

Е. М. Васильев, канд. техн. наук, доц., **А. С. Одношивкин**, магистрант, vgtu-aits@yandex.ru,
Воронежский государственный технический университет

Гомеостатическое управление динамическими системами на основе нечетких регуляторов

Рассматривается задача гомеостатического управления системами с существенной неопределенностью динамической структуры и нестационарностью параметров. На примере процесса двухконтурного противоточного теплообмена раскрываются приемы и способы решения поставленной задачи на основе нечетких регуляторов. Приводятся результаты численного моделирования синтезированной системы управления и обсуждаются ее свойства.

Ключевые слова: гомеостатическое управление, многоуровневые и многорежимные системы, принципы многоальтернативности, нечеткие алгоритмы

Введение

К характерным особенностям задач управления сложными динамическими системами относятся [1]:

- существенная неопределенность и высокий порядок дифференциальных уравнений, описывающих эти системы;
- нестационарность во времени параметров системы и внешних условий;
- распределенность процессов в пространстве, приводящая к значительному транспортному запаздыванию управляющих воздействий.

Вытекающая из этих особенностей необходимость упрощения моделей объектов и методик расчета соответствующих систем управления в общем случае затрудняет обеспечение показателей качества этих систем и приводит к росту опасности неуправляемого протекания процессов в критических условиях. В связи с этим актуальной остается проблема поиска подходов и методов управления, совмещающих в себе простоту реализации и надежность достижения целей управления в широком диапазоне режимов функционирования систем, в том числе и в критических режимах.

В предлагаемой статье рассматривается возможность решения указанной проблемы на основе концепции гомеостатического управления, сформулированной У. Эшби [2] и сохраняющей свою актуальность в настоящее время [3–7].

В основе этой концепции лежит базовая кибернетическая предпосылка об искусственном воспроизведении способов функционирования биологических систем, существующих в условиях изменяющейся внешней среды и влияния естественного отбора. Успешное развитие живых организмов в указанных неопределенных условиях, требующих от популяций непрерывной борьбы за свое существование, свидетельствует о том, что в процессе эволюции в биологических сообществах сформировались некоторые общие свойства, обеспечивающие им возможность этого развития, в частности, *свойство гомеостаза*.

Биологическое содержание гомеостаза состоит в способности организма поддерживать характеристики своего функционирования в физиологически допустимых пределах [3, 4, 6]. Техническая реализация этого свойства в искусственных системах основана на ряде достаточно универсальных принципов, в качестве которых постулируются [2, 6–10]:

- принцип многоуровневости (иерархичности) управления, реализуемый путем организации в открытых системах, по меньшей мере, двух уровней управления, один из которых функционирует в области допустимых вариаций состояния системы, а другие реагируют только на критические отклонения от этого состояния;
- принцип многообразия алгоритмов управления и разделения функций (многорежимность и переключение структур), тесно связанный с принципом многоуровневости и отражающий гибкость алгоритмов управления в изменяющихся условиях функционирования системы [11–12];
- принцип модульности (дискретности) строения, обеспечивающий разнообразие уровней и режимов управления на основе комбинаций ограниченного набора элементарных модулей системы [13–14].

Совокупность сформулированных принципов позволяет решать поставленные выше задачи управления не в результате качественного усложнения соответствующих алгоритмов, но путем количественного наращивания в системе числа простых, альтернативных способов управления, отвечающих информационному принципу необходимого разнообразия: "Только разнообразие может уничтожить разнообразие" [15].

Рассмотрим реализацию этих принципов на примере системы управления процессом теплообмена, являющегося типовым образцом многомерной открытой системы [16]. В работе использована реализация алгоритмов управления на основе нечетких регуляторов, выбор которых рассматривается ниже.

Описание объекта управления

В качестве объекта управления выбран двухконтурный процесс противоточного теплообмена, обобщенная схема которого показана на рис. 1.

На схеме обозначены: $T_{x, \text{ВХ}}, T_{x, \text{ВЫХ}}$ — температуры "холодного" теплоносителя вторичного контура на входе и выходе теплообменника соответственно; $T_{\Gamma, \text{ВХ}}, T_{\Gamma, \text{ВЫХ}}$ — температуры "горячего" теплоносителя контура нагревателя на входе и выходе теплообменника; $T_{\text{Н, ВХ}}, T_{\text{Н, ВЫХ}}$ — температуры теплоносителя на входе и выходе нагревателя; θ — время, необходимое для прохождения теплоносителем расстояния между теплообменником и нагревателем; $e^{-p\theta}$ — передаточная функция звена запаздывания; g_x, g_Γ — массовые расходы теплоносителей в секунду в контуре потребителей и в контуре нагревателя; U — температура рабочей поверхности нагревателя.

Объект управления дополнительно введен нагреватель, образующий совместно с теплообменником замкнутый первичный контур общего процесса теплообмена (рис. 1).

Нагреватель и теплообменник представляются отдельными цепочками из N последовательных ячеек, внутри каждой из которых температура теплоносителей в течение заданного малого интервала dt времени принимается постоянной. Такая пространственная и временная дискретизация рассматриваемых процессов позволяет описать их в разностной форме [17].

Для ячейки j ($j = \overline{1, N}$) нагревателя на интервале времени i :

$$\frac{dT_{\text{Н}, i-1}^j}{dt} = \frac{[ks(U - T_{\text{Н}, i-1}^j) - g_\Gamma c(T_{\text{Н}, i-1}^j - T_{\text{Н}, i-1}^{j-1})]}{m_\Gamma c}, \quad (1)$$

$$T_{\text{Н}, i}^j = T_{\text{Н}, i-1}^j + \left(\frac{dT_{\text{Н}, i-1}^j}{dt} \right) dt, \quad (2)$$

