УДК 517.977.1

Сотникова М.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Применение прогнозирующего управления для оптимизации динамических процессов в заданном диапазоне

Аннотация

Рассматривается задача цифрового управления контролируемыми переменными динамического процесса с удержанием их в заданном диапазоне. Предполагается, что изменение переменных внутри диапазона может быть произвольным, но значения переменных должны оставаться внутри установленных границ. При этом, если все ограничения соблюдаются, то управление должно быть либо выключено, либо иметь как можно меньшую интенсивность. Данная постановка задачи требует разработки специальных методов синтеза законов управления, отличных от традиционных подходов, в которых цель управления задается командным сигналом.
Выполняется формализованная постановка задачи синтеза управления для нелинейной модели объекта, заданной в дискретном времени, с учетом ограничений на управляющий сигнал. Предлагается метод синтеза цифрового закона управления, базирующийся на применении прогнозирующих моделей в контуре обратной связи. Поставленная цель управления объектом достигается с помощью введения квадратичного функционала качества, включающего штраф за нарушение контролируемыми переменными заданного диапазона. Кроме того, этот функционал характеризует интенсивность работы управления и позволяет регулировать энергетические затраты с помощью весового множителя. Показано, что реализация закона управления в режиме реального времени в общем случае сводится к решению задачи нелинейного программирования на каждом такте дискретного времени. Эффективность разработанного подхода иллюстрируется примером управления процессом переработки нефти в ректификационной колонне.

Ключевые слова

Цифровое управление, прогнозирующая модель, оптимизация, ограничения, режим реального времени, ректификационная колонна.

Sotnikova M.V.

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

Application of predictive control to optimize dynamic processes in a given range

Abstract

The problem of digital control of controlled variables for a dynamic process with their retention in a given range is considered. It is assumed that the change of variables within the range can be arbitrary, but the values of variables must remain within the established boundaries. At the same time, if all the constraints are met, then the control should either be turned off or have as little intensity as possible. This formulation of the problem requires the development of special methods for the synthesis of control laws, different from traditional approaches in which the control goal is set by a command signal.
A formalized formulation of the control synthesis problem is performed for a nonlinear object model specified in discrete time, taking into account constraints on the control signal. A method of synthesis of the digital control law based on the use of predictive models in the feedback loop is proposed. The goal of object control is achieved by introducing a quadratic quality functional, including a penalty for violation of a specified range by controlled variables. In addition, this functionality characterizes the intensity of the control operation and allows to adjust energy costs using a weight multiplier. It is shown that the implementation of the control law in real time in the general case is reduced to solving the problem of nonlinear programming at each sample instant of discrete time. The effectiveness of the developed approach is illustrated by an example of controlling the oil refining process in a distillation column.

Keywords

Digital control, predictive model, optimization, constraints, real-time implementation, distillation column.

Введение

В работе рассматривается задача синтеза цифрового управления контролируемыми переменными динамического объекта с удержанием их в заданном диапазоне. Актуальность темы исследования определяется ее направленностью на повышение экономичности, надежности, эффективности и качества функционирования автоматических систем управления динамическими процессами, создание наукоемкого программного обеспечения. В основу предлагаемых алгоритмов цифрового управления положена идеология применения прогнозирующих моделей [1–8] (Model Predictive Control, MPC). Данный метод является оптимизационным и позволяет учесть многие из особенностей рассматриваемой проблемы, в частности высокую размерность вектора состояния, ограничения на переменные и наличие запаздывания.

Выполняется формализованная постановка задачи синтеза управления для динамического объекта, заданного нелинейными разностными уравнениями [9,10]. Исходная дискретная постановка задачи связана с тем, что в настоящее время реализация вычислительных алгоритмов управления практически повсеместно осуществляется с использованием цифровых вычислительных устройств [11,12]. В работе предлагается строить MPC-регулятор без командного сигнала с учетом ограничений на контролируемые и управляющие переменные. Существо алгоритма управления без командного сигнала состоит в том, что целью управления служит удержание контролируемых переменных внутри требуемого диапазона. Достижение цели управления обеспечивается введением специального квадратичного функционала качества, который содержит два слагаемых: первое определяет интенсивность управления, а второе – штраф за выход переменных из диапазона. Такой выбор функционала позволяет регулировать интенсивность работы управления внутри диапазона при помощи соответствующего весового множителя, а следовательно экономить энергетические ресурсы.

