

Применение прогнозирующего управления для оптимизации динамических процессов в заданном диапазоне

М. В. Сотникова

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Адрес: 199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9
m.sotnikova@spbu.ru

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

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-07-00531 «Разработка теоретических основ, практических методов и цифровых технологий для решения задач многоцелевого интеллектуального управления подвижными объектами».

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сотникова М. В. Применение прогнозирующего управления для оптимизации динамических процессов в заданном диапазоне // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2021. Т. 17, № 4. С. 824-830. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.824-830>

© Сотникова М. В., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Application of Predictive Control to Optimize Dynamic Processes in a Given Range

M. V. Sotnikova

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation
Address: 7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation
m.sotnikova@spbu.ru

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 adjusting 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

Funding: The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-07-00531 "Development of Theoretical Foundations, Practical Methods and Digital Technologies for Solving Problems of Multi-Purpose Intelligent Control of Mobile Objects".

The author declares no conflict of interest.

For citation: Sotnikova M.V. Application of Predictive Control to Optimize Dynamic Processes in a Given Range. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(4):824-830. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202104.824-830>



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 моделей¹ [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 уравнениями² [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]. Особенности 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 пространстве состояний:

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

Здесь $\mathbf{x} \in E^n$ – вектор состояния модели, $\mathbf{u} \in E^m$ – вектор управления, $\mathbf{y} \in E^r$ – вектор измерений, $\phi \in E^l$ – вектор внешних возмущений, $k = 0, 1, 2, \dots$ – 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

$$\mathbf{y}[k] \in \mathbf{Y}, \quad \forall k \geq k_0, \quad (2)$$

где $k_0 \geq 0$ – 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} :

$$\mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}[k] \leq \mathbf{y}_{\max}, \quad (3)$$

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 [16, 17].

В основу предлагаемого метода синтеза положена теория управления с предсказанием (MPC, Model Predictive Control) [18, 19]. Используя в качестве исходной математической модели разностные уравнения (1), введем нелинейную прогнозирующую модель:

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

¹ Веремей Е. И., Сотникова М. В. Управление с прогнозирующими моделями. Воронеж: Научная книга, 2016. 214 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26133362> (дата обращения: 21.09.2021).

² Веремей Е. И. Линейные системы с обратной связью. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 448 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24067674> (дата обращения: 21.09.2021); Александров А. Ю., Жабко А. П., Платонов А. В. Устойчивость движений дискретных динамических систем. СПб.: ИД Федоровой Г.В., 2015. 154 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25551132> (дата обращения: 21.09.2021).



где $\hat{\phi}$ – оценка внешнего возмущения, полученная с помощью асимптотического наблюдателя, или его измерение, если оно доступно. Модель (4) иницируется 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 $\{\mathbf{u}[i]\}$, $i = k, k+1, \dots, k+P-1$ и соответствующую ей конечную последовательность векторов состояния $\{\mathbf{x}[i]\}$, $i = k+1, k+2, \dots, k+P$ и контролируемых переменных $\{\mathbf{y}[i]\}$, $i = k+1, k+2, \dots, k+P$. 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:

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

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

$\bar{\mathbf{y}}_{\min} = (\mathbf{y}_{\min} \ \dots \ \mathbf{y}_{\min})' \in E^{rP}$, $\bar{\mathbf{y}}_{\max} = (\mathbf{y}_{\max} \ \dots \ \mathbf{y}_{\max})' \in E^{rP}$, 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 определенных моменты времени:

$$y_j^{\min} - \varepsilon \leq \bar{y}_j[i] \leq y_j^{\max} + \varepsilon, \quad i = \overline{k+1, k+P}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (6)$$

$$\varepsilon \geq 0.$$

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

$$\bar{\mathbf{y}}_{\min} - \mathbf{V}\varepsilon \leq \bar{\mathbf{y}} \leq \bar{\mathbf{y}}_{\max} + \mathbf{V}\varepsilon, \quad (7)$$

$$\varepsilon \geq 0,$$

где $\bar{\mathbf{y}} = (\mathbf{y}[k+1] \ \mathbf{y}[k+2] \ \dots \ \mathbf{y}[k+P])' \in E^{rP}$ – вспомогательный вектор, $\mathbf{V} = (1 \ 1 \ \dots \ 1) \in E^{rP}$ – 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:

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

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

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

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

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, $\Delta\bar{\mathbf{u}} = (\Delta\mathbf{u}[k] \ \Delta\mathbf{u}[k+1] \ \dots \ \Delta\mathbf{u}[k+P-1]) \in E^{mP}$ – вспомогательный вектор приращений управления, где $\Delta\mathbf{u}[i] = \mathbf{u}[i] - \mathbf{u}[i-1]$, $i = k, k+P-1$. 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 [20–25].