для ячейки j теплообменника (значение j возрастает по направлению движения "холодного" теплоносителя):

$$\begin{aligned} \frac{dT_{x, i-1}^j}{dt} &= \\ &= \frac{[ks(T_{\Gamma, i-1}^j - T_{x, i-1}^j) - g_x c(T_{x, i-1}^j - T_{x, i-1}^{j-1})]}{m_x c}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\Gamma, i-1}^j}{dt} &= \\ &= \frac{[-ks(T_{\Gamma, i-1}^j - T_{x, i-1}^j) + g_\Gamma c(T_{\Gamma, i-1}^{j+1} - T_{\Gamma, i-1}^j)]}{m_\Gamma c}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$T_{x, i}^j = T_{x, i-1}^j + \left(\frac{dT_{x, i-1}^j}{dt} \right) dt, \quad (5)$$

$$T_{\Gamma, i}^j = T_{\Gamma, i-1}^j + \left(\frac{dT_{\Gamma, i-1}^j}{dt} \right) dt, \quad (6)$$

$$T_{\Gamma, \text{ВХ}, i} = T_{\text{Н, ВЫХ}, i - \frac{\theta}{dt}}; \quad T_{\text{Н, ВХ}, i} = T_{\Gamma, \text{ВЫХ}, i - \frac{\theta}{dt}}, \quad (7)$$

где $\frac{dT}{dt}$ — градиент температуры в элементарной ячейке; c — удельная теплоемкость теплоносителя; k — коэффициент теплопередачи через стенку между горячим и холодным теплоносителями; s — площадь теплопередачи в пределах одной ячейки; m_Γ, m_x — массы теплоносителей в элементарной ячейке; $T_{\text{Н}}^0 = T_{\text{Н, ВХ}}, T_{\text{Н}}^N = T_{\text{Н, ВЫХ}}, T_{\text{Х}}^0 = T_{\text{Х, ВХ}}, T_{\text{Х}}^N = T_{\text{Х, ВЫХ}}, T_{\Gamma}^{N+1} = T_{\Gamma, \text{ВХ}}, T_{\Gamma}^1 = T_{\Gamma, \text{ВЫХ}}$.

Численное решение уравнений (1)–(6) реализовано в пакете MatLab на имитационной модели, общий вид которой представлен на рис. 2.

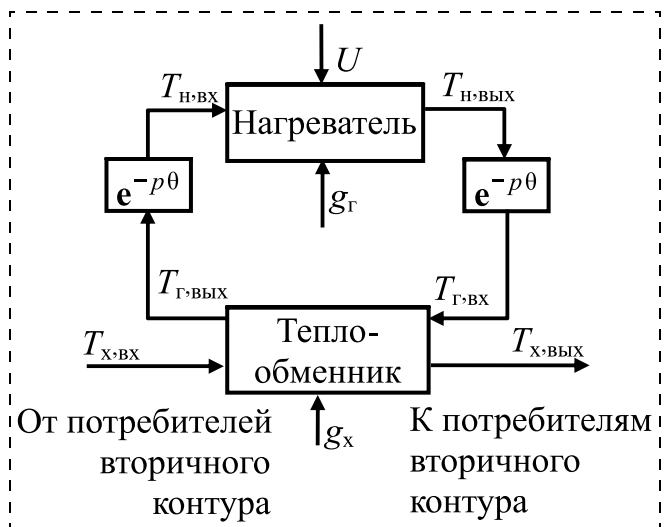


Рис. 1. Схема противоточного теплообмена

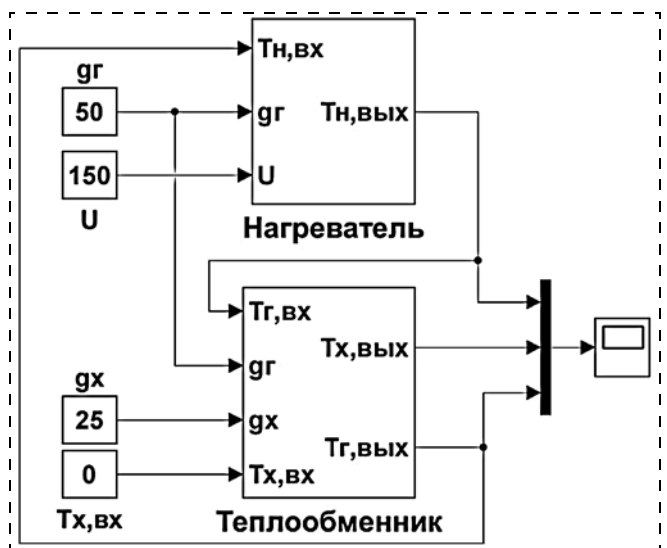


Рис. 2. Имитационная модель процесса теплообмена

Отличительной особенностью этой модели является прямая имитация функционирования каждой из N идентичных ячеек нагревателя и теплообменника с шагом решения dt , принятым при временной дискретизации процесса. Фрагмент модели нагревателя с двумя первыми ячейками ($j = 1, 2$) показан на рис. 3.

Программируемые модули "cell" на рис. 3 содержат операторы, соответствующие уравнениям (1) и (2). В модели теплообменника аналогичные операторы реализуют уравнения (3)–(7).

На рис. 4 показаны переходные процессы в теплообменнике, построенные с помощью модели (1)–(7).

Числовые значения параметров моделирования: $m_r = 25$ кг; $m_x = 30$ кг; $c = 4190$ Дж/кг·К; $k = 2500$ Вт/м²·К; $g_x = 25$ кг/с; $g_r = 50$ кг/с; $N = 100$; $s = 0,3$ м²; $\theta = 0$ с; $dt = 0,1$ с.