В качестве примера рассматриваются вопросы синтеза законов управления применительно к задачам нефтепереработки [13–15]. Особенностями этих задач являются неточность математической модели, высокая размерность вектора состояния, наличие транспортного запаздывания, большая инерционность объекта управления, ограничения на контролируемые и управляющие переменные. При этом в процессе эксплуатации нефтеперерабатывающей установки достаточно, чтобы контролируемые переменные процесса находились внутри заданных диапазонов, обеспечивая тем самым требуемое качество выходных нефтепродуктов. Результаты применения разработанных алгоритмов иллюстрируются примером имитационного моделирования в среде MATLAB.

Постановка задачи

Будем считать, что исходная математическая модель объекта управления представляется системой нелинейных разностных уравнений в форме пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[k+1] &= \mathbf{f}\big(\mathbf{x}[k],\mathbf{u}[k],\varphi[k]\big), \\ \mathbf{y}[k] &= \mathbf{g}\big(\mathbf{x}[k]\big). \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $\mathbf{x} \in E^n$ – вектор состояния модели, $\mathbf{u} \in E^m$ – вектор управления, $\mathbf{y} \in E^r$ – вектор измерений, $\varphi \in E^l$ – вектор внешних возмущений, $k = 0,1,2,...$ – номер такта (текущий момент дискретного времени), задающий соответствующий момент $t_k = k \cdot T$ непрерывного времени.

Введем в рассмотрение множества допустимых управлений $\mathbf{U} \subseteq E^m$ и измерений $\mathbf{Y} \subseteq E^r$. Для любого фиксированного момента времени k должны выполняться условия $\mathbf{u}[k] \in \mathbf{U}$.

Будем считать, что целью управления объектом (1) является выполнение условия

$$\mathbf{y}[k] \in \mathbf{Y}, \quad \forall k \ge k_0, \tag{2}$$

где $k_0 \ge 0$ – некоторое целое число, заранее не фиксированное. Отметим, что в начальный момент времени $k = 0$ условие (2) может не выполняться. Таким образом, цель управления состоит в том, чтобы обеспечить попадание и затем удержание контролируемых переменных $\mathbf{y}$ внутри заданного множества $\mathbf{Y}$. Важно отметить, что не ставится задача обеспечить определенные значения контролируемых переменных, их поведение внутри множества $\mathbf{Y}$ может быть произвольным.

В качестве примера допустимого множества $\mathbf{Y}$ могут выступать ограничения сверху и снизу на компоненты вектора $\mathbf{y}$:

$$\mathbf{y}_{\min} \le \mathbf{y}[k] \le \mathbf{y}_{\max}, \tag{3}$$

где $\mathbf{y}_{\min}$ и $\mathbf{y}_{\max}$ – заданные векторы, определяющие границы допустимого диапазона.

В итоге, поставим задачу синтеза системы управления с обратной связью, обеспечивающей достижение цели управления (2) для объекта, заданного математической моделью (1).

Синтез алгоритма управления на основе прогнозирующей модели

Приведенная постановка задачи обуславливает необходимость разработки специальных методов синтеза законов управления, отличных от классических подходов, в которых цель управления задается командным сигналом.

В основу предлагаемого метода синтеза положена теория управления с предсказанием (MPC, Model

Predictive Control). Используя в качестве исходной математической модели разностные уравнения (1), введем нелинейную прогнозирующую модель:

$$\begin{aligned} &\mathbf{x}[i+1]=\mathbf{f}\left(\mathbf{x}[i],\mathbf{u}[i],\hat{\varphi}[i]\right), \quad i=k+j, \quad j=0,1,2,..., \quad \mathbf{x}[k]=\tilde{\mathbf{x}}[k], \\ &\mathbf{y}[i]=\mathbf{g}\left(\mathbf{x}[i]\right), \end{aligned} \tag{4}$$

