амплитуде внешних гармонических возмущений:

$f_1(t) = 9\sin 1{,}7t$, $f_2(t) = 8{,}5\sin 3t$, $f_3(t) = 7\sin 5t$, $f_4(t) = 2\sin t$.

Параметры регулятора: $\mu_l = 0{,}01$, $a_{lm} = 3$, $l = 1, 2, 3, 4$. Начальные условия нулевые.

На рис.1. представлен выход ведущего агента – лидера, сигнал которого отслеживают выходы агентов сети.

На рис. 2. представлены ошибки слежения $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$ в четырех агентах сети.

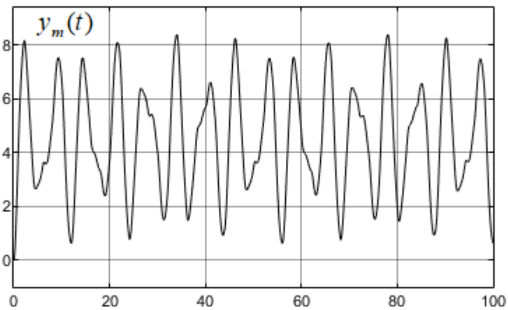

Рис. 1. Переходный процесс по выходу $y_m(t)$ ведущего агента – лидера сети

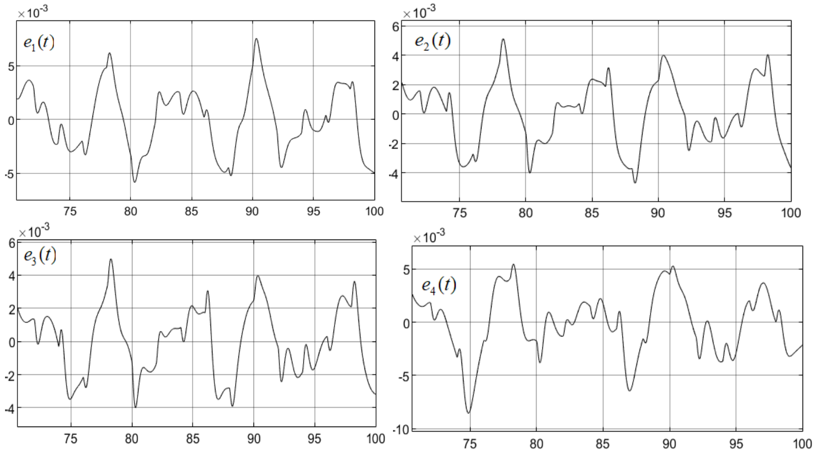

Рис. 2. Переходные процессы по ошибкам слежения $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $e_4(t)$

5. Заключение

В работе рассмотрен один из возможных подходов построения системы синхронизации сети взаимосвязных нестационарных агентов в условиях неопределенности и внешних возмущений с использованием в каждом агенте сети вспомогательного контура и двух наблюдателей переменных. Получена система синхронизации с использованием данных об измерениях скалярных входов и выходов агентов сети. Рассмотрен иллюстрирующий числовой пример сетевого объекта. Имитационное моделирование системы управления сетью, состоящей из четырех агентов, проведено в пакете SimulinkMatlab. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и продемонстрировали эффективность системы синхронизации в условиях параметрической неопределенности и внешних возмущений.

Приложение

Доказательство утверждения. Введем в рассмотрение нормированные векторы $\bar{\eta}(t), \bar{w}(t)$ ошибок оценок производных переменных $v(t)$, $\zeta(t)$:

$$\bar{\eta}(t) = \Gamma_1^{-1}(\sigma(t) - \xi(t)), \quad \bar{w}(t) = \Gamma_2^{-1}(z_0(t) - z(t)),$$

где $\sigma^{\mathrm{T}} = (v(t), pv(t), \ldots, p^{n-m}v(t))$, $z_0^{\mathrm{T}} = [\zeta(t), p\zeta(t)]$,
$\Gamma_1 = \mathrm{diag}\{\mu^{n-m-1}, \ldots, \mu, 1\}$, $\Gamma_2 = \mathrm{diag}\{\mu, 1\}$.