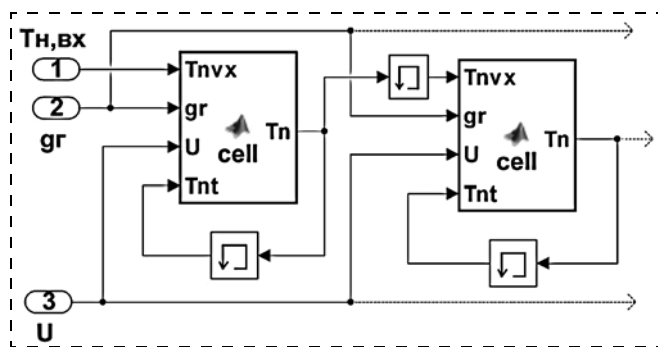


Рис. 3. Фрагмент модели нагревателя

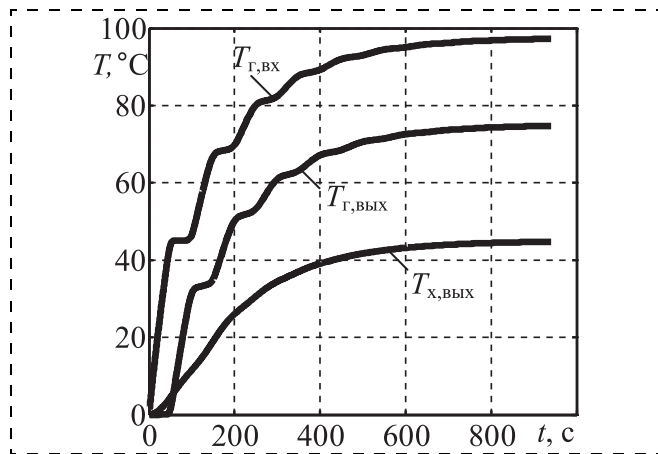


Рис. 4. Переходные процессы в теплообменнике

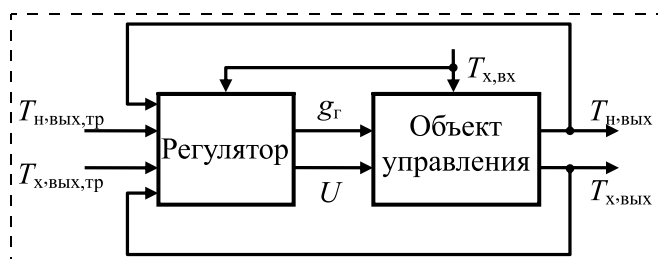


Рис. 5. Функциональная схема системы управления

Начальные температуры теплоносителей в системе приняты нулевыми. Температура нагревателя $U = 150$ °С поддерживалась постоянной. На рис. 4 хорошо видна 100-секундная периодичность $T_{r, vx}$ и $T_{r, vyx}$, характерная для замкнутого цикла в пространственно-распределенном контуре нагревателя.

Система гомеостатического управления

В качестве координат состояния системы будем использовать:

- регулируемые величины: $T_{x, vyx}$, $T_{n, vyx}$ — температуры теплоносителей на выходе теплообменника и на выходе нагревателя (см. рис. 1), значение $T_{x, vyx}$ должно поддерживаться в диапазоне $T_{x, vyx} = 60...70$ °С, а $T_{n, vyx}$ — не превышать некоторого максимального значения $T_{n, vyx, макс}$, например, $T_{n, vyx, макс} = 100$ °С;
- управляющие воздействия: U , g_r — температура рабочей поверхности нагревателя и массовый расход теплоносителя в секунду в контуре нагревателя;
- возмущающее воздействие: $T_{x, vx}$ — температура теплоносителя на входе теплообменника, изменяющаяся в диапазоне $30...50$ °С со скоростью до $0,8$ °С/мин.

Функциональная схема системы управления показана на рис. 5, где $T_{n, vyx, тр}$ — требуемое среднее значение температуры теплоносителя на выходе нагревателя; $T_{x, vyx, тр}$ — требуемое среднее значение температуры теплоносителя вторичного контура на выходе теплообменника.

Исходя из априорной неопределенности и нестационарности параметров объекта, будем синтезировать регуляторы в классе нечеткого управления. Дополнительным аргументом в пользу этого выбора послужила отмеченная в работе [18] исключительная возможность нечеткого управления: формировать независимые индивидуальные правила регулирования для различных состояний объекта управления. Такая возможность хорошо соответствует заявленным выше принципам гомеостатического управления.

В соответствии с принципом многоуровневости сформируем структуру системы автоматического управления с пятью уровнями регулирования в каждом канале воздействий g_r и U .

Структурная схема канала управления по g_r показана на рис. 6.

На основе текущего значения контролируемой температуры $T_{n, vyx}$ формируется лингвистическая переменная $\tilde{T}_{n, vyx} = \gamma$, где γ содержит нечеткие переменные:

$$\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\},$$

например, γ_1 — температура $T_{n, vyx}$ существенно ниже требуемого среднего значения $T_{n, vyx, тр}$; γ_2 — температура $T_{n, vyx}$ ниже требуемого среднего значения $T_{n, vyx, тр}$; γ_3 — $T_{n, vyx}$ примерно равна $T_{n, vyx, тр}$; γ_4 —

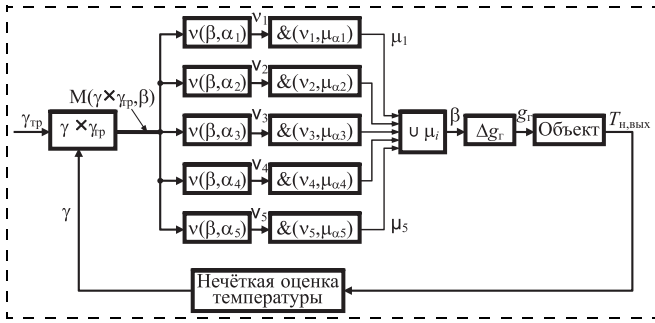


Рис. 6. Структурная схема канала управления по $g_{гр}$

$T_{н, вых}$ выше требуемой; γ_5 — $T_{н, вых}$ существенно выше требуемой температуры $T_{н, вых, тр}$.

На рис. 7 приведены используемые в примере функции принадлежности $\mu_{\gamma 1}(T_{н, вых}), \dots, \mu_{\gamma 5}(T_{н, вых})$.

Приращению $\Delta g_{гр}$ массового расхода $g_{гр}$ поставим в соответствие лингвистическую переменную α :

$$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\},$$

со значениями, используемыми, например, меры сравнения: α_1 — расход $g_{гр}$ теплоносителя следует существенно уменьшить по сравнению с его текущим значением; ... α_3 — расход $g_{гр}$ практически не изменять; ...; α_5 — расход $g_{гр}$ следует существенно увеличить. Используемые функции принадлежности $\mu_{\alpha 1}(\Delta g_{гр}), \dots, \mu_{\alpha 5}(\Delta g_{гр})$ показаны на рис. 8.