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

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

$$\text{где } \bar{\mathbf{Q}} = \text{diag}(\underbrace{\mathbf{Q} \ \mathbf{Q} \ \dots \ \mathbf{Q}}_{P \text{ раз}}).$$

В результате поставим следующую задачу оптимизации управления на горизонте прогноза с учетом ограничений (5):

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

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 $\Delta\mathbf{u}^*[k], \Delta\mathbf{u}^*[k+1], \dots, \Delta\mathbf{u}^*[k+P-1]$, 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:

$$y_1 = \frac{-0.03}{10s+1} e^{-2s} u_2, \quad y_2 = \frac{-0.03}{10s+1} e^{-6s} u_1, \quad (11)$$

$$y_3 = \frac{0.05}{5s+1} u_2, \quad y_4 = \frac{20}{5s+1} u_3,$$

$$y_5 = \frac{-2}{35s+1} e^{-13s} u_3 + \frac{-400}{8s+1} u_4,$$

$$y_6 = \frac{0.03}{20s+1} e^{-8s} u_1 + \frac{0.15}{70s+1} e^{-10s} u_2 + \frac{0.6}{25s+1} u_4.$$



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.

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

Таблица 1. Исходные данные для контролируемых переменных
Table 1. Original data for controlled variables

	y_s	\tilde{y}_{\min}	\tilde{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.

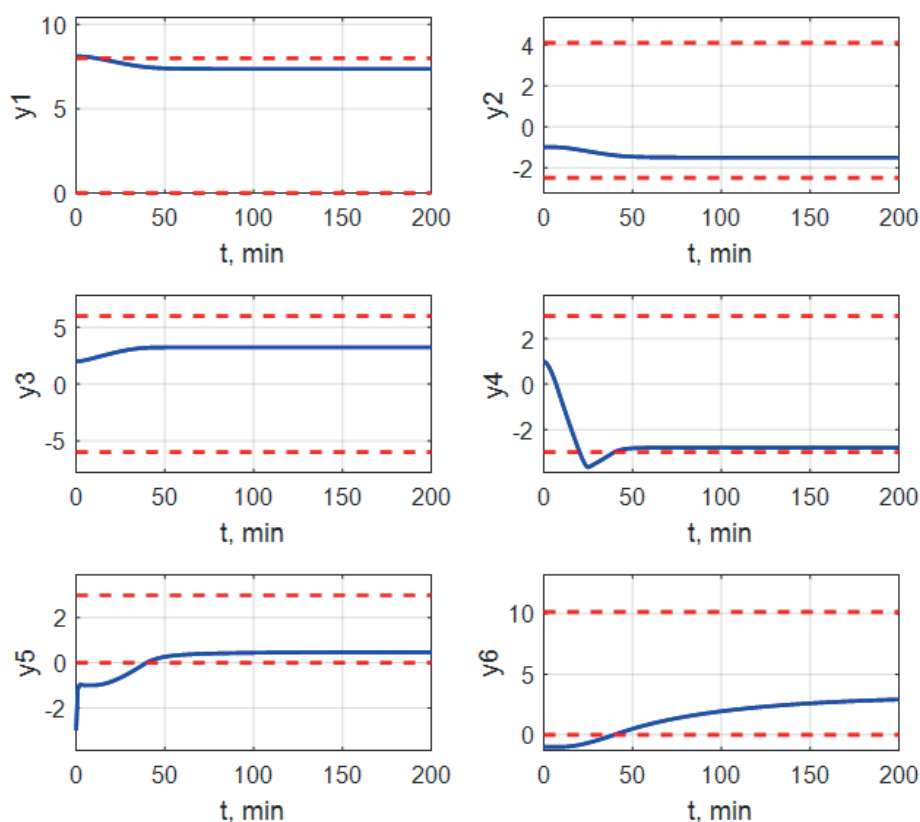
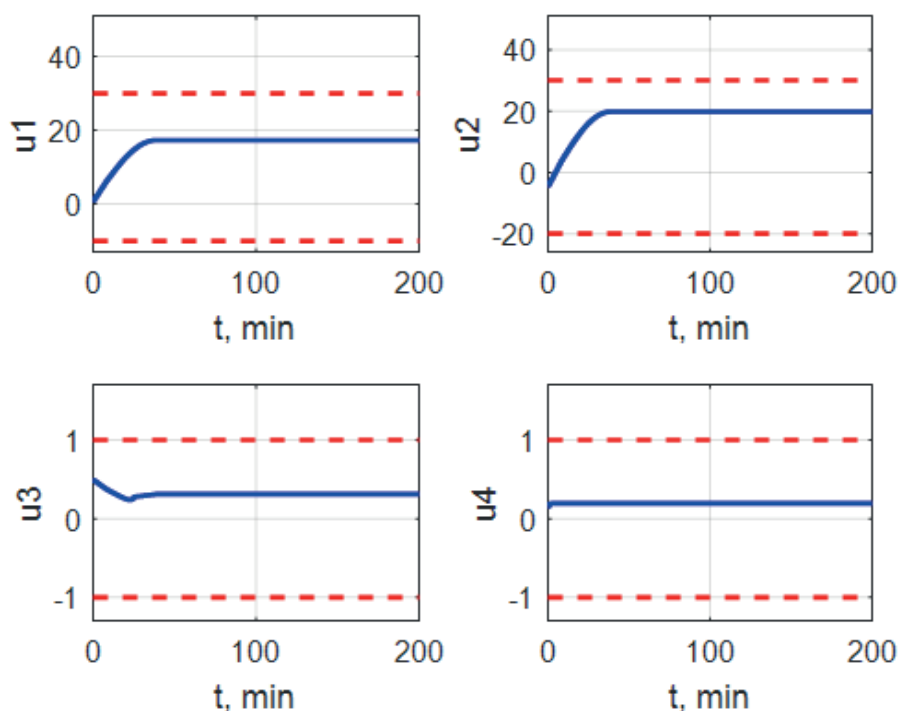