где $\hat{\varphi}$ – оценка внешнего возмущения, полученная с помощью асимптотического наблюдателя, или его измерение, если оно доступно. Модель (4) инициируется на начальном такте $j=0$ текущим состоянием реального объекта $\tilde{\mathbf{x}}[k]$ и позволяет приближенно спрогнозировать его поведение. В результате решения системы (4) получим конечную последовательность векторов управления $\{\mathbf{u}[i]\}, i=k,k+1,...,k+P-1$ и соответствующую ей конечную последовательность векторов состояния $\{\mathbf{x}[i]\}, i=k+1,k+2,...,k+P$ и контролируемых переменных $\{\mathbf{y}[i]\}$, $i=k+1,k+2,...,k+P$. Будем говорить, что при этом сформирован прогноз движения реального объекта с горизонтом P.

Рассмотрим вопрос о построении допустимого множества управлений на горизонте прогноза. Будем полагать, что ограничения на контролируемые переменные заданы в виде неравенств (3). Введем соответствующие им ограничения на горизонте прогноза:

$$y_j^{\min} \le y_j[i] \le y_j^{\max}, \quad i=\overline{k+1,k+P}, \quad j=\overline{1,r}, \tag{5}$$

где $\mathbf{y}_{\min}=\left(y_1^{\min} \quad y_2^{\min} \quad ... \quad y_r^{\min}\right)'$, $\mathbf{y}_{\max}=\left(y_1^{\max} \quad y_2^{\max} \quad ... \quad y_r^{\max}\right)'$ – заданные векторы с постоянными компонентами, y_j – j-ая компонента вектора $\mathbf{y}$. Введём следующие вспомогательные векторы

$$\bar{\mathbf{y}}_{\min}=\left(\mathbf{y}_{\min} \quad \cdots \quad \mathbf{y}_{\min}\right)' \in E^{rP}, \quad \bar{\mathbf{y}}_{\max}=\left(\mathbf{y}_{\max} \quad \cdots \quad \mathbf{y}_{\max}\right)' \in E^{rP},$$

представляющие верхние и нижние границы на горизонте прогноза для контролируемых переменных.

Ограничения (5) на контролируемые переменные могут нарушаться, например, в начальный момент времени или в процессе функционирования в случае выхода какой-либо из переменных за допустимые границы. Поэтому преобразуем ограничения (5) посредством добавления дополнительной «слабой» скалярной переменной ε, которая обеспечивает возможность нарушения ограничений в определенные моменты времени:

$$\begin{aligned} &y_j^{\min}-\varepsilon \le \bar{y}_j[i] \le y_j^{\max}+\varepsilon, \quad i=\overline{k+1,k+P}, \quad j=\overline{1,r}, \\ &\varepsilon \ge 0. \end{aligned} \tag{6}$$

Представим ограничения (6) в векторном виде с учетом введенных ранее обозначений

$$\begin{aligned} &\bar{\mathbf{y}}_{\min}-\mathbf{V}\varepsilon \le \bar{\mathbf{y}} \le \bar{\mathbf{y}}_{\max}+\mathbf{V}\varepsilon, \\ &\varepsilon \ge 0, \end{aligned} \tag{7}$$

где $\bar{\mathbf{y}}=\left(\mathbf{y}[k+1] \quad \mathbf{y}[k+2] \quad ... \quad \mathbf{y}[k+P]\right)' \in E^{rP}$ – вспомогательный вектор, $\mathbf{V}=\left(1 \quad 1 \quad ... \quad 1\right)' \in E^{rP}$ – вектор-столбец, состоящий из всех единиц. Система неравенств (7) является нелинейной и задает вместе с ограничениями на управление допустимое множество программных последовательностей векторов управления на горизонте прогноза. Введем формальное определение этого множества:

$$\Omega=\left\{\left(\bar{\mathbf{u}},\, \varepsilon\right)\in E^{mP+1}:\ \mathbf{u}[i]\in\mathbf{U}, i=\overline{k,k+P-1},\ \bar{\mathbf{y}}_{\min}-\mathbf{V}\varepsilon \le \bar{\mathbf{y}} \le \bar{\mathbf{y}}_{\max}+\mathbf{V}\varepsilon,\ \varepsilon \ge 0\right\}, \tag{8}$$

где $\bar{\mathbf{u}}=\left(\mathbf{u}[k] \quad \mathbf{u}[k+1] \quad ... \quad \mathbf{u}[k+P-1]\right)^{\mathrm{T}} \in E^{mP}$ – вспомогательный вектор. Отметим, что множество Ω является в общем случае невыпуклым.