Для каждой нечеткой переменной $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ в структуре системы выделен отдельный канал управления, вклад каждого из них в результирующее нечеткое управляющее воздействие β , вырабатываемое регулятором, определяется мерой близости текущего состояния γ к требуемому состоянию $\gamma_{тр}$:

$$\gamma_{тр} = \{\mu_{\gamma 1}(T_{н, вых, тр}), \mu_{\gamma 2}(T_{н, вых, тр}), \dots, \mu_{\gamma 5}(T_{н, вых, тр})\}. \quad (8)$$

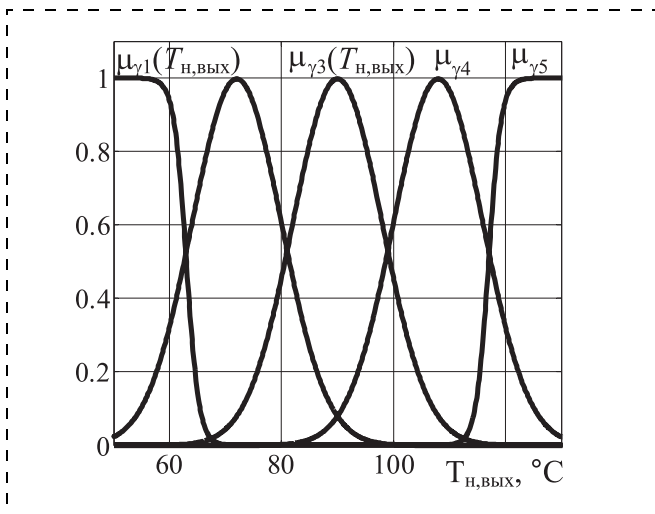


Рис. 7. Функции принадлежности нечетких переменных $\gamma_1, \dots, \gamma_5$

В общем случае $T_{н, вых, тр} = f(T_{х, вх})$, и с ростом $T_{х, вх}$ значение $T_{н, вых, тр}$ снижается.

Используя декартово произведение множеств γ и $\gamma_{тр}$, получим матрицу перехода $M(\gamma \times \gamma_{тр}, \beta)$ из текущего состояния γ объекта в требуемое $\gamma_{тр}$ под действием искомого управления β :

$$M(\gamma \times \gamma_{тр}, \beta) = \gamma \times \gamma_{тр}. \quad (9)$$

Для определения общего управления β для каждого из n каналов системы экспертным путем формируются матрицы перехода $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; $r = 1, \dots, n$; $n = 5$, значения элементов которых характеризуют возможность перехода объекта из состояния γ_i в состояние γ_j под действием нечеткого управления α_r .

Примеры таких матриц для управлений α_1 и α_2 имеют вид:

$$M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_1) = \begin{matrix} & \begin{matrix} \gamma_j \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \gamma_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \gamma_i \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,50 & 0,80 & 1 & 0,80 & 0,5 \\ 0,15 & 0,50 & 0,80 & 1 & 0,8 \\ 0,05 & 0,15 & 0,50 & 0,80 & 1 \\ 0,01 & 0,05 & 0,15 & 0,50 & 1 \\ 0,005 & 0,01 & 0,05 & 0,15 & 1 \end{matrix} \end{matrix};$$

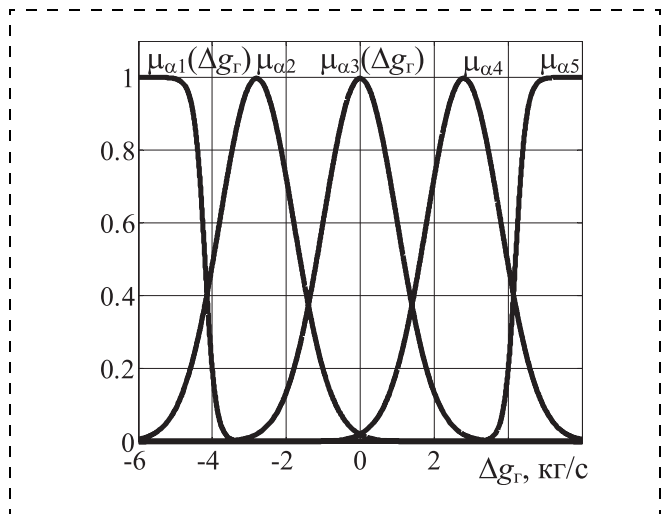
$$M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_2) = \begin{matrix} & \begin{matrix} \gamma_j \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \gamma_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \gamma_i \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{matrix} & \begin{matrix} 0,80 & 1 & 0,80 & 0,50 & 0,15 \\ 0,50 & 0,80 & 1 & 0,80 & 0,50 \\ 0,15 & 0,50 & 0,80 & 1 & 0,80 \\ 0,05 & 0,15 & 0,50 & 0,80 & 1 \\ 0,01 & 0,05 & 0,15 & 0,50 & 1 \end{matrix} \end{matrix}.$$


Рис. 8. Функции принадлежности нечетких переменных $\alpha_1, \dots, \alpha_5$

В качестве меры близости искомого управления β к известным управлениям $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ применяется степень включения матрицы перехода $M(\gamma \times \gamma_{TP}, \beta)$ в соответствующие матрицы для каждого канала:

$$v_r = v(\beta, \alpha_r) = v[M(\gamma \times \gamma_{TP}, \beta), M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)] = \min\{\max[1 - M(\gamma \times \gamma_{TP}, \beta)_{ij}, M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)_{ij}]\}. \quad (10)$$

Полученные значения мер близости v_r используются для логического вывода:

$$\mu_r(\Delta g_r) = \&_{\Delta g_r}(v_r, \mu_{\alpha_r}(\Delta g_r)), \quad (11)$$

результатом $\mu_r(\Delta g_r)$ которого являются усеченные на уровне v_r функции принадлежности $\mu_{\alpha_r}(\Delta g_r)$.