Тогда уравнения наблюдателей (20) и (23) с учетом введенных нормированных векторов примут вид

$$(31) \quad \begin{cases} \dot{\bar{\eta}}(t) = \dfrac{1}{\mu} F\bar{\eta} - b_0 p^{n-m} v(t), \\ \theta(t) = \mu^{n-m-1} L\bar{\eta}(t), \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{\bar{w}}(t) = \dfrac{1}{\mu} \bar{F}\bar{w}(t) - \bar{b}_0 p^2 \zeta(t), \\ \tau(t) = \mu L_2 \bar{w}(t), \end{cases}$$

где $\bar{F} = \bar{F}_0 + \bar{B}_0 L_2$, $b_0^{\mathrm{T}} = [0, ..., 1]$, $\bar{b}_0^{\mathrm{T}} = [0, 1]$, $L_2 = [1, 0]$, $\theta(t) = v(t) - \bar{v}(t)$, $\tau(t) = \zeta(t) - \bar{\zeta}(t)$.

Перейдем к операторным формам записи уравнений (31):

$$(32) \quad \left(p^{n-m} + \frac{b_1}{\mu} p^{n-m-1} + \ldots + \frac{b_{(n-m)}}{\mu^{n-m}} \right) \theta(t) = p^{n-m} v(t),$$

$$(33) \quad \left(p^2 + \frac{d_1}{\mu} p + \frac{d_2}{\mu^2} \right) \tau(t) = p^2 \zeta(t).$$

Заметим, что уравнения (31) можно записать в виде

(34) $$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = \dfrac{1}{\mu} F\eta(t) - bpv(t), \\ \theta(t) = \mu^{n-m-1} L\eta(t), \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{w}(t) = \dfrac{1}{\mu} \bar{F} w(t) - \bar{b} p\zeta(t), \\ \tau(t) = \mu L_2 w(t), \end{cases}$$

где $b^{\mathrm{T}} = [1, 0, \ldots, 0]$, $\bar{b}^{\mathrm{T}} = [1,\ 0]$. Уравнения (31) и (34) эквивалентны, так как являются разными векторно-матричными формами записей уравнений (32), (33).

Учитывая (19), (21), (22) и (34), уравнение для рассогласований (12) примет вид

(35) $e(t) = -\mu L_2 w(t).$

Выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(t) = \eta^{\mathrm{T}}(t) H \eta(t) + w^{\mathrm{T}}(t) H_1 w(t),$$

где матрицы H, H_1 являются решениями уравнений Ляпунова

$$HF + F^{\mathrm{T}} H = -2\rho_1 I, \quad H_1 \bar{F} + \bar{F}^{\mathrm{T}} H_1 = -2\rho_2 I,$$

где $H > 0$, $H_1 > 0$, $\rho_1 > 0$, $\rho_2 > 0$.

Вычислим полную производную на траекториях системы (34):

(36) $$\dot{V}(t) = -2\frac{\rho_1}{\mu}|\eta(t)|^2 - 2\frac{\rho_2}{\mu}|w(t)|^2 - 2\eta^{\mathrm{T}}(t) Hpv(t) - 2w^{\mathrm{T}}(t) H_1 p\zeta(t).$$

Запишем уравнения (23) в виде

(37) $$\begin{cases} \mu_1 \dot{\eta}\ (t) = F\eta(t) - \mu_2 bpv(t), \\ \mu_1 \dot{w}\ (t) = \bar{F}\, w(t) - \mu_2 \bar{b} p\zeta(t), \\ (p + a_m)e = -\mu_2 (p + a_m) L_2 w(t), \\ \mu_1 = \mu_2. \end{cases}$$

Воспользуемся леммой 1 [14].

Пусть в (37) $\mu_2 = 0$, тогда имеем две системы

$$\mu_1 \dot{\eta}_l(t) = F\eta(t),$$

$$\mu_1 \dot{w}_l(t) = \bar{F} w(t),$$

которые в силу условий (20) и (23) являются экспоненциально устойчивыми, все производные измеряются. То есть в области Ω, как было доказано ранее, $e(t) \to 0$, $|\nu(t)| < k_1$, $|\zeta(t)| < k_2$, а из (9) и (12) следует, что $|\dot{\zeta}(t)| < k_3$, $|\dot{v}(t)| < k_4$, где k_1, k_2, k_3, k_4 –

некоторые положительные константы. Таким образом, условия леммы 1 [14] выполнены.