Зададим квадратичный функционал, определяющий качество процессов управления на горизонте прогноза P:

$$J_k=J_k(\Delta\bar{\mathbf{u}},\varepsilon)=\sum_{j=1}^{P}\Delta\mathbf{u}[k+j-1]'\mathbf{Q}\Delta\mathbf{u}[k+j-1]+\rho\varepsilon^2, \tag{9}$$

где $\rho>0$ – весовой коэффициент штрафа за нарушение диапазона (5), $\mathbf{Q}$ – диагональная положительно определенная весовая матрица, у которой по диагонали расположены значения приоритетов по управляющим переменным, $\Delta\bar{\mathbf{u}}=\left(\Delta\mathbf{u}[k] \quad \Delta\mathbf{u}[k+1] \quad ... \quad \Delta\mathbf{u}[k+P-1]\right)' \in E^{mP}$ – вспомогательный вектор приращений управления, где $\Delta\mathbf{u}[i]=\mathbf{u}[i]-\mathbf{u}[i-1]$, $i=\overline{k,k+P-1}$. Очевидно, что между векторами $\bar{\mathbf{u}}$ и $\Delta\bar{\mathbf{u}}$ существует взаимно однозначное соответствие.

Заметим, что внутри диапазона (5) функционал (9) достигает минимального нулевого значения при фиксированном управлении. При этом вне диапазона (5) стремление минимизировать функционал (9) приведет к «втягиванию» контролируемых переменных внутрь ограничений, а внутри диапазона – к автоматическому выключению управления, поскольку при этом достигается минимальное значение функционала.

С учетом введенных обозначений, перепишем выражение для функционала (9) в виде:

$$J_k = J_k(\Delta\bar{\mathbf{u}}, \varepsilon) = \Delta\bar{\mathbf{u}}'\bar{\mathbf{Q}}\Delta\bar{\mathbf{u}} + \rho\varepsilon^2,$$

где $\bar{\mathbf{Q}} = \mathrm{diag}\underbrace{(\mathbf{Q} \quad \mathbf{Q} \quad \ldots \quad \mathbf{Q})}_{P\ раз}$. В результате поставим следующую задачу оптимизации управления на горизонте прогноза с учетом ограничений (5):

$$J_k = J_k(\Delta\bar{\mathbf{u}}, \varepsilon) = \Delta\bar{\mathbf{u}}'\bar{\mathbf{Q}}\Delta\bar{\mathbf{u}} + \rho\varepsilon^2 \to \min_{(\bar{\mathbf{u}} \quad \varepsilon)\in\Omega\subseteq E^{mP+1}}. \tag{10}$$

Здесь Ω – допустимое множество (8). Заметим, что задача оптимизации (10) является задачей нелинейного программирования в виду нелинейности ограничений, определяющих допустимое множество, а число ее переменных равно $mP+1$.

Решение задачи (10) определяет оптимальную программную последовательность векторов $\Delta\mathbf{u}^*[k], \Delta\mathbf{u}^*[k+1], \ldots, \Delta\mathbf{u}^*[k+P-1]$, а также значение слабой переменной ε^*. В соответствии со стратегией MPC-подхода [1–3] из этой последовательности используется только первая компонента $\Delta\mathbf{u}^*[k]$ на текущем такте. Для следующего такта $(k+1)$ процесс вычисления оптимальной программной последовательности повторяется заново.

Пример управления процессами нефтепереработки

В качестве примера рассмотрим систему линейных уравнений, представленную в форме вход–выход:

$$\begin{aligned}
&y_1 = \frac{-0.03}{10s+1}e^{-2s}u_2, \quad y_2 = \frac{-0.03}{10s+1}e^{-6s}u_1,\\
&y_3 = \frac{0.05}{5s+1}u_2, \quad y_4 = \frac{20}{5s+1}u_3,\\
&y_5 = \frac{-2}{35s+1}e^{-13s}u_3 + \frac{-400}{8s+1}u_4,\\
&y_6 = \frac{0.03}{20s+1}e^{-8s}u_1 + \frac{0.15}{70s+1}e^{-10s}u_2 + \frac{0.6}{25s+1}u_4.
\end{aligned} \tag{11}$$

Здесь $r = 6$ и $m = 4$ – число контролируемых и управляющих переменных соответственно. Постоянные времени и транспортные запаздывания в уравнениях (11) заданы в минутах. Начальные условия по всем переменным нулевые: $y_i(0) = 0,\ i = \overline{1,6}$.