Управление β может быть определено объединением по всем нечетким подмножествам $\mu_r(\Delta g_r)$:

$$\beta = \{\mu(\Delta g_r)\} = \left\{ \bigcup_{\Delta g_r} \mu_r(\Delta g_r) \right\}. \quad (12)$$

Вычисление текущего четкого значения $\Delta g_r(t)$ осуществляется методом центраида:

$$\Delta g_r(t) = \frac{\int \Delta g_r \mu(\Delta g_r) d\Delta g_r}{\int \mu(\Delta g_r) d\Delta g_r}, \quad (13)$$

с последующим интегрированием по времени для получения управляющего воздействия $g_r(t)$:

$$g_r(t) = \int \Delta g_r(t) dt. \quad (14)$$

Процедуры (8)–(14) определяют собой алгоритм работы системы в канале управления температурой $T_{н, вых}$ теплоносителя на выходе нагревателя с помощью изменения массового расхода g_r этого теплоносителя в первичном контуре. Отметим, что для

формирования управления (8)–(14) не потребовалась информация о динамической модели объекта.

Структура регулятора канала управления выходной температурой $T_{х, вых}$ теплоносителя вторичного контура с помощью изменения температуры U поверхности нагревателя аналогична рассмотренной выше и также содержит пять уровней управления.

Результаты численного моделирования

Численный эксперимент, проведенный на модели системы (1)–(14), предусматривал проверку работоспособности трех последовательно усложняющихся вариантов ее структуры, позволяющих получить наглядное сопоставление результативности каждого принимаемого решения.

На рис. 9 показаны переходные процессы в структуре системы, содержащей только контур регулирования температуры $T_{х, вых}$ вторичного теплоносителя на выходе теплообменника (см. также рис. 5).

Изменения $T_{х, вых}$ на рис. 9 удерживаются системой в заданных пределах 60...70 °С, однако ошибка регулирования при изменяющемся во времени возмущении не может быть принципиально устранена средствами рассматриваемого контура. Для подавления системой скоростной заводки (скоростного всплеска) возмущения $T_{х, вх}$ в структуре организован альтернативный канал ввода $T_{х, вх}$, вырабатывающий сигнал $w \dot{T}_{х, вх}$, пропорциональный скорости $\dot{T}_{х, вх}$ и вычитаемый из $T_{х, вых}$, тр на входе регулятора (см. рис. 5). Очевидно, что этот

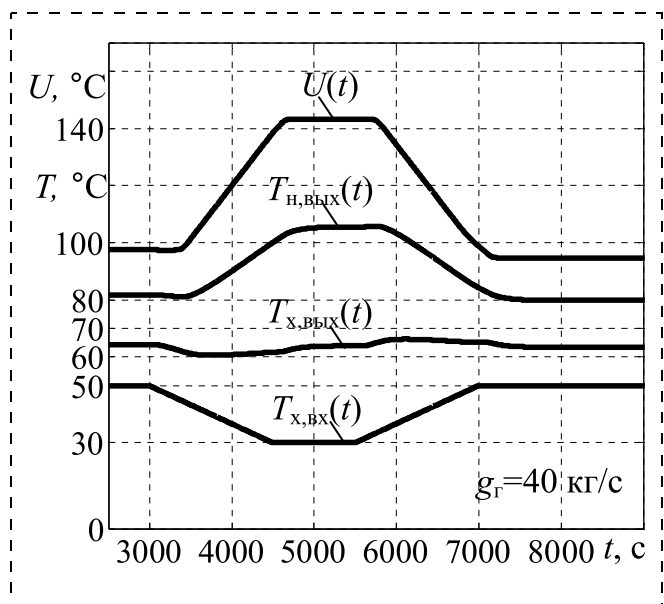


Рис. 9. Переходные процессы в системе с контуром регулирования $T_{х, вых}$

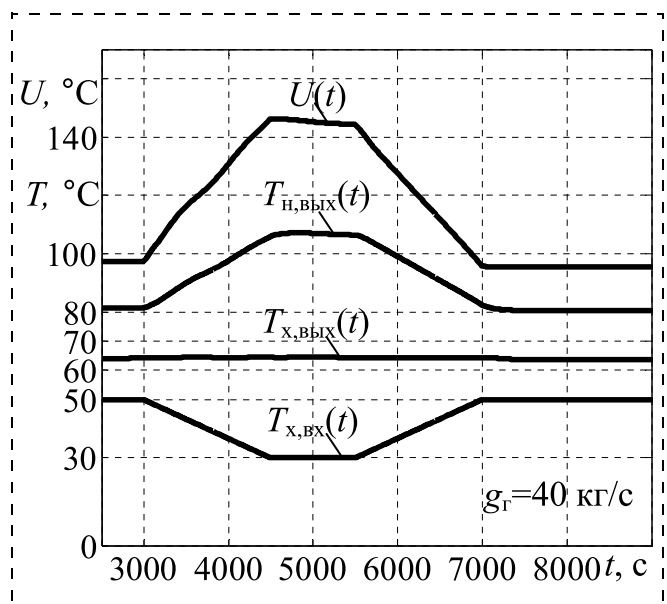


Рис. 10. Переходные процессы в системе с альтернативным каналом ввода возмущения

канал функционирует только в режимах с изменяющейся $T_{x, \text{вх}}$, т.е. когда $\dot{T}_{x, \text{вх}} \neq 0$.

Результат работы альтернативного канала показан на рис. 10 и подтверждает обоснованность его введения.

На рис. 10 (на интервале $t = 3000 \dots 4500$ с) можно заметить последовательную передачу управления между каналами регулятора по изменению наклона управляющего воздействия U в процессе отработки изменяющегося возмущения $T_{x, \text{вх}}$.

Третий вариант структуры предусматривает введение контура регулирования температуры $T_{n, \text{вых}}$ первичного теплоносителя на выходе нагревателя (см. рис. 5 и рис. 11).