Покажем, что в случае $\mu_2 \neq 0$, а точнее при $\mu_1 < \mu_0$ и $\mu_2 < \mu_0$ областью диссипативности будет Ω. Положим в (37) $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ и, подставив их в (36), воспользуемся следующими оценками:

$$-2\eta^{\mathrm{T}}(t)Hpv(t) \le \frac{1}{\mu}|\eta(t)|^2 + \mu\|H\||pv(t)| \le \frac{1}{\mu}|\eta(t)|^2 + \mu\|H\|k_3,$$

$$-2w^{\mathrm{T}}(t)H_1 p\zeta(t) \le \frac{1}{\mu}|w(t)|^2 + \mu\|H_1\|k_4.$$

Оценим производную (36) от функции Ляпунова, используя полученные последние неравенства

$$\dot{V}(t) \le -\frac{\rho_1}{\mu}|\eta(t)|^2 - \frac{\rho_2}{\mu}|w(t)|^2 - \frac{1}{\mu}(\rho_1 - 1)|\eta(t)|^2 -$$

$$-\frac{1}{\mu}(\rho_2 - 1)|w(t)|^2 + \mu(\|H\|k_3 + \|H_1\|k_4).$$

Пусть $\rho_1 > 1$ и $\rho_2 > 1$.Тогда имеем

$$\dot{V}(t) \le -\frac{\rho_1}{\mu}|\eta(t)|^2 - \frac{\rho_2}{\mu}|w(t)|^2 + \mu\beta, \tag{38}$$

где $\beta = \|H\|k_3 + \|H_1\|k_4$. Откуда следует

$$\dot{V}(t) \le -\beta_1 V(t) + \mu\beta, \tag{39}$$

где $\beta_1 = \min\left\{\frac{\rho_1}{\mu\bar{\lambda}(H)}; \frac{\rho_2}{\mu\bar{\lambda}(H_1)}\right\}$, $\bar{\lambda}(H), \bar{\lambda}(H_1)$ – максимальные собственные числа матриц H, H_1 соответственно. Разрешив (39), получим $V(t) \le \frac{\mu\beta}{\beta_1}$.

Учитывая $|w(t)|^2 \le \frac{1}{\lambda(H_1)}V(t) \le \frac{\mu\beta}{\beta_1}$, а также (37),имеем $|e(t)| \le \mu|w(t)| \le \mu\sqrt{\frac{\mu\beta}{\beta_1}}$. Следовательно, для любых $\delta > 0$ в целевом условии (3) существует μ_0 такое, что будет выполнено условие (3).

Литература

1. АНДРИЕВСКИЙ Б.Р., ФУРТАТ И.Б. *Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 1. Методы* // Автоматика и телемеханика. –2020. – №9. – С. 3–61.
2. АНДРИЕВСКИЙ Б.Р., ФУРТАТ И.Б. *Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 2. Приложения*//Автоматика и телемеханика. – 2020. – №10. – С. 35–91.
3. БУЙ В.Х., МАРГУН А.А., БОБЦОВ А.А. *Синтез наблюдателя переменных состояния и синусоидального возмущения для линейной нестационарной системы с неизвестными параметрами* // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, №3. – С. 209–219.
4. ИМАНГАЗИЕВА А.В., ЦЫКУНОВ А.М. *Робастное управление нестационарным динамическим объектом с компенсацией возмущений* // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – №2. – С. 19–23.
5. ИМАНГАЗИЕВА А.В. *Синхронизация сети нелинейных объектов с запаздыванием по состоянию в условиях неопределенности* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, №5. – С. 266–273.
6. МИТРИШКИН Ю.В., КАРЦЕВ Н.М., КУЗНЕЦОВ Е.А. и др. *Методы и системы магнитного управления плазмой в токамаках.* – М.: КРАСАНД, 2020. – 528 с.
7. ПЛОТНИКОВ С.А. *Десинхронизация и колебательность в возбудимых сетях ФитцХью – Нагумо* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, №6. – С. 292–299.
8. ПОЛЯК Б.Т., ХЛЕБНИКОВ М.В., РАПОПОРТ Л.Б. *Математическая теория автоматического управления: учебное пособие.* – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 500 с.
9. ПРОСКУРНИКОВ А.В., ФРАДКОВ А.Л. *Задачи и методы сетевого управления* // Автоматика и телемеханика. – 2016. – №10. – С. 3–39.
10. СТАББЕРУД А.Р. *Методы синтеза линейных систем автоматического управления с переменными параметрами* // Современная теория систем управления / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1970. – С. 17–86.