Рис. 1. Переходные процессы по выходу \tilde{y}

Fig. 1. Output transients \tilde{y}



Р и с. 2. Переходные процессы по входу \tilde{u} F i g. 2. Input transients \tilde{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 моде-

ли в контуре обратной связи. Решение поставленной задачи достигается при помощи введения квадратичного функционала, включающего штраф за нарушение контролируемых переменными заданного диапазона. Эффективность предложенного метода продемонстрирована примером управления процессом нефтепереработки в ректификационной колонне.

References

- [1] Allgöwer F, Zheng A. Nonlinear Model Predictive Control. *Progress in Systems and Control Theory*. Birkhäuser Basel; 2000. 472 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8407-5>
- [2] Kouvaritakis B., Cannon M. Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic. Springer Cham; 2016. 384 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24853-0>
- [3] Raković S.V., Levine W.S. (eds.) Handbook of Model Predictive Control. *Control Engineering*. Birkhäuser, Cham; 2019. 692 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77489-3>
- [4] Lahiri S.K. Multivariable Predictive Control: Applications in Industry. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017. 304 p. (In Eng.)
- [5] Sotnikova M. Plasma stabilization based on model predictive control. *International Journal of Modern Physics A*. 2009; 24(5):999-1008. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1142/S0217751X09044450>
- [6] Sotnikova M.V. *Sintez robustnykh algoritmov upravleniya s prognoziryuyushchimi modelyami* [Robust model predictive control algorithm synthesis]. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii = Automation and Remote Control*. 2012; (4):99-102. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18367018> (accessed 21.09.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [7] Sotnikova M. Ship Dynamics Control using Predictive Models. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012; 45(27):250-255. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00043>
- [8] Sotnikova M. Control System Design for Visual Positioning of a Ship Based on NMPC and Multi-objective Structure. *IFAC-PapersOnLine*. 2018; 51(32):445-450. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.425>