С целью применения предложенного подхода к синтезу закона управления, модель (11) преобразуется к форме пространства состояний и осуществляется преобразование этой модели к ее представлению без запаздывания за счет расширения вектора состояния [1].

Модель (11) приближенно представляет динамический процесс переработки нефти в ректификационной колонне в окрестности заданной точки. Указанная точка определяется значениями контролируемых переменных $\mathbf{y}_s$, которые приведены в табл. 1. Во втором и третьем столбце этой таблицы заданы нижние $\tilde{\mathbf{y}}_{\min}$ и верхние $\tilde{\mathbf{y}}_{\max}$ границы для контролируемых переменных, определяющие допустимый диапазон их изменения.

Таблица 1. Исходные данные для контролируемых переменных.

	$\mathbf{y}_s$	$\tilde{\mathbf{y}}_{\min}$	$\tilde{\mathbf{y}}_{\max}$
$\tilde{y}_1$	8.1	0	8
$\tilde{y}_2$	-1	-2.5	4.1
$\tilde{y}_3$	2	-6	6
$\tilde{y}_4$	1	-3	3
$\tilde{y}_5$	-3	0	3
$\tilde{y}_6$	-1	0	10.15

Аналогично для управляющих переменных – в начальный момент времени их значения задаются вектором

$$\mathbf{u}_s = (0.4 \quad -5 \quad 0.5 \quad 0.2)'.$$

В соответствии с табл. 1 переменные $\tilde{y}_1, \tilde{y}_5, \tilde{y}_6$ нарушают границы заданного диапазона при $t = 0$.

Выберем шаг дискретизации $T_s = 1$ минута и горизонт прогноза $P = 50$. Следовательно, временной интервал прогнозирования составляет 50 минут. Зададим значение коэффициента при штрафном слагаемом в функционале (9) равным $\rho = 1e^2$, а весовую матрицу примем равной $\mathbf{Q} = \mathbf{E}_{4\times 4}$. На рис. 1 и 2 показаны результаты имитационного моделирования. Из рисунков видно, что все контролируемые переменные попадают внутрь заданного диапазона.

