

16. Kureychik V.V., Kureychik V.M., Gladkov L.A., Sorokoletov P.V. Bionspirovannyye metody v optimizatsii [Inspirovannyye metody v optimizatsii]. Moscow: Fizmalit, 2009, 384 p.
17. Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Razbienie na osnove modelirovaniya adaptivnogo povedeniya biologicheskikh sistem [Partitioning based on simulation of ADAP-alternative behavior of biological systems], *Neyrokomp'yutery: razrabotka, primenenie* [Neurocomputers: Development, Application], 2010, No. 2, pp. 28-34.
18. Lebedev B.K., Lebedev V.B. Razmeshchenie na osnove metoda pchelinoy kolonii [Placement on the basis of the bee colony method], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 12-19.
19. Gladkov L.A. Gibridnyy geneticheskiy algoritm resheniya zadachi razmeshcheniya elementov SBIS s uchedom trassiruемости soedineniy [A hybrid genetic algorithm for solving the problem of placing of elements VLSI taking into account the traceability of compounds], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Vestnik of Rostov state University of Railways], 2011, No. 3, pp. 58-66.
20. Kureychik V.V., Bova V.V., Kureychik V.I. Kombinirovannyi poisk pri proektirovanii [Combined search in the design], *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii* [Educational Resources and Technology], 2014, No. 2 (5), pp. 90-94.
21. Kuliev E.V., Lezhebokov A.A. Issledovanie kharakteristik gibridnogo algoritma razmeshcheniya [Research parameters of hybrid algorithm for placement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 255-261.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Щеглов Сергей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: srg_sch@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер Некрасовский, 44; тел.: 88634371625; кафедра САПР; к.т.н.; доцент.

Shcheglov Sergey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: srg_sch@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371625; the department of computer aided design; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.87:681.51

Р.А. Нейдорф, М.Н.М. Мохсен, А.Р. Нейдорф

УНИФИКАЦИЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И СИНТЕЗА ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ*

Исследована проблема построения математических моделей процессов и аппаратов технологических систем, использующих жидкие среды при совместном протекании химических, массообменных, теплообменных и других процессов. Показано, что общность базовой модели накопления в любом технологическом объеме вещества или энергии, которые обобщены понятием субстанции, позволяет унифицировать построение моделей многих технологических объектов. Вводятся базовые переменные, обозначающие накапливаемые субстанции, аккумулирующие объемы и потоки обмена с другими объектами технологической системы. Унификация возможна при сосредоточенности параметров. Аппарат, характеризующийся единым объемом с протекающими технологическими процессами, представляется системой однотипных базовых дифференциальных уравнений баланса преобразуемых в нем субстанций. Они преобразуются в рабочие математические модели изменения переменных технологического состояния аппарата подстановкой вместо базовых переменных локальных математических моделей отдельных свойств исследуемого процесса. Эти модели выражаются через измеряемые переменные технологического состояния аппарата, а также через конструктивные, механические, физико-химические и другие параметры моделируемого технологического объекта. Анализируются структурные возмож-

* Работа выполнена в рамках индивидуального плана аспирантской подготовки.

ности управления такими объектами, и выявляются факторы, влияющие на его эффективность. К важнейшим из них отнесены существенная нелинейность, существенная связность переменных технологического состояния и возможность решать задачи синтеза законов управления процессами в общем накопителе на основе математических моделей невысокого порядка. На примере условного технологического объекта управления показывается принципиальная возможность осуществлять синтез унифицированных векторных законов координированного связанного управления технологическими аппаратами рассмотренного типа. Это показывает эффективность предложенной унификации их математического моделирования.

Технологический аппарат; математическая модель; закон сохранения; материальные и энергетические субстанции; материальные и энергетические потоки; уравнение баланса; система дифференциальных уравнений; нелинейность; связность; закон управления.

R.A. Neydorf, M.N.M. Mohsen, A.R. Neydorf

UNIFICATION PROBLEMS OF MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL OBJECTS AND SYNTHESIS OF TECHNOLOGICAL VARIABLES CONTROL LAWS

The problem of constructing mathematical models of processes and devices of technological systems, using liquid and gaseous media at a joint course of chemical, mass transfer, heat transfer and other processes. It is shown that the common base of the mathematical model any technological accumulation amount of matter or energy, which summarizes the concept of substance, it allows to unify the construction of the model of most technological objects. For this purpose we introduce the basic variables, indicating the accumulated substance, accumulating volumes and fluxes of exchange with other objects of the technological system. Unification is possible with lumped parameters. The device which is characterized by united volume of the proceeding technological processes is described by system of the one type basic differential equations of balance of the substances, which transform in him. They are converted to the working mathematical model of the variables of technological substitution state process vessel instead of the basic variables of local mathematical models of the individual properties of the studied process. These models are expressed through actual measured variables of technological state of the device, as well as through structural, mechanical, physical, chemical, and other technological parameters of the modeling object. It is analyzed the structural capabilities of such objects control, and the factors affecting its efficiency are defined. The most important of them are classified as a significant non-linearity, a substantial connection process variables and the ability to solve problems of the synthesis process control laws in the shared drive on the basis of mathematical models of a low order. On the example of conditional technological object of control a basic opportunity to perform synthesis of the normalized vector laws of coordinated control of technological devices of the considered type is shown. considered. This shows the effectiveness of the proposed unification of their mathematical modeling.