- [9] Sotnikova M.V., Veremey E.I. Dynamic Positioning Based on Nonlinear MPC. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013; 46(33):37-42. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00058>
- [10] Aleksandrov A., Chen Y., Platonov A., Zhang L. Stability analysis and uniform ultimate boundedness control synthesis for a class of nonlinear switched difference systems. *Journal of Difference Equations and Applications*. 2012; 18(9):1545-1561. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1080/10236198.2011.581665>
- [11] Donzellini G., Oneto L., Ponta D., Anguita D. Introduction to Digital Systems Design. Springer International Publishing; 2019. 536 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92804-3>
- [12] Landau I.D., Zito G. Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation. London: Springer-Verlag; 2006. 484 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-056-6>
- [13] Burdick D.L., Leffler W.L. Petrochemicals in Nontechnical Language. Oklahoma, USA, PennWell Publ. Company; 1990. 347 p. (In Eng.)
- [14] Corriou J.P. Distillation Column Control. In: Corriou J.P. (ed.) *Process Control*. Springer, Cham; 2018. p. 793-819. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61143-3_20
- [15] Sotnikova M.V. Sintez tsifrovogo upravleniya s prognozom dlya uderzhaniya kontroliruyemykh peremennykh v zadannom diapazone [Digital control design based on predictive models to keep the controlled variables in a given range]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2019; 15(3):397-409. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.309>
- [16] Sørensen A.J. A survey of dynamic positioning control systems. *Annual Reviews in Control*. 2011; 35(1):123-136. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.008>
- [17] Veremey E.I. Synthesis of Multi-objective Control Laws for Ship Motion. *Gyroscope and Navigation*. 2010; 1(2):119-125. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1134/S2075108710020069>
- [18] Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. 2nd ed. London: Springer-Verlag; 2007. 405 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-398-5>
- [19] Tuna S.E., Sanfelice R.G., Messina M.J., Teel A.R. Hybrid MPC: Open-Minded but Not Easily Swayed. In: Findeisen R., Allgöwer F., Biegler L.T. (eds.) *Assessment and Future Directions of Nonlinear Model Predictive Control. Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Vol. 358. Springer, Berlin, Heidelberg; 2007. p. 17-34. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72699-9_2
- [20] Veremey E.I., Sotnikova M.V. Visual Image Based Dynamical Positioning Using Control Laws with Multipurpose Structure. *IFAC Proceedings Volumes*. 2015; 48(16):184-189. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.278>
- [21] Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. *Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*. Second Edition. Springer, New York, NY; 2006. 664 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>
- [22] Qin S.J., Badgwell T.A. An Overview of Nonlinear Model Predictive Control Applications. In: Allgöwer F., Zheng A. (eds.) *Nonlinear Model Predictive Control. Progress in Systems and Control Theory*. Vol. 26. Birkhäuser, Basel; 2000. p. 369-392. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8407-5_21
- [23] Diehl M., et al. Real-Time Optimization for Large Scale Processes: Nonlinear Model Predictive Control of a High Purity Distillation Column. In: Grötschel M., Krumke S.O., Rambau J. (eds.) *Online Optimization of Large Scale Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2001. p. 363-383. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-04331-8_20
- [24] Dones I., Manenti F., Preisig H.A., Buzzi-Ferraris G. Nonlinear Model Predictive Control: A Self-Adaptive Approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010; 49(10):4782-4791. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1021/ie901693w>
- [25] Elaiw A.M., Xia X., Shehata A.M. Application of model predictive control to optimal dynamic dispatch of generation with emission limitations. *Electric Power Systems Research*. 2012; 84(1):31-44. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.09.024>

Поступила 21.09.2021; одобрена после рецензирования 29.10.2021; принята к публикации 15.11.2021.

Submitted 21.09.2021; approved after reviewing 29.10.2021; accepted for publication 15.11.2021.

Об авторе:

Сотникова Маргарита Викторовна, заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем факультета прикладной математики – процессов управления, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9), доктор физико-математических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Margarita V. Sotnikova, Head of the Chair of Computer Applications and Systems, Faculty of Applied Mathematics and Control Processes, Saint-Petersburg State University (7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg 199034, Russian Federation), Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0726-7448>, m.sotnikova@spbu.ru

The author has read and approved the final manuscript.