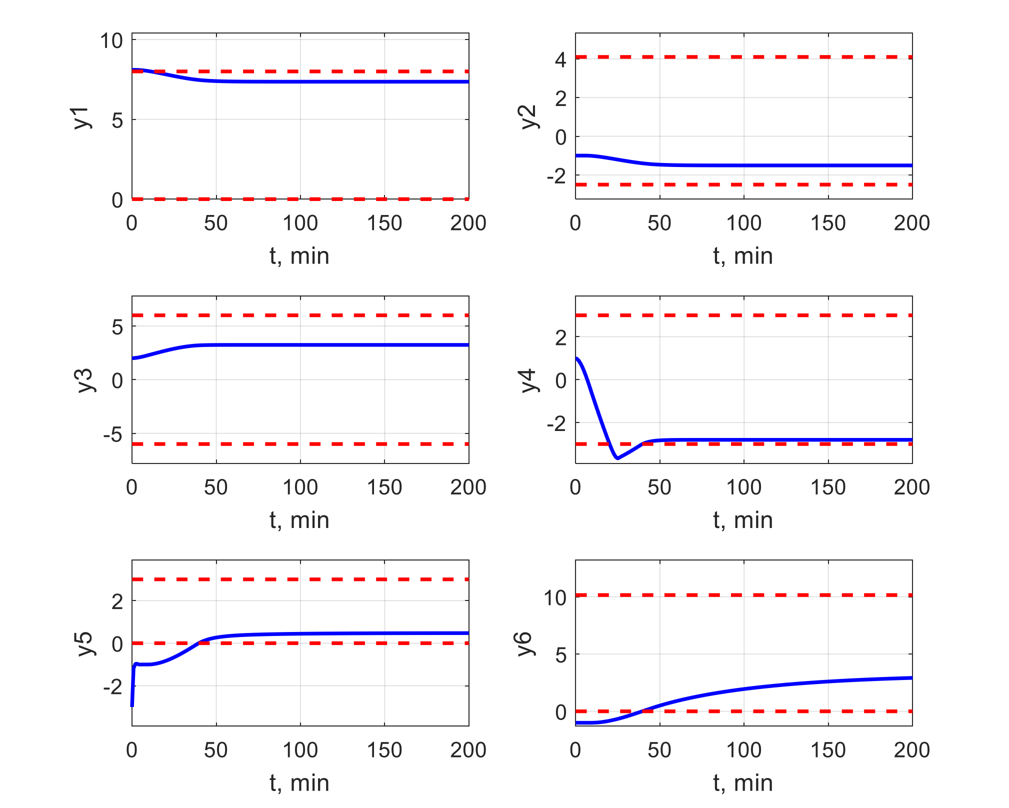

Рис. 1. Переходные процессы по выходу $\tilde{\mathbf{y}}$.

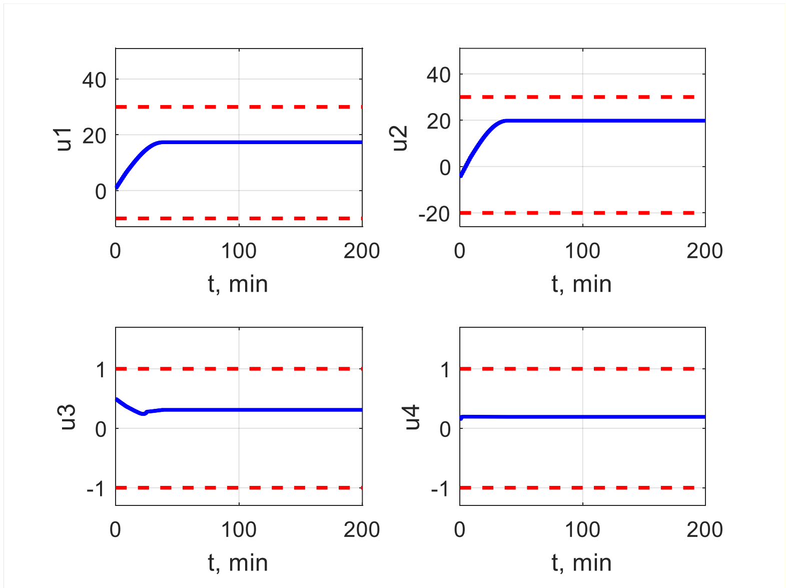

Рис. 2. Переходные процессы по входу $\tilde{\mathbf{u}}$.

Заключение

Рассмотрена задача управления контролируемыми переменными динамического процесса в заданном диапазоне. Выполнена формализованная математическая постановка задачи для объекта, заданного нелинейными уравнениями динамики. Предложен подход к синтезу цифрового закона управления, который основан на применении прогнозирующей модели в контуре обратной связи. Решение поставленной задачи достигается при помощи введения квадратичного функционала, включающего штраф за нарушение контролируемыми переменными заданного диапазона. Эффективность предложенного метода продемонстрирована примером управления процессом нефтепереработки в ректификационной колонне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00531.