Process vessel; mathematical model; conservation law; material and energy substances; material and energy flows; balance equation; differential equations system; nonlinearity; connectivity; control law.

Введение. Основополагающие результаты по математическому моделированию технологических систем сформулированы в середине прошлого века. Большая заслуга в превращении методов моделирования в отдельную научную дисциплину принадлежит академику В.В. Кафарову и ученикам его школы [1], а также другим российским [2–4], и зарубежным [5–8] учеными. В этих и других работах разработаны фундаментальные принципы построения математических моделей (ММ), решены и решаются многие задачи моделирования химико-технологических процессов. В частности, известны работы, систематизирующие подходы к моделированию на основе понятий элементарных накопителей и потоков обмена [9, 10]. Они направлены на математическое описание систем, называемых "технологическими" [9]. К технологическим системам (ТЛС) относят производства химической, нефтеперерабаты-

вающей, пищевой, и др. отраслей промышленности. Они отличаются большой пространственной протяженностью, использованием жидких и газообразных сред, совместным протеканием химических, массо- и теплообменных и др. процессов [5–13]. Как ТЛС, так и составляющие их технологические объекты (ТО) разнообразны и сложны. Они описываются существенно нелинейными системами дифференциальных уравнений высоких порядков, что усложняет их анализ [11–14].

Автоматизация ТЛС возможна при наличии ММ процессов технологических преобразований сырья в продукт. Развитие методов их математического моделирования продолжается как в России, так и за рубежом [15–18]. Поэтому актуальными являются решение задачи унификации построения ММ ТО и разработка для них высокоэффективных законов управления [19, 20].

Постановка задачи исследования. В статье ставится и решается задача формализации подхода к построению ММ ТО ТЛС на основе базовых понятий, определяющих суть химико-технологических процессов. Ставится задача получить унифицированные структуры ММ для ТО ТЛС, и показать использование этих структур ММ для синтеза унифицированных законов управления такими ТО.

Методологический базис построения математических моделей. Возможность априорного построения ММ опирается на фундаментальные законы сохранения, которым подчиняются все исследуемые процессы. Для ТО законы сохранения проявляются в обменном балансе вещества или энергии в системе при обмене с окружающей средой [9, 10]. Другими словами: разность прихода и ухода любой субстанции равна изменению в ТО ее запаса. Поэтому рассматриваемый подход к моделированию ТО основывается на ММ закона сохранения. Она представляется дифференциальным уравнением (ДУ) баланса неустановившегося процесса накопления. Левая часть этого ДУ описывает накопительные свойства ТО, а правая – влияние ТЛС как внешней среды на накопления субстанции в ТО. Модель процесса накопления представляет собой ДУ первого порядка

$$dQ^{ac}(t)/dt = q^{in}(t) - q^{ou}(t), \quad (1)$$

где $Q^{ac}(t)$ – изменяющийся во времени t запас накопленной в ТО некоторой субстанции, а $q^{in}(t) = dQ^{in}(t)/dt$ и $q^{ou}(t) = dQ^{ou}(t)/dt$ – суммарные потоки вводимой $Q^{in}(t)$ и выводимой $Q^{ou}(t)$ субстанции.

Уравнение (1) представляет собой универсальную динамическую основу ММ, описывая самые общие свойства ТО рассматриваемого типа [9, 10]. Компоненты: приход, расход и накопление – это его обязательные универсальные составляющие. Следовательно, все ТО рассматриваемого типа описываются единым базисным ДУ (1). Индивидуальность каждой ММ определяется моделями ее составляющих. Если ТО характеризуется одинаковой плотностью распределения накопленной субстанции $Q^{ac}(t)$ по объему, то уравнение (1) является уравнением в полных производных [9, 10]. Если же распределение субстанции по объему объекта является неоднородным и $Q^{ac} = Q^{ac}(t, x)$, то (1) вырождается в ДУ в частных производных, что существенно усложняет ММ.

В статье исследуется задача построения ММ ТО, когда приемлема гипотеза об однородности распределения накопленной субстанции, т.е. рассматриваются, фактически, ТО с сосредоточенными параметрами. Унификации процесса их моделирования посвящено исследование.