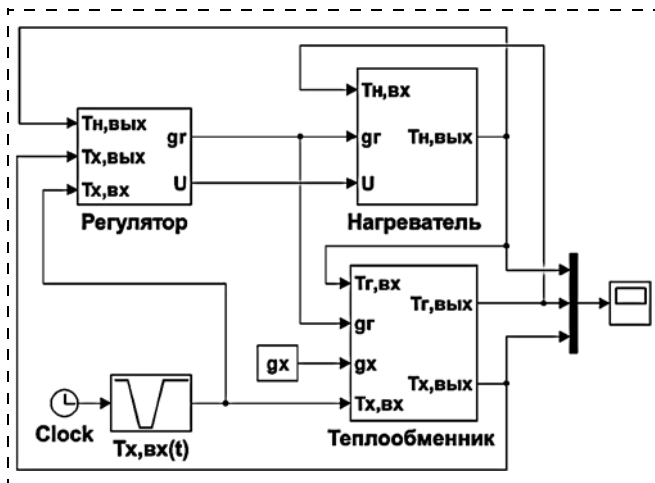


Рис. 11. Имитационная модель системы управления процессом теплообмена

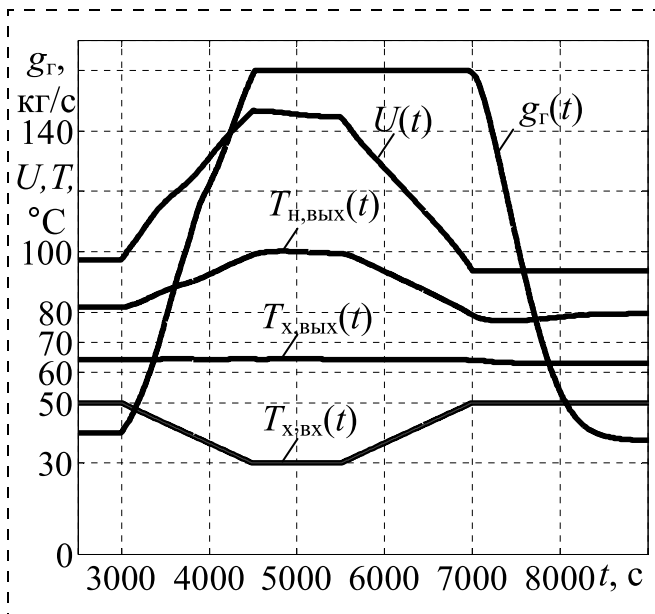


Рис. 12. Переходные процессы в системе с контуром регулирования $T_{n, \text{вых}}$

Необходимость создания этого контура следует из рис. 9 и 10, на которых видно, что значение $T_{n, \text{вых}}$ в процессе регулирования выходит за рекомендуемое максимальное значение $T_{n, \text{вых, макс}} = 100$ °С.

Переходные процессы в системе, объединяющей все три упомянутых выше варианта структуры (рис. 11), показаны на рис. 12.

Из рис. 12 можно заключить, что открытая динамическая система, построенная на основе принципов гомеостатического управления, позволяет полностью обеспечить требуемые показатели качества регулирования рассматриваемого процесса.

Обсуждение результатов

Обсудим результаты, которые были получены благодаря использованию принципов гомеостатического управления:

- многоуровневости обработки информации;
- модульности формирования управляющего решения;
- многообразия методов обработки и разделения функций подсистем.

Использование принципа многоуровневости выразилось в формировании n каналов регулирования по расходу g_r и температуре U с помощью соответствующего числа матриц перехода $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$, $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, n; n = 5$, формируемых независимо друг от друга, что позволило избавиться от необходимости синтеза единого универсального алгоритма управления, заменив его совокупностью простых локальных процедур, используемых в процессе управления при различных состояниях объекта — регулируемых величин $T_{x, \text{вых}}$ и $T_{n, \text{вых}}$. Взаимосвязь этих каналов управления образует иерархическую структуру по степени отклонения регулируемой величины от заданного значения (для $T_{x, \text{вых}}(t)$) или ее приближения к критическому значению (для $T_{n, \text{вых}}(t)$). Переключение иерархических уровней можно заметить на рис. 10 (см. комментарии к этому рисунку) и рис. 12, оно имеет ясный физический смысл: при нехватке ресурсов низкого уровня управления включается в работу более высокий иерархический уровень системы, обеспечивая в итоге требуемое качество регулирования. При этом переход к более высокому уровню иерархии (за счет соответствующего содержания матриц $M(\gamma_i \times \gamma_j, \alpha_r)$ в разных каналах) сопровождается нелинейным, упреждающим нарастанием компенсирующего управляющего воздействия. Биологическая природа и практическая значимость механизма нарастания компенсирующего воздействия подробно рассмотрена в работе [6].

Модульность формирования управляющего решения в каждом канале системы заключается, как это следует из (10)—(12), в том, что результирующее управление β определяется в результате объединения компонент $\mu_r(\Delta g_r)$ пяти управляющих модулей ($r = 1 \dots 5$), вклад каждой из которых устанавливается текущей мерой ν_r близости искомой

матрицы перехода $M(\gamma \times \gamma_{\text{тр}}, \beta)$ и соответствующих матриц каждого модуля. Использование принципа модульности при построении регулятора позволяет сформировать управление β в виде многомерной функции $\beta(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ (в общем случае, в виде n -мерного вектора), обеспечивающей высокую гибкость управления во всем пространстве текущих состояний объекта, в том числе и в нелинейных областях этого пространства.

Принцип многообразия методов обработки информации, в широком его понимании, реализуется, в первую очередь, путем построения в системе нескольких каналов управления с различными алгоритмами принятия решений в каждом канале. Кроме того, в рассматриваемом примере теплового процесса можно указать на введение в структуру системы канала управления по возмущающему воздействию $T_{x, \text{вх}}$ (см. рис. 5 и рис. 11), выступающего в качестве принципиальной альтернативы каналам регулирования по отклонению регулируемых величин. Эффективность введения альтернативного управления подтверждается сравнением качества стабилизации $T_{x, \text{вых}}(t)$ на рис. 9 и рис. 10. Полученный результат хорошо согласуется с применяемым в теории автоматического регулирования принципом двухканальности [19].

Разделение обрабатываемой в системе информации по функциональному признаку (разделение функций подсистем) опирается, как уже отмечалось, на биологические примеры предпочтительности специализированных приспособительных механизмов перед универсальными [9]. В задачах управления многомерными объектами этот принцип реализуется в стремлении обеспечить автономное регулирование выходных координат системы независимыми регуляторами, синтез которых, в силу их автономности, существенно упрощается [20, 21]. В частности, в рассмотренном примере подсистема регулирования температуры теплоносителя $T_{x, \text{вых}}$ вторичного контура функционирует в целях удовлетворения нужд потребителей, а подсистема температуры $T_{n, \text{вых}}$ теплоносителя первичного контура служит для предотвращения аварийных режимов в нагревателе. Как было показано, эти подсистемы реализованы на независимых регуляторах и обеспечивают требуемое качество управления процессом теплообмена одновременно по обеим координатам.

