

# Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья  
УДК 65:519.71  
DOI: 10.14529/ctcr240104

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДИКТИВНЫХ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Г.Ф. Ахмедьянова, ahmedyanova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3284-7794>*

*А.М. Пищухин, pishchukhin55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4655-6824>*

*Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия*

**Аннотация.** Организационно-технические системы являются самым распространенным инструментом решения народнохозяйственных задач. Однако в силу включенного в их состав персонала они характеризуются стохастическим поведением, что актуализирует вопрос разработки их вероятностной модели. С другой стороны, вероятностный аппарат является инструментом прогнозирования грядущих явлений и ситуаций и поэтому необходим механизм его использования в предиктивном (прогнозном) управлении. В работе использовано для этого первое вероятностное приближение в виде марковского процесса и его описания уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова. **Цель исследования** заключается в постановке и решении задач оптимального управления с вероятностными критериями качества управления для следящей схемы предиктивного управления, а также в разработке механизма метасистемного переключения моделей в случае адаптивной схемы с прогнозной моделью в контуре управления. **Материалы и методы.** На основе анализа научных идей и методологических подходов в предиктивном управлении отечественных и зарубежных авторов, а также математических методов и моделей осуществлен выбор двух схем реализации предиктивного управления для повышения эффективности функционирования организационно-технических систем: схем следящего и адаптивного управления. **Результаты.** Задача оптимального управления решена с помощью двух методов: принципа максимума Понтрягина и принципа динамического программирования Беллмана. Показано, что в первом случае имеет место выпуклая вверх стратегия достижения целевого значения управляемой величины при максимизирующем подходе, а во втором случае результатом стала стратегия, выпуклая вниз, используемая для оптимального расхода управленческих ресурсов. Кроме того, для другой схемы предиктивного управления – адаптивной с прогностической моделью в контуре – доказана эффективность применения стратегии метасистемного переключения моделей с постановкой и решением шести метасистемных задач. **Заключение.** Предлагаемый подход может быть использован при проектировании систем управления в организационно-технических системах и выборе стратегий поведения в сложных рыночных условиях при решении проблем их развития.

**Ключевые слова:** предиктивное управление, следящая система, адаптивная система, оптимальное управление, моделирование, метасистемное переключение

**Для цитирования:** Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Исследование предиктивных схем управления функционированием организационно-технических систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 1. С. 44–51. DOI: 10.14529/ctcr240104

## RESEARCH OF PREDICTIVE SCHEMES FOR MANAGEMENT OF THE FUNCTIONING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEMS

G.F. Akhmedyanova, [ahmedyanova@bk.ru](mailto:ahmedyanova@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3284-7794>

A.M. Pishchukhin, [pishchukhin55@mail.ru](mailto:pishchukhin55@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4655-6824>

Orenburg State University, Orenburg, Russia

**Abstract.** Organizational and technical systems are the most common tool for solving national economic problems. However, due to the personnel included in them, they are characterized by stochastic behavior, which raises the issue of developing their probabilistic model. On the other hand, the probabilistic apparatus is a tool for forecasting future phenomena and situations and therefore a mechanism for its use in predictive (forecast) management is needed. For this purpose, the work uses the first probabilistic approximation in the form of a Markov process and its description by the Fokker–Planck–Kolmogorov equation. The purpose of the study is to formulate and solve optimal control problems with probabilistic control quality criteria for a tracking predictive control scheme, as well as to develop a mechanism for metasystem switching of models in the case of an adaptive scheme with a predictive model in the control loop. Materials and methods. Based on the analysis of scientific ideas and methodological approaches in predictive management of domestic and foreign authors, as well as mathematical methods and models, two schemes for implementing predictive management were selected to improve the efficiency of the functioning of organizational and technical systems: tracking schemes and adaptive management. Results. The optimal control problem was solved using two methods: Pontryagin's maximum principle and Bellman's principle of dynamic programming. It is shown that in the first case there is a convex upward strategy for achieving the target value of the controlled value with a maximizing approach, and in the second case the result is a convex downward strategy used for the optimal consumption of management resources. In addition, for another predictive control scheme – adaptive with a predictive model in the loop, the effectiveness of using the strategy of metasystem switching of models with the formulation and solution of six metasystem problems has been proven. Conclusion. The proposed approach can be used when designing management systems in organizational and technical systems and choosing behavior strategies in difficult market conditions when solving problems of their development.