Анализ уравнения (1) показывает, что методика аналитического построения ММ ТО с сосредоточенными параметрами может основываться на таких фундаментальных понятиях как субстанция, накопитель, поток [10]. В этом случае можно абстрагироваться от конкретного моделируемого ТО и получить ММ динами-

ческой основы процессов, протекающих в условном технологическом объекте. В реальном ТО величины Q и q выражаются через конструктивные, технологические или физические переменные, параметры и коэффициенты с использованием локально выведенных ММ.

Накопительная математическая модель технологического объекта. Накапливаемые в ТО формы вещества или энергии можно объединить понятием субстанции [10], при этом объектами накопления в ТО будут различные субстанции, а субъектами их накопления будут собственно ТО. Для полного системного анализа ММ ТО и формализации процесса ее построения необходимо рассмотреть локальные математические модели для составляющих уравнения (1): **субстанции, накопителя и потока**.

Понятие субстанции обобщает суть накапливаемых вещества или энергии в моделируемом ТО. У субстанции, будь то вещество или энергия, обычно существует некоторый материальный носитель. Он может характеризоваться либо массой, либо объемом, в котором она распределена. Для определенности далее рассматривается распределение субстанции в объеме V , которое при известной механической плотности вещества-носителя всегда может быть переведено в эквивалентную массу. Поэтому будем считать, что количественно накапливаемая или переносимая в процессе функционирования ТО S -я субстанция характеризуется базовой переменной – **плотностью** ее распределения в носителе. При равномерном распределении некоторого количества субстанции Q_s по объему носителя V , ее плотность $\rho_s(t)$ определится формулой:

$$\rho_s(t) = \frac{Q_s(t)}{V(t)}, \quad (2)$$

В (2) все величины считаются переменными во времени, однако в частных случаях параметр V может быть и константой.

Накопленная в ТО технологическая среда-носитель характеризуется определенной **плотностью субстанции** $\rho_s^V(t)$. Поэтому запас субстанции S в аппарате – $Q_V^{ac}(t)$ определятся, с учетом (2), через параметр V_ρ^{ac} формулой:

$$Q_V^{ac}(t) = V_\rho^{ac}(t) \rho_s^V(t), \quad (3)$$

где $s = \overline{1, n}$, где n – количество субстанций, обеспечивающих процесс в ТО.

Изменение накопления, описываемое в (1) формулой (3) происходит за счет процессов переноса субстанции S потоком материальной среды. Поэтому в нем необходимо выразить и учесть текущую плотность субстанции $\rho_s(t)$, т.е. потоки субстанции $q_s^{in}(t)$ и $q_s^{ou}(t)$ необходимо выразить через **физические потоки** технологической среды которой обменивается аппарат: $g_i^{in}(t)$ и $g_j^{ou}(t)$, где $i = \overline{1, I}$ и $j = \overline{1, J}$ – условные номера входных и выходных потоков моделируемого ТО. Эти потоки переносят субстанцию S с плотностями $\rho_{si}^{in}(t)$ и $\rho_{sj}^{ou}(t)$ от источников этих потоков. Следовательно, потоки субстанций в ДУ (1) выразятся формулами:

$$\left. \begin{aligned} q^{in}(t) &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t); & (a) \\ q^{ou}(t) &= \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t). & (b) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, для технологического процесса, протекающего в аппарате с участием определенного его технологией количества субстанций n , подстановкой в уравнение (1) формул (3) и (4 а, б) с учетом (2), это уравнение преобразуется в систему n ДУ следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} V_{\rho}^{ac}(t) \cdot \frac{d\rho_s^v(t)}{dt} + \rho_s^v(t) \cdot \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t); \\ s &= \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

При условии $V_{\rho}^{ac}(t) = const$, т.е. когда процессы протекают в замкнутом и полностью заполненном объеме аппарата, во всех уравнениях системы ДУ (5) производная от $V_{\rho}^{ac}(t)$ равна нулю. В этом частном случае уравнения этой системы упрощаются и приводятся к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\rho_s^v(t)}{dt} &= \frac{1}{V_{\rho}^{ac}(t)} \left[\sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{si}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{sj}^{ou}(t) \right]; \\ s &= \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При $V_{\rho}^{ac}(t) = var$, когда аппарат имеет свободный уровень, в системе n уравнений (5) число переменных технологического состояния (ПТС) ТО оказывается равным $n + 1$. В этом случае целесообразно одной из субстанций процесса считать саму технологическую среду. При этом в формуле (2) появится «первая субстанция» $Q_V^{ac}(t) = V_{\rho}^{ac}(t)$, причем её плотность $\rho_1(t) = 1$. Тогда в первом уравнении (5) $d\rho_1(t)/dt = 0$, и система ДУ (5) приведет к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{li}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{lj}^{ou}(t); \\ \frac{d\rho_s^v(t)}{dt} &= \\ &= \frac{1}{V_{\rho}^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{si}^{in}(t) - \rho_{li}(t) \rho_s^v(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{sj}^{ou}(t) - \rho_{lj}(t) \rho_s^v(t)] \right\}; \\ s &= \overline{2, n}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Нелинейные функции, связывающие переменные ММ, отражают свойства ТО, как объектов управления. Эти вопросы обсуждаются ниже.