Методологическое единство изложенных выше принципов заключается в формировании и последующем гибком использовании альтернативных вариантов структуры системы управления и алгоритмов ее функционирования. Это единство позволяет объединить их под общим названием принципов многоальтернативности [8], составляющих инструмент практического синтеза систем гомеостатического управления.

На примере синтеза системы регулирования процесса теплообмена продемонстрировано решение задачи технической гомеостатики [6], методы, способы и приемы реализации которой включают в себя, в частности, принципы многоальтернативного управления, позволяющие целенаправленно осуществлять:

- построение многоуровневых регуляторов, в которых алгоритм работы каждого уровня формируется независимо от других уровней управления и включается в работу по мере отклонения системы от требуемого состояния, реализуя в системе свойство гомеостаза;
- модульность компонент результирующих управляющих воздействий. Многообразие значений этих воздействий порождается многообразием текущих вкладов каждой компоненты и обеспечивает гибкость управления в пространстве состояний объекта;
- введение в структуру системы дополнительных, альтернативных каналов ввода внешних воздействий, обеспечивающих требуемое качество регулирования в выбранных режимах работы системы;
- разделение функций регулирования различных координат системы и, как следствие, независимый, автономный синтез соответствующих подсистем управления.

Результаты численного моделирования системы управления тепловым процессом, построенной на основе указанных принципов, указывают на перспективность применения идей гомеостатического управления открытыми динамическими системами с существенной неопределенностью структуры и параметров.

Список литературы

1. Бергаланфи Л. фон. История и статус общей теории систем // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник. М.: Наука, 1973. С. 20—37.
2. Эшби У. Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. М.: Изд. иностр. лит., 1962. 397 с.
3. Новосельцев В. Н. Теория управления и биосистемы. Анализ сохранительных свойств. М.: Наука, 1978. 320 с.
4. Гомеостатика живых, технических, социальных и экологических систем / Под ред. Ю. М. Горского. Новосибирск: Наука, 1990. 350 с.
5. Филимонов Н. Б. Гомеостатические системы и автомат ограниченный состоянием управляемых динамических объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. № 1—2. С. 17—34.
6. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Автомат ограничений управляемых динамических процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 155—161.
7. Филимонов Н. Б. Проблема гомеостатического управления динамическими системами // Устойчивость и процессы управления. Матер. III междунар. конф. СПб.: Изд. дом Федоровой Г. В., 2015. С. 97—98.
8. Подвальный С. Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 48, № 2. С. 4—13.
9. Подвальный С. Л., Васильев Е. М. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы // Управление большими системами: сборник трудов. М.: ИПУ РАН. 2014. № 48. С. 6—58.

10. Подвальный С. Л., Васильев Е. М. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57, № 3. С. 4—8.

11. Александров А. Ю., Жабко А. П., Жабко И. А., Косов А. А. Исследование устойчивости и стабилизация нелинейных переключаемых механических систем на основе декомпозиции // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 12. С. 807—812.

12. Косов А. А. О построении стабилизирующего управления для одной механической системы с переключениями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12. С. 23—26.

13. Подвальный С. Л., Васильев Е. М. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 56, № 2.1. С. 169—173.

14. Подвальный С. Л., Васильев Е. М. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации // XII Всеросс. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН: труды. (Москва, 16—19 июня 2014 г.). М.: ИПУ РАН, 2014. С. 996—1007.

15. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М.: КомКнига, 2005. 432 с.

16. Васильев Е. М. Исследование критических режимов в системах управления теплообменом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 12.1. С. 69—72.

17. Самарский А. А., Вабищев П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

18. Деменков Н. П. Нечеткое управление в технических системах: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 200 с.

19. Петров Б. Н. Избранные труды. Т. 1. М.: Наука, 1983. 429 с.

20. Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А. Синтез автономных и связанных многомерных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 1. С. 13—20.

21. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Метод динамической коррекции и автономизация каналов управления в многосвязных системах на основе формализма линейно-квадратичной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 2—6.

Homeostatic Control of the Dynamic Systems on the Basis of the Fuzzy Controllers

E. M. Vasiljev, vgtu-aits@yandex.ru✉, A. S. Odnoshivkin, vgtu-aits@yandex.ru
Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russian Federation

Corresponding author: Vasiljev E. M., Ph. D., Associate Professor,
Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026, Russian Federation
e-mail: vgtu-aits@yandex.ru

Received on April 27, 2016

Accepted on May 12, 2016

The authors present the task of control with account of the significant uncertainty of the dynamic structures and non-stationary parameters of objects. Using the analogy between the task and the ways of functioning of the biological systems, one can conclude that it is possible to solve this problem on the basis of the homeostatic control. This technology combines the principles of a multilevel structure of the information control system, its modular structure and the division of each level. This possibility is demonstrated by the example of control of the process of a double-loop counterflow heat exchange, where the primary loop includes an operated heater and the secondary one is intended for a heat supply of the external end-users. By the temporal and spatial discretization of the process a mathematical model of the heat exchange in a different form was developed and imitated in MatLab. It demonstrates that implementation of those principles is advisable in the class of the fuzzy algorithms, which uses a composition of the local control in each subsystem. The multi-alternative control system of the process of the counterflow heat exchange is synthesized, wherein: we use a controller with five independent channels, which start by the distance of the rated state and ensure the property of homeostasis; an alternative channel of the input disturbance, which operates at a high-speed system, is implemented; an additional control loop of the primary coolant flow, which prevents critical temperature conditions in the heat exchanger is constructed. By a simulation model the quality indicators of the system are checked and the effectiveness of the multi-alternative principles is confirmed. The article ends with a discussion of the concrete practical results, obtained by multilevel processing of information in the system, modular formation of the control solution and variety of processing and separation methods of the subsystem function. Good prospects for use of the multi-alternative concept for the control systems with a fundamental indeterminacy of the structure and the parameters are confirmed.