**Keywords:** predictive control, tracking system, adaptive system, optimal control, modeling, metasystem switching

**For citation:** Akhmedyanova G.F., Pishchukhin A.M. Research of predictive schemes for management of the functioning of organizational and technical systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(1):44–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240104

### Введение

Организационно-техническая система в силу включенного в ее состав персонала характеризуется стохастическим поведением [1]. Это делает актуальным вопрос разработки вероятностной модели ее поведения. С другой стороны, вероятностный аппарат является инструментом прогнозирования грядущих явлений и ситуаций и поэтому необходим механизм его использования в предиктивном (прогнозном) управлении. Воспользуемся для этого аппаратом первого вероятностного приближения в виде марковского процесса и его описания уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК).

### 1. Описание подхода

При проектировании можно использовать две схемы предиктивного управления: следящую [2] или адаптивную с прогностической моделью в контуре [3–5]. Исследуем в порядке перечисления возможность этих схем.

Пусть вероятность востребованности результата функционирования организационно-технической системы в обществе, например, в виде экспериментального результата работы научной

установки с обслуживающими ее людьми (или произведенной производственным предприятием продукции на рынке) имеет марковскую природу и меняется во времени  $t$ , а также зависит от некоторой переменной  $x$ , характеризующей степень этой востребованности (например, количество потенциальных покупателей продукции).

Применим к плотности, описанной выше вероятности  $\omega_0^*$ , уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова [6]:

$$\frac{\partial \omega_0^*}{\partial t} = -a_0 \frac{\partial \omega_0^*}{\partial x} + \frac{b_0}{2} \frac{\partial^2 \omega_0^*}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $a_0$  – коэффициент сноса;  $b_0$  – коэффициент диффузии.

Уравнение (1) является параболическим [7], и оно подстановками

$$\omega_0^* = e^{\mu x + \lambda t} \cdot \omega_1^*(x, t), \mu = a_0/b_0, \lambda = -a_0^2/2b_0 \quad (2)$$

может быть приведено к каноническому виду

$$\frac{\partial \omega_1^*}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega_1^*}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Заметим теперь, что дальше мы будем иметь дело с преобразованной вероятностью, описываемой этим уравнением.

С другой стороны, пусть готовность самой организационно-технической системы к функционированию и производству востребованного результата также является случайным процессом, хотя в определенной степени и управляемым. Принимая опять гипотезу марковости этого процесса и учитывая, что это другой процесс и поэтому коэффициенты переноса  $a$  и диффузии  $b$  также будут другими, получаем второе уравнение ФПК. Поведение плотности вероятности готовности системы  $\omega$  описывается уравнением

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Из этого уравнения следует, что управлять процессом повышения готовности организационно-технической системы можно, только изменяя коэффициент  $b_2$ , добиваясь его близости к  $b_1$  (цель управления –  $b_2 \rightarrow b_1$ ). Тогда уравнение (4) преобразуется следующим образом:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Здесь управляющее воздействие носит в большой степени организационный характер, поскольку управлять вероятностью можно, только создавая благоприятные условия для появления желаемого события и устраняя причины его неоявления.

Задача оптимального управления организационно-технической системой [8] в этом представлении должна сводиться к обеспечению такого уровня ее готовности, который приводит к минимуму различия плотностей вероятностей, подчиняющихся уравнениям (3) и (5).