Нелинейность математических моделей технологических объектов. Простота накопительных ММ ТО (6), (7) объясняется их общностью. Любая конкретизация сути математических моделей резко усложняет их [9, 14]. Например, накопление вещества определяется произведением объема и концентрации, а тепла - произведением массы, теплоемкости и температуры и т.п. Когда в (3) и $V^{ac}(t)$, и $\rho_1(t)$ являются переменными, то наличие производных как от $V^{ac}(t)$, так и от $\rho_1(t)$ структурно усложняет модель. Если на объем накопления влияют другие ПТС, то в левой части ДУ (6) или (7) может сформироваться очень сложное выражение.

Потоки обмена субстанций между ТО и другими аппаратами ТЛС, как видно из формул (4), также являются мультипликативными. Они задаются произведениями объемов $g_i^{in}(t)$ или $g_j^{ou}(t)$ на соответствующие концентрации, или же масс на теплоемкость и температуру и т.п. В результате и в правую часть ДУ (6) или (7) попадают сложные мультипликативные нелинейные функции.

Влияние ПТС и входных воздействий на переменные $V^{ac}(t)$ и $\rho_1(t)$, входящие в (6) и (7), описываются, зачастую, еще более сложными, нелинейными выражениями. Зависимость кинетической энергии потока в трубопроводе от его скорости, потери энергии в нем, закон действующих масс для зависимости скорости химической реакции от концентраций реагентов выражаются степенными функциями: $K(t) = M(t)v(t)^2/2$, $v_r(c,t) = k_0 c_a^{\lambda_a}(t)c_b^{\lambda_b}(t)$. Здесь $M(t)$ – масса потока в трубопроводе; k_0 – константа скорости реакции, $c_a(t)$, $c_b(t)$ – концентрации реагентов, λ_a , λ_b – стехиометрические коэффициенты реакции. Зависимость скорости химической реакции от ПТС включает несколько нелинейных функций:

$$w_p(t) = k_0 \exp\left(\frac{E(\theta, p)}{R(\theta, p) \cdot \theta(t)}\right) c_a^{\lambda_a}(t) c_b^{\lambda_b}(t),$$

где E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, p – давление.

Достаточно существенна даже в первом приближении нелинейность расхода газа или жидкости через регулирующий орган:

$$G(t) = \alpha(t) \text{sign}[p_1(t) - p_2(t)] \sqrt{|p_1(t) - p_2(t)|},$$

где $\alpha(t)$ – пропускная способность регулирующего органа, $p_1(t)$, $p_2(t)$ – давления на входе и выходе.

Порядок и связность математических моделей ТО. Разработка ММ (6) и (7) исследуемых ТО показала, что порядок их обобщенной векторной формы строго определен количеством $I + J$ субстанций, участвующих в ТП объекта. Анализ структур развернутых в скалярную систему уравнений моделей (6) и (7) показывает высокую внутреннюю связность их переменных, как ТПС, так и, в особенности, по каналам внешнего воздействия на ТО, которое в ТЛС осуществляется, преимущественно, через материальные потоки $g_i^{in}(t)$ и $g_j^{ou}(t)$.

На примере системы скалярных ДУ, получаемых развертыванием (7)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_p^{ac}(t)}{dt} &= \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) \rho_{1i}^{in}(t) - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) \rho_{1j}^{ou}(t); \\ \frac{d\rho_2^V(t)}{dt} &= \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{2i}^{in}(t) - \rho_{1i}^{in}(t) \rho_2^V(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{2j}^{ou}(t) - \rho_{1j}^{ou}(t) \rho_2^V(t)] \right\}; \\ &\vdots \\ \frac{d\rho_n^V(t)}{dt} &= \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left\{ \sum_{i=1}^I g_i^{in}(t) [\rho_{ni}^{in}(t) - \rho_{1i}^{in}(t) \rho_n^V(t)] - \sum_{j=1}^J g_j^{ou}(t) [\rho_{nj}^{ou}(t) - \rho_{1j}^{ou}(t) \rho_n^V(t)] \right\}, \end{aligned} \right\} (8)$$

хорошо видно, что переменный объем накопителя ТО влияет на изменение всех ПТС, а на изменение запаса технологической среды влияют все потоки $g_i^{in}(t)$ и $g_j^{ou}(t)$.