Keywords: homeostatic control, concept of multi-alternative, hierarchical systems, modularity, separation of functions, fuzzy algorithms, thermal processes

For citation:

Vasiljev E. M., Odnoshivkin A. S. Homeostatic Control of the Dynamic Systems on the Basis of the Fuzzy Controllers, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 732—740.

DOI: 10.17587/mau.17.732-740

References

1. Bertalanfi L. fon. *Istorija i status obshhej teorii system* (History and Status of General Systems Theory), *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy*, Moscow, Nauka, 1973, pp. 20—37 (in Russian).

2. Ashby W. R. *Konstrukcija mozga. Proishozhdenie adaptivnogo povedenija* (Design for a brain. The origin of adaptive behavior), Moscow, Izd. inostr. lit., 1962, 397 p. (in Russian).

3. Novosel'cev V. N. *Teorija upravlenija i biosistemy. Analiz sohranitel'nyh svojstv* (Control theory and biosystems. Analysis preservative properties), Moscow, Nauka, 1978, 320 p. (in Russian).

4. Gorskiy Ju. M. ed. *Gomeostatika zhivyh, tehnikeskikh, social'nyh i jekologicheskikh sistem* (Homeostatics living, technical, social and environmental systems), Novosibirsk, Nauka, 1990, 350 p. (in Russian).

5. Filimonov N. B. *Gomeostaticheskie sistemy i avtomat ograničenijsostojanija upravljajemyh dinamičeskikh ob'ektov* (Homeostatic systems and automatic restrictions state-controlled dynamic objects), *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 1998, no. 1—2, pp. 17—34 (in Russian).

6. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *Avtomat ogranichenij upravljaemyh dinamicheskikh processov* (The automatic machine of restrictions of controlled dynamic processes), *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki*, 2013, no. 3 (140), pp. 155—161 (in Russian).
7. **Filimonov N. B.** *Problema gomeostatsicheskogo upravlenija dinamiche-skimi sistemami* (The problem of homeostatic control of dynamic systems), *Ustojchivost' i processy upravlenija. Proc. of III Internat. Conf.*, SPb., Izd. dom Fedorovoj G. V., 2015, pp. 97—98 (in Russian).
8. **Podvalny S. L.** *Mnogol'ternativnye sistemy: obzor i klassifikacija* (Multi-alternative system: A review and classification), *Sistemy Upravlenija i Informacionnye Tehnologii*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 4—13 (in Russian).
9. **Podvalny S. L., Vasiljev E. M.** A multi-alternative approach to control in open systems: origins, current state, and future prospects, *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 8, pp. 1471—1499.
10. **Podvalny S. L., Vasiljev E. M.** Evolutionary principles for construction of intellectual systems of multi-alternative control, *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 2, pp. 311—317.
11. **Aleksandrov A. Ju., Zhabko A. P., Zhabko I. A., Kosov A. A.** Stability Investigation and Stabilization of Nonlinear Switched Mechanical Systems via Decomposition, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 12, pp. 807—812 (in Russian).
12. **Kosov A. A.** Design of Stabilizing Control for One Switching Mechanical System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 12, pp. 23—26 (in Russian).
13. **Podvalny S. L., Vasiljev E. M., Barabanov V. F.** Models of Multi-Alternative Control and Decision-Making in Complex System, *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75, no. 10, pp. 1886—1891.
14. **Podvalny S. L., Vasiljev E. M.** *Intellektual'nye sistemy mnogol'ternativnogo upravlenija: principy postroenija i puti realizacii* (Intelligent multialternative control: principles and ways to implement), *XII Vseross. soveshhanie po problemam upravlenija VSPU-2014 Institut problem upravlenija im. V. A. Trapeznikova RAN* (XII All-Russian conference on Control. Institute of Control Sciences of a name V. A. Trapeznikov RAS: Proceedings of the Conference. (Moscow, 16—19 June 2014)), 2014, pp. 996—1007 (in Russian).
15. **Ashby W. R.** *Vvedenie v kibernetiku* (An Introduction to Cybernetics), Moscow, KomKniga, 2005, 432 p. (in Russian).
16. **Vasiljev E. M.** *Issledovanie kriticheskikh rezhimov v sistemah upravlenija teploobmenom* (Research in heat exchange critical regimes control systems), *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta*, 2012, vol. 8, no. 12.1, pp. 69—72 (In Russian).
17. **Samarskij A. A., Vabishhev P. N.** *Vychislitel'naja teploperedacha* (Computational heat transfer), Moscow, Editorial URSS, 2003, 784 p. (in Russian).
18. **Demenkov N. P.** *Nechjotkoe upravlenie v tehniceskikh sistemah: Uchebnoe posobie* (Fuzzy control in technical systems: Textbook), Moscow, Publishing house of MGTU im. N. Je. Baumana, 2005, 200 p. (in Russian).
19. **Petrov B. N.** *Izbrannye trudy. T. 1* (Selected works. Vol. 1), Moscow, Nauka, 1983, 429 p. (in Russian).
20. **Gajduk A. P., Plaksienko E.** A Synthesis of Separate and Coherent Multivariate Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 1, P. 13—20 (in Russian).
21. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Method of Dynamic Correction and Autonomization of Control Channels in Multiply Connected Systems on the Basis of Formalism of Linearly-Square Optimization, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 12, pp. 2—6 (in Russian).



29—31 мая 2017 г. в Санкт-Петербурге
на базе АО "Концерн "ЦНИИ Электроприбор" состоится

XXIV Санкт-Петербургская МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ (МКИНС 2017)



Ежегодная конференция стала традиционным местом обмена идеями ученых и инженеров всего мира в области навигации и управления движением.

Председатель программного комитета — Академик РАН проф. В. Г. Пешехонов

Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Микромеханические датчики и системы на их основе
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Альтернативные навигационные системы и датчики
- Системы управления, наведения и их элементы
- Интегрированные системы навигации и управления движением

В рамках каждого направления рассматриваются:

схемы построения и конструктивные особенности; методы и алгоритмы;
особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
испытания и метрология.

На конференции не рассматриваются вопросы, затрагивающие военно-техническое сотрудничество, разработки военных технологий и образцов вооружений и военной техники. Программный комитет считает полезным представление обзорных докладов и докладов молодых ученых (до 33 лет).

*Подробную информацию о конференции см. сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/icins2017/rindex>*