## 2. Решение с помощью принципа максимума Понтрягина

Для решения поставленной задачи оптимального управления применим прием, подобный идее профессора А.М. Летова [9]. В соответствии с ней в функционал включим вероятностный критерий качества управления в виде суммы квадрата потерь от недостаточности управления, описываемых разностью плотностей вероятностей, введенных выше, и квадрата затрат на управление, снижающее эти потери [10, 11]:

$$F = \int_0^{t_f} \int_0^\infty (q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2) dx dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $q$  – постоянный коэффициент;  $t_f$  – время окончания управления.

Составим лагранжиан, в который входит как подинтегральная функция из (6), так и уравнение состояния объекта управления – готовность (5) с использованием одного коэффициента Лагранжа  $\psi$ :

$$L = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \psi \left( by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Применим сначала принцип максимума Понтрягина, для чего составим гамильтониан, требующий максимизации:

$$H = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \psi by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Используя одно из сопряженных уравнений, получаем

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = 2q(\omega_1^* - \omega). \quad (9)$$

Исключаем теперь множитель Лагранжа:

$$H = q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + 2qby \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P), \quad (10)$$

где  $P = \int_0^{t_f} \omega dt$ . Определяем управляющее воздействие, при котором имеет место максимум гамильтониана:

$$\frac{\partial H}{\partial y} = -2b(b_1 - y^*b) + 2qb \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P) = 0. \quad (11)$$

В итоге

$$y^* = \frac{b_1}{b} - \frac{q}{b} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P). \quad (12)$$

Подставляя найденное решение в (5), имеем

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b \left( \frac{b_1}{b} - \frac{q}{b} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} (\omega_1^* t - P) \right) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (13)$$

или

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - q \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 (\omega_1^* t - P). \quad (14)$$

Не определяя решения, попытаемся ответить на вопрос о его характере, для чего продифференцируем уравнение (14) еще раз по времени:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = q(\omega - \omega_1^*) \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2. \quad (15)$$

Поскольку  $\omega_1^*$  – целевая плотность вероятности, определяемая на горизонте планирования предиктивной системы управления, она выше, чем текущая

плотность вероятности, в результате ее вторая производная отрицательна, что говорит о выпуклом вверх характере полученной кривой поведения этой величины (при этом множитель (2) не может изменить этого характера). На рис. 1 ход процесса управления с использованием принципа максимума Понтрягина отражается верхней кривой 1, такая стратегия является аналогом лисьей погони [12].

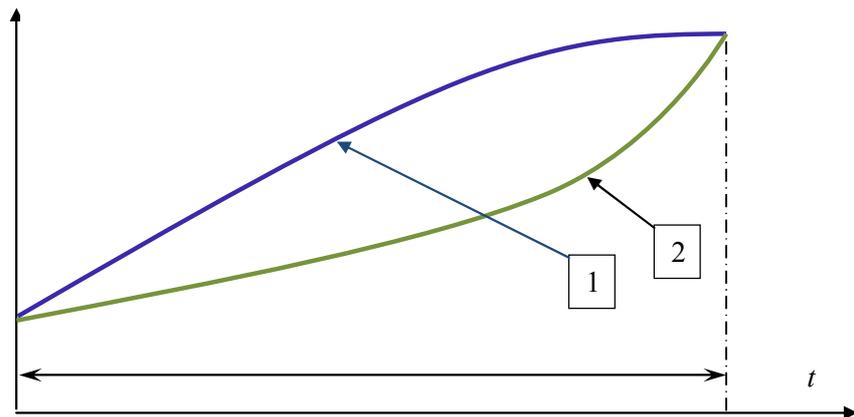


Рис. 1. Траектории достижения целевого значения управляемой величины в следящей системе управления  
Fig. 1. Trajectories of achieving the target value of the controlled quantity in the servo control system