Накопительная плотность каждой субстанции $\rho_s(t)$ может влиять и на скорость ее накопления. Кроме того, на изменение любой субстанции влияют входящие и выходящие потоки, которые её переносят, т.е. те потоки, которые имеют в правых частях соответствующих скалярных ДУ в (8) ненулевые множители $\rho_{si}(t)$ или $\rho_{sj}(t)$.

Выявленные структурные свойства ММ ТО влияют на возможности разработки законов управления. Эта проблема рассматривается далее на примере.

Пример синтеза закона управления условным технологическим объектом с сильно связанными и нелинейными математическими моделями. Рассмотрим условный ТО со свободно меняющимся объемом и тремя накапливаемыми в нем разнородными субстанциями: самым объемом накапливаемой технологической среды с плотностью субстанции $\rho_1^V(t) = 1$, и двумя материальными субстанциями с плотностями субстанций $\rho_2(t)$ и $\rho_3(t)$. Аппарат имеет три входящих $g_1^{in}(t)$, $g_2^{in}(t)$ и $g_3^{in}(t)$ потока и один выходящий поток $g_1^{ou}(t)$. Первый поток, как растворитель, имеет нулевую плотность обеих субстанций, т.е. $\rho_{21}^{in}(t) = \rho_{31}^{in}(t) = 0$, а второй и третий характеризуются плотностями $\rho_{22}^{in}(t)$, $\rho_{33}^{in}(t)$ и $\rho_{23}^{in}(t) = \rho_{32}^{in}(t) = 0$, соответственно. Плотность первой объемной субстанции у всех потоков, естественно, одинакова: $\rho_{11}^{in}(t) = \rho_{12}^{in}(t) = \rho_{13}^{in}(t) = \rho_{11}^{ou}(t) = 1$. Аппарат снабжен эффективной мешалкой. Поэтому плотность субстанций в выходном потоке $\rho_{21}^{ou}(t) = \rho_2(t)$ и $\rho_{31}^{ou}(t) = \rho_3(t)$. Подставляя соответствующие условному ТО переменные и константы в универсальную ММ (8) и преобразуя, получим следующую систему ДУ:

$$\frac{dV_p^{ac}(t)}{dt} = g_1^{in}(t) + g_2^{in}(t)\rho_{12}^{in}(t) + g_3^{in}(t)\rho_{13}^{in}(t) - g_1^{ou}(t); \quad (a) \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_2^V(t)}{dt} = \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \left[g_2^{in}(t)\rho_{22}^{in}(t) - \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_2^V(t) \right]; \quad (b)$$

$$\frac{d\rho_3^V(t)}{dt} = \frac{1}{V_p^{ac}(t)} \cdot \left[g_3^{in}(t)\rho_{33}^{in}(t) - \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_3^V(t) \right]. \quad (c)$$

Как видно из конкретной структуры ММ условного ТО, рассматриваемого в статье типа, в ней присутствуют все особенности, рассмотренные в предыдущем пункте. Мультипликативные нелинейности правых частей всех уравнений (9), выражены в операциях перемножения входных воздействий на плотности субстанций. Кроме того, в уравнениях (9 a, b) присутствует операция деления на переменную $V_p^{ac}(t)$, которая при переходе к рабочей ММ выражается через уровень, что существенно влияет на динамику управления ПТС [10, 19–20]. Кроме того, нелинейное алгебраическое взаимодействие ПТС ТО и внешних воздействий обуславливают высокую степень связности всех переменных управляемого ТП.

Основная особенность ММ (9) состоит в том, что все ПТС ТО напрямую зависят от входных потоков $g_1^{in}(t)$, $g_2^{in}(t)$ и $g_3^{in}(t)$. Причем от выходного потока непосредственно зависит только накопление среды в ТО (уровень). Это свойство полинакопительной технологической структуры типичных ТО делает нерациональными и неэффективными традиционные одноконтурные системы автоматизации ТП. Естественными управляющими воздействиями в таких ТО являются входные потоки, поэтому несвязанное с другими потоками управление любым потоком приводит к возмущенным переходным процессам в каналах управления остальными потоками.

В связи с этим авторами предложен и развит в ряде работ [20, 21] подход к решению задачи синтеза единого векторного закона управления (ЗУ), обеспечивающего согласованные управляющие воздействия на все потоки ТО при управле-

нии как одной, так и несколькими ПТС одновременно. Сущность этого подхода сводится к использованию двух, уже доказавших свою состоятельность подходов к синтезу законов управления (ЗУ) для систем автоматического управления: использование для синтеза так называемых желаемых (или эталонных) ММ САУ, и метода отождествления высших производных [9]. Эффективному применению этих подходов способствуют структурные свойства унифицированной ММ ТО: она представлена системой ДУ в форме Коши и характеризуется наличием управляющих воздействий во всех ДУ системы. Это позволяет несложно получать векторный ЗУ согласованного управления ТО в целом, т.е. управления всем вектором ПТС ТО.