11. ФУРТАТ И.Б., ЦЫКУНОВ А.М. *Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу* // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2005. – Т. 48, №7. – С. 15–19.
12. ФУРТАТ И.Б. *Дивергентные условия устойчивости динамических систем* // Автоматика и телемеханика. – 2020. – №2. –С. 62–75.
13. ФУРТАТ И.Б. *Плотностные системы. Анализ и управление* // Автоматика и телемеханика. –2023. – №11. – С. 55–76.
14. ЦЫКУНОВ А.М. *Адаптивное и робастное управление динамическими объектами по выходу.* – М.: Физматлит, 2009. – 268 с.
15. ЦЫКУНОВ А.М. *Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений* // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №7. – С. 103–115.
16. ЦЫКУНОВ А.М. *Робастная синхронизация сети объектов с распределенным запаздыванием* // Автоматика и телемеханика. – 2015. – №11. – С. 60–75.
17. ATASSI A.N., KHALIL H.K. *Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems* // IEEE Trans. Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, No.9. – P. 1672–1687.
18. FEUER A., MORSE A.S. *Adaptive control of single-input, single-output linear systems*// IEEE Trans. on Automatic Control. – 1978. – Vol. 23, No. 4. – P. 557–569.
19. FURTAT I.B., GUSHCHIN P.A., HUY N.BA. *Control of Electrical Generators Based on Low-pass Filter and Artificial Time-delay* // IFAC – Papers OnLine. – 2022. – Vol. 55, No.12. – P. 353–358.
20. FURTAT I., FRADKOV A., TSYKUNOV A. *Robust synchronization of linear dynamical networks with compensation of disturbances* // Int. Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2014. – Vol. 24, No.17. – P. 2774–2784.
21. LI Q.-K., LIN H., TAN X.et al. *H∞ Consensus for Multiagent-Based Supply Chain Systems Under Switching Topology and Uncertain Demands* // IEEE Trans.on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. –2020. – Vol. 50, No. 12. –P. 4905–4918.
22. MITRISHKIN Y.V., KORENEV P.S., KONKOV A.E. *New horizontal andvertical field coils with optimised location for ro-*

bust decentralized plasma position control in the IGNITOR tokamak // Fusion Engineering and Design. – 2022. – Vol. 174 – 112993.
23. NIKIFOROV V.O., PARAMONOV A.V., GERASIMOV D.N. *Adaptive Compensation of Unmatched Disturbances in Unstable MIMO LTI Plants with Distinct Input Delays* // IFAC – Papers OnLine. – 2023. – Vol. 56, No. 2. – P. 9179–9184.
24. OLFATI–SABER R. *Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory* // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2006. – Vol. 51, No. 3. – P. 401–420.
25. POLYAK B.T., KHLEBNIKOV M.V., SHCHERBAKOV P.S. *Linear matrix inequalities in control systems with uncertainty* // Automation and Remote Control. – 2021. –Vol. 82, No. 1. – P. 1–40.
26. PYRKIN A., BOBTSOV A., ORTEGA R. *An adaptive observer for uncertain linear time-varying systems with unknown additive perturbations* // Automatica. – 2023. – Vol. 147. – 110677.
27. XIA Y., LI C. *Robust Control Strategy for an Uncertain Dual-Channel Closed-Loop supply Chain with Process Innovation for Remanufacturing* // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 97852–97865.
28. XIANWEI L., YANG T., KARIMI H.R. *Consensus of multi-agent systems via fully distributed event-triggered control* // Automatica. – 2020. – Vol. 116. – 108898.

CONTROL OF A NETWORK OF TIME-VARYING AGENTS UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY AND EXTERNAL DISTURBANCES

Aliya Imangazieva, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Cand.Sc. (aliya111@yandex.ru).

Abstract: The structure of the control system for synchronisation of a network of identical agents under conditions of nonstationarity and parametric uncertainty of agent models is proposed. During synchronisation, it is required to ensure time-consistent behaviour of identical agents of the network taking into account external perturbations acting on each agent. In subsystems the scalar output of the leading agent is monitored, the agents are independent. Scalar inputs and outputs of agents are available for measurement. To solve the set network problem, controlling laws are built in each agent based on the auxiliary loop method, which is based on the *principle of dynamic compensation. Signals carrying information negatively affecting the regulation of the subsystem are formed in advance, and then their compensation is carried out. In each agent, information about the derivatives of the intermediate signals is required, for which Khalil observers are used. To illustrate the performance of the proposed synchronisation system, we consider a numerical example of controlling a network object consisting of four agents, each of which is subject to external disturbances of different amplitude. Modelling in MATLAB Simulink has been carried out. The simulation results confirmed the theoretical conclusions and showed good performance of the synchronisation system under conditions of uncertainty and non-stationarity of the network agents' models.*

Keywords: control, synchronization, time-varying, agent network, parametric uncertainty, observer, auxiliary loop, disturbances.

УДК 519.7
ББК 22.18

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии И.Б. Фуртатом.

Поступила в редакцию 28.10.2024.
Опубликована 31.03.2025.