### 3. Решение с помощью принципа динамического программирования Беллмана

Принцип максимума Понтрягина, как известно, дает решение максимального быстродействия и мало экономит управленческие затраты. Их реальная минимизация может быть получена решением задачи оптимального управления по принципу динамического программирования Беллмана. Составляем уравнение Беллмана с использованием функционала (6):

$$q(\omega_1^* - \omega)^2 + (b_1 - yb)^2 + \frac{\partial S}{\partial \omega} by \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \quad (16)$$

где  $S$  – функция Беллмана. Дифференцируя это уравнение по управляющему воздействию  $y$ , получаем

$$-2b(b_1 - yb) + b \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0 \quad (17)$$

или

$$y = \frac{b_1}{b} - \frac{1}{2b} \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}. \quad (18)$$

Подставляем полученное решение в (16):

$$q(\omega_1^* - \omega)^2 + \frac{3b_1}{2} \frac{\partial S}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial S}{\partial \omega} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 = 0. \quad (19)$$

Как видим, получено нелинейное уравнение. Однако для цели данного исследования можно не решать его. Подставим решение (18) в уравнение (5):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = b_1 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial \omega} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2. \quad (20)$$

Примем функцию Беллмана квадратичной с постоянными коэффициентами  $a_1$   $a_2$ :

$$S = a_1 \omega^2 + a_2 \omega; \quad \frac{\partial S}{\partial \omega} = 2a_1 \omega + a_2 \quad (21)$$

и подставим в (20). Для определения поведения плотности вероятности во времени дифференцируем полученное уравнение по времени:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 = 0. \quad (22)$$

Решение этого уравнения находим в справочнике [13]:

$$\omega = C_1 + C_2 \exp \left( -a_1 \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)^2 t \right). \quad (23)$$

Здесь  $C_1$  и  $C_2$  – константы интегрирования.

Повторяя рассуждения о том, что целевая плотность вероятности больше, чем в начале управления, выбираем восходящую экспоненту в (21) и, следовательно, отрицательное значение коэффициента  $a_1 < 0$ . Теперь становится очевидным, что полученная кривая достижения целевого значения является выпуклой вниз (нижняя кривая 2 на рис. 1). Такую стратегию необходимо использовать для оптимального достижения результатов [14–16].

#### 4. Адаптивная система с прогнозной моделью в контуре

Пусть теперь объект управления настолько сложный, что его поведение на разных участках описывается разными моделями [17–20]. В этом случае можно применить теоретическое описание с использованием метасистемного подхода [21]. На рис. 2 представлен метасистемный механизм переключения моделей при изменении ситуации. Ветвь управления, содержащая модель, и прямая ветвь с объектом управления включены параллельно так, что на объект и на выбранную модель (находящуюся в области моделирования) действуют одинаковые управляющие  $U$ - и возмущающие  $F$ -воздействия. Блок принятия решений анализирует управленческую ситуацию по разностному и возмущающему сигналам и принимает решение о дальнейшем управлении в отношении либо коррекции, либо даже смены модели объекта управления на более адекватную ситуации. При этом разностный сигнал образуется вычитанием из модельного  $Y_M$  управляемой величины  $Y$ .