Пусть желаемые свойства САУ условным ТО с ММ (9) заданы системой

$$\begin{aligned} \frac{dV_{\rho}^{ac}(t)}{dt} &= f_1(z_1, V_{\rho}^{ac}, G, t); & (a) \\ \frac{d\rho_2^V(t)}{dt} &= f_2(z_2, \rho_2^V, R, G, t); & (b) \\ \frac{d\rho_3^V(t)}{dt} &= f_3(z_3, \rho_3^V, R, G, t), & (c) \end{aligned} \quad (10)$$

где $z_i(t)$ – задания на текущие значения ПТС; $G(t)$ и $R(t)$ – векторы входных потоков и ПТС; нелинейные функции $f_i(\dots)$ выбраны в соответствии с требованиями технологии ТО и устойчивости системы ДУ (10).

Естественными для описанного условного ТО управляющими воздействиями следует выбрать $g_1^{in}(t)$, $g_2^{in}(t)$ и $g_3^{in}(t)$. Тогда векторный ЗУ ТО, полученный отождествлением производных будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} g_1^{in}(t) &= f_1(z_1, V_{\rho}^{ac}, G, t) - g_2^{in}(t)\rho_{12}^{in}(t) - g_3^{in}(t)\rho_{13}^{in}(t) + g_1^{ou}(t); & (a) \\ g_2^{in}(t) &= \frac{1}{\rho_{22}^{in}(t)} \left[V_{\rho}^{ac}(t) f_2(z_2, \rho_2^V, R, G, t) + \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_2^V(t) \right]; & (b) \\ g_3^{in}(t) &= \frac{1}{\rho_{22}^{in}(t)} \left[V_{\rho}^{ac}(t) f_3(z_3, \rho_3^V, R, G, t) + \sum_{i=1}^3 g_i^{in}(t)\rho_3^V(t) \right]. & (c) \end{aligned} \quad (11)$$

Векторные ЗУ, полученные по типу (11) синтезировались и исследовались в работах [19, 20]. Компьютерное моделирование показало, что они обладают синхронностью воздействия на ТО и исключают переходные процессы по связанным каналам управления ТПС.

Заключение. Формализация подхода к построению математических моделей технологических объектов на основе общих понятий субстанции, накопителей и потоков позволяет унифицировать формы моделей для ТО с сосредоточенными параметрами любой сложности. На их основе формализуется и процедура синтеза унифицированных законов управления ими. Этот результат может послужить методологической основой для создания САПР математических моделей и систем автоматического управления объектами технологических систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: Энтропийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии. – М.: Наука, 1988. – 367 с.
2. Гумеров Ас.М., Валеев Н.Н., Гумеров Аз.М., Емельянов В.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие. – Казань, КГТУ, 2006. – 216 с.

3. *Тихонов В.А., Лановецкий, С.В., Косвинцев О.К.* Моделирование химико-технологических систем: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Березниковского филиала Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 61 с.
4. *Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А.* Математическое моделирование химико-технологических процессов: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. – 135 с.
5. *Roffel B., Betlem B.* Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction. – England [etc.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. – 560 p.
6. *White R.E., Subramanian V.R.* Computational Methods in Chemical Engineering with Maple. – Berlin [etc.]: Springer, 2010. – 860 p.
7. *Rice R.G., Duong D.Do.* Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers. – New Jersey [etc.]: Wiley, 2012. – 397 p.
8. *Banerjee S.* Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications. – Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2014. – 276 p.
9. *Нейдорф Р.А., Соловей Н.С.* Теория автоматического управления в технологических системах: учеб. пособие. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. – 212 с.
10. *Мохсен М.Н.М.* Алгоритм формализованного построения математических моделей технологических процессов на основе обобщенного уравнения накопления // Системный анализ, управление и обработка информации: Сб. тр. VI Междунар. науч. семинара, 19-24 окт. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2015. – С. 56-61. – Режим доступа: <http://www.ntb.donstu.ru/content/2015421>.
11. *Smith R.* Chemical process Design and Integration. – West Sussex [etc.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 687 p.
12. *Cinar A., Palazoglu A., Kayihan F.* Chemical process performance evaluation. – Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2007. – 310 p.
13. *Buzzi-Ferraris G., Manenti F.* Nonlinear Systems and Optimization for the Chemical Engineer: Solving Numerical Problems. – Weinheim, Germany: Wiley, 2014. – 524 p.
14. *Бородин И.Ф., Судник К.А.* Автоматизация технологических процессов. – М.: КолосС, 2004. – 344 с.
15. *Altmann W.* Practical Process Control for Engineers and Technicians. – Amsterdam [etc.]: Elsevier-Newnes, 2005. – 304 p.
16. *Харазов В.Г.* Интегрированные системы управления технологическими процессами: методическое пособие. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с.
17. *Hollender M.* Collaborative Process Automation Systems. – [S. l.: s. n.], 2010. – 408 p.
18. *Мохсен М.Н.М., Нейдорф Р.А.* Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru>.
19. *Мохсен М.Н.М., Нейдорф Р.А.* Нелинейная векторная квазиоптимизация управления производственным процессом при объектно обусловленной динамической связности переменных технологического состояния // Научное обозрение. – 2016. – № 1. – С. 266-279.
20. *Нейдорф Р.А., Мохсен М.Н.М.* Автоматическая система взаимно инвариантного векторного управления переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора // Вестник ДГТУ. – 2016. – Т. 16, № 1 (84). – С. 143-153.