Литература

1. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Управление с прогнозирующими моделями. Учебное пособие. – Воронеж: ООО «Издательство «Научная книга», 2016. – 214 с.
2. Kouvaritakis B., Cannon M. Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic. Springer International Publishing, 2016. 384 p.
3. Handbook of Model Predictive Control. Raković S.V., Levine W.S. editors. Birkhäuser Basel, 2019. 692 p.
4. Lahiri S. K. Multivariable predictive control: Applications in industry. Hoboken, NJ, USA: John Wiley \& Sons, 2017. 304 p.
5. Sotnikova M. Plasma stabilization based on model predictive control. International Journal of Modern Physics A. 2009. Vol. 24, № 5. P. 999-1008.
6. Сотникова М.В. Синтез робастных алгоритмов управления с прогнозирующими моделями // Системы управления и информационные технологии. – Т. 50, № 4. – 2012. – С. 99-102.
7. Sotnikova M. Ship Dynamics Control using Predictive Models // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012. Vol. 9. № 1. P. 250-255.
8. Sotnikova M. Control system design for visual positioning of a ship based on nmpc and multi-objective structure // IFAC-PapersOnLine, 2018. Vol. 51, Issue 32. P. 445-450.
9. Веремей Е. И. Линейные системы с обратной связью: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 448 с.
10. Александров А. Ю., Жабко А. П. Устойчивость движений дискретных динамических систем. СПб.: Науч.-исслед. ин-т химии С.-Петерб. ун-та, 2003. 112 с.
11. Donzellini G., Oneto L., Ponta D., Anguita D. Introduction to Digital Systems Design. Springer International Publishing, 2019. 536 p.
12. Landau I.D., Zito G. Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation. London: Springer-Verlag, 2006. 484 p.
13. Бардик Д.Л., Леффлер У.Л. Нефтехимия. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2001. – 416 с.
14. Corriou J.P. Distillation Column Control. In: Process Control. Springer, Cham, 2018, pp. 793-819.
15. Сотникова М.В. Синтез цифрового управления с прогнозом для удержания контролируемых переменных в заданном диапазоне. Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т.15, № 3. С. 397-409.

References

1. Veremey E. I., Sotnikova M. V. Upravlenie s prognoziruyushchimi modelyami. Ucheb. posobie. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2016, 214 p.
2. Kouvaritakis B., Cannon M. Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic. Springer International Publishing, 2016. 384 p.
3. Handbook of Model Predictive Control. Raković S.V., Levine W.S. editors. Birkhäuser Basel, 2019. 692 p.
4. Lahiri S. K. Multivariable predictive control: Applications in industry. Hoboken, NJ, USA: John Wiley \& Sons, 2017. 304 p.
5. Sotnikova M. Plasma stabilization based on model predictive control. International Journal of Modern Physics A. 2009. Vol. 24, № 5. P. 999-1008.
6. Sotnikova M.V. Sintez robastnykh algoritmov upravleniya s prognoziruyushchimi modelyami // Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii, 2012, vol. 50, no. 4, pp. 99-102.
7. Sotnikova M. Ship Dynamics Control using Predictive Models // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012. Vol. 9. № 1. P. 250-255.
8. Sotnikova M. Control system design for visual positioning of a ship based on nmpc and multi-objective structure // IFAC-PapersOnLine, 2018. Vol. 51, Issue 32. P. 445-450.
9. Veremey E.I. Lineynye sistemy s obratnoi svyaz'yu. Ucheb. posobie. Saint Petersburg, Lan Publ., 2013, 448 p.
10. Aleksandrov A. U., Zhabko A. P.} {\it Ustoychivost dvizheniy diskretnyh dinamicheskih sistem. Saint Petersburg, Research institute of chemistry of Saint Petersburg State University Publ., 2003, 112 p.
11. Donzellini G., Oneto L., Ponta D., Anguita D. Introduction to Digital Systems Design. Springer International Publishing, 2019. 536 p.
12. Landau I.D., Zito G. Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation. London: Springer-Verlag, 2006. 484 p.
13. Burdick D. L., Leffler W. L. Petrochemicals in nontechnical language. Oklahoma, USA, PennWell Publ. Company, 1990, 347 p.
14. Corriou J.P. Distillation Column Control. In: Process Control. Springer, Cham, 2018, pp. 793-819.
15. Sotnikova M.V. Sintez tsifrovogo upravleniya s prognozom dlya uderzhaniya kontroliruyemykh peremennyh v zadannom diapazone. Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes, 2019, vol. 15, iss. 3, pp. 397--409.

Об авторе:

Сотникова Маргарита Викторовна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий и систем Санкт-Петербургского государственного университета (198504, Россия, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский проспект, д. 35); ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0726-7448, m.sotnikova@spbu.ru.

Note on the author:

Sotnikova Margarita Viktorovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Department of Computer Applications and Systems, Saint-Petersburg State University (35 University Ave., Peterhof, St. Petersburg 198504, Russia); ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0726-7448, m.sotnikova@spbu.ru.