REFERENCES

1. *Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Kol'tsova E.M.* Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii: Entropiynyy i variatsionnyy metody neravnesnoy termodinamiki v zadachakh khimicheskoy tekhnologii [System analysis of processes of chemical technology: Entropy and variational methods of nonequilibrium thermodynamics to the problems of chemical engineering]. Moscow: Nauka, 1988, 367 p.
2. *Gumerov As.M., Valeev N.N., Gumerov Az.M., Emel'yanov V.M.* Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: ucheb. posobie [Mathematical modeling of chemical-technological processes: teaching medium]. Kazan', KGTU, 2006, 216 p.
3. *Tikhonov V.A., Lanovetskiy, S.V., Kosvintsev O.K.* Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh sistem: ucheb. posobie [Simulation of chemical processes: teaching medium]. Perm': Izd-vo Berznikovskogo filiala Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2012, 61 p.
4. *Uшева N.V., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А.* Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: ucheb. posobie [Mathematical modeling of chemical-technological processes: teaching medium]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2014, 135 p.

5. *Roffel B., Betlem B.* Process Dynamics and Control: Modeling for Control and Prediction. England [etc.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. – 560 p.
6. *White R.E., Subramanian V.R.* Computational Methods in Chemical Engineering with Maple. Berlin [etc.]: Springer, 2010, 860 p.
7. *Rice R.G., Duong D.Do.* Applied Mathematics and Modeling for Chemical Engineers. New Jersey [etc.]: Wiley, 2012, 397 p.
8. *Banerjee S.* Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications. Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2014, 276 p.
9. *Neydorf R.A., Solovey N.S.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v tekhnologicheskikh sistemakh: ucheb. posobie [Automatic Control Theory in technological systems: teaching medium]. Ukhta: Institut upravleniya, informatsii i biznesa, 2005, 212 p.
10. *Mokhsen M.N.M.* Algoritm formalizovannogo postroyeniya matematicheskikh modeley tekhnologicheskikh protsessov na osnove obobshchennogo uravneniya nakopleniya [The formalized algorithm of construction of mathematical models of technological processes on the basis of generalized equation of accumulation], *Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii: Sb. tr. VI Mezhdunar. nauch. seminar, 19-24 okt.* [System analysis, management and processing information: collection of works: VI Int. Sci. Sem, 19-24 Oct.]. Rostov-on-Don: DGTU, 2015, S. 56-61. Available at: <http://www.ntb.donstu.ru/content/2015421>.
11. *Smith R.* Chemical process Design and Integration. West Sussex [etc.]: John Wiley & Sons Ltd, 2005, 687 p.
12. *Cinar A., Palazoglu A., Kayihan F.* Chemical process performance evaluation. Boca Raton [etc.]: CRC Press, 2007, 310 p.
13. *Buzzi-Ferraris G., Manenti F.* Nonlinear Systems and Optimization for the Chemical Engineer: Solving Numerical Problems. Weinheim, Germany: Wiley, 2014, 524 p.
14. *Borodin I.F., Sudnik K.A.* Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov [Automation of technological processes]. Moscow: KolosS, 2004, 344 p.
15. *Altmann W.* Practical Process Control for Engineers and Technicians. Amsterdam [etc.]: Elsevier-Newnes, 2005, 304 p.
16. *Kharazov V.G.* Integrirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami: metodicheskoe posobie [Integrated systems of control of technological processes: a Methodological guide]. St. Petersburg: Professiya, 2009, 592 p.
17. *Hollender M.* Collaborative Process Automation Systems. [S. l.: s. n.], 2010, 408 p.
18. *Mokhsen M.N.M., Neydorf R.A.* Sintez zakonov kvazioptimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi ob'ektami pervogo poryadka [Synthesis of laws of quasioptimal control of technological objects of the first order], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2015, No. 4, Available at: <http://ivdon.ru>.
19. *Mokhsen M.N.M., Neydorf R.A.* Nelineynaya vektornaya kvazioptimizatsiya upravleniya proizvodstvennym protsessom pri ob'ektno obuslovlennoy dinamicheskoy svyaznosti peremennykh tekhnologicheskogo sostoyaniya [Nonlinear vector quasioptimal process control in an object due to dynamic connectivity variables technological status], *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2016, No. 1, pp. 266-279.
20. *Neydorf R.A., Mokhsen M.N.M.* Avtomaticheskaya sistema vzaimno invariantnogo vektornogo upravleniya peremennymi tekhnologicheskogo sostoyaniya apparata prigotovleniya rastvora [Automatic system of mutually invariant vector control variable technological status of the device preparation of solution], *Vestnik DGTU* [Vestnik of DSTU], 2016, Vol. 16, No. 1 (84), pp. 143-153.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Е.И. Фандеев.

Нейдорф Рудольф Анатольевич – Донской государственный технический университет; e-mail: ran_pro@mail.ru; 344010, г. Ростов-на-Дону, ул. Гагарина, 1; тел.: +79034722292; д.т.н., профессор.

Нейдорф Анна Рудольфовна – e-mail: neydan@yandex.ru; тел.: 88632738427; к.ф.н.; доцент.

Мохсен Мохаммед Неама Мохсен – e-mail: Mohammed.naima@gmail.com; 344000, г. Ростов-на-Дону, пер. Университетский, 133, кв. 101; тел.: 89888938840; аспирант.

Neydorf Rudolf Anatolyevich – Don State Technical University; e-mail: ran_pro@mail.ru; 1, Gagarin street, Rostov-on-Don, 344010, Russia; phone: +79034722292; dr. of eng. sc.; professor.

Neydorf Anna Rudolfovna – e-mail: neydan@yandex.ru; phone: +78632738427; dr. of phil. sc.; associate professor.

Mohsen Mohammed Neamah Mohsen – e-mail: Mohammed.naima@gmail.com; 133, Universitetskiy, ap. 101, Rostov-on-Don, 344048, Russian; phone +79888938840; the department software of computers and automated systems; postgraduate student.

УДК 519.71

Н.П. Воронова, С.М. Ковалев, А.Н. Шабельников

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЙ НЕЧЕТКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Традиционные подходы к управлению сложными динамическими объектами в условиях неопределенности опираются на их аналитические модели, представленные в виде дифференциальных или разностных уравнений. Однако, для слабо формализованных объектов, характеризующихся наличием множества НЕ-факторов, построение аналитических моделей не представляется возможным, поэтому предпочтение отдают интеллектуальным моделям, основанным на знаниях, важный класс которых составляют нечеткие динамические системы. В настоящей статье рассматривается решение основных задач, связанных с идентификацией, прогнозированием и оцениванием состояний НДС, описывающих поведение слабо формализуемых динамических объектов. Рассматривается новый подход к оцениванию состояний и идентификации параметров нечетких динамических систем, в основу рассматриваемого подхода положена адаптивная сетевая модель вычисления нечетких априорных и апостериорных оценок переменных состояния системы в смежные моменты времени и оптимизация параметров модели с использованием модифицированного симплексного алгоритма. Предложенный метод параметрической идентификации обладает также рядом принципиально новых свойств, к числу которых относится принципиальная возможность интеграции в систему эмпирических экспертных знаний, более высокий по сравнению с традиционными методами уровень потенциальной точности идентификации параметров модели за счет возможности использования обобщенных нечетких критериев оптимальности, а также возможность идентификации параметров модели в реальном масштабе времени за счет небольшого числа итераций, требующихся для оценки оптимальных значений параметров. Рассматривается пример оптимального оценивания параметров нечеткой динамической системы и приводятся результаты экспериментов. Экспериментальная проверка показала, что в большинстве случаев найденные на основе разработанного симплексного алгоритма оценки идентифицируемых параметров для широкого круга нечетких динамических систем типа Сугено отличаются от истинных значений не более чем на 10 %.

Нечеткая динамическая система; условная функция принадлежности; априорное нечеткое распределение; апостериорное нечеткое распределение; адаптивная сетевая модель; параметрическая идентификация.

N.P. Voronova, S.M. Kovalev A.N. Shabelnikov

IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF STATES FOR FUZZY DYNAMICAL SYSTEMS

Conventional approaches to the control of complex dynamical objects in uncertainties are based on analytical models presented in form of differential and difference equations. However, the construction of analytical models is impossible for semi-formalized objects, when various non-factors are occurred. Because of this fact, intelligent models based on human expert knowledges are most preferable ones. Among these models, fuzzy dynamical systems play an important role. The paper