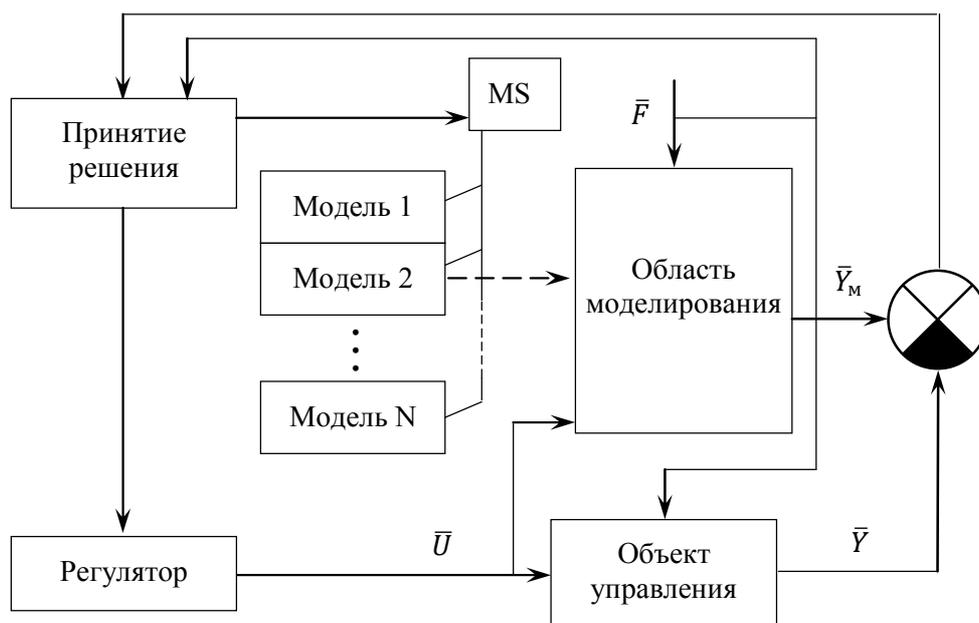


Рис. 2. Механизм переключения моделей в системе управления с прогнозной моделью  
Fig. 2. Model switching mechanism in a control system with a predictive model

Самый простой механизм переключения модели будет в случае, когда объект сам является метасистемой. Примером может быть функционирование поликлиники. Если пришел пациент с больным ухом, объектом управления становится кабинет отоларинголога с соответствующим оборудованием и врачом соответствующей квалификации, а в область моделирования выдвигается модель процесса лечения уха. Если же затем подошел пациент с больным глазом, то меняется как кабинет, так и модель процесса лечения.

В случае же, когда объект управления представляется составной моделью, переключение с одной модели на другую будет происходить по результатам сравнения разностного сигнала для разных моделей при одинаковых управляющих и возмущающих воздействиях. При этом выбор будет сделан в пользу модели, в которой разностный сигнал меньше.

### Заключение

Таким образом, исследование предиктивных схем управления функционированием организационно-технических систем доказывает их результативность и выявляет схемные решения, при которых она будет наивысшей. Так, в случае большой неопределенности поведения объекта управления и влияющих факторов необходимо использовать следящую схему управления, выбирая максимизирующую стратегию с выпуклой вверх траекторией или оптимальную с траекторией, выпуклой вниз. В случае большей детерминированности можно использовать адаптивную схему с прогнозной моделью и стратегией ее метасистемного переключения.

### Список литературы

1. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Основы многоуровневого управления в организационно-технических системах: монография. Оренбург: ОГУ. 2020. 162 с. ISBN 978-5-7410-2488-1.
2. Теория автоматического управления / под ред. академика А.А. Воронова. Ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
3. Манусов В.З., Орлов Д.В., Антоненков Д.В. Предиктивное управление и прогнозирование производственного процесса в условиях детерминированного хаоса // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 3. С. 63–78. DOI: 10.31857/S0002331022030049
4. Черешко А.А., Шундерюк М.М. Границы применимости алгоритмов усовершенствованного управления с прогнозирующей моделью в условиях неопределенности объекта управления // Проблемы управления. 2020. № 1. С. 17–23. DOI: 10.25728/ru.2020.1.2
5. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11, no. 7. P.733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7
6. Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М. Случайные процессы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 448 с.
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
8. Pishchukhin A.M., Akhmedyanova G.F. Algorithms for synthesizing management solutions based on OLAP-technologies // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Enterprise Information Systems. 2018. Vol. 1015 (4). P. 042001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042001
9. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. I–IV // Автоматика и телемеханика. 1960. № 4. С. 436–441; № 5. С. 561–568; № 6. С. 661–665; 1961. № 4. С. 425–435.
10. Пищухин А.М. Вероятностная модель согласования производственного процесса с региональным рынком // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 1 (61). С. 20–33.
11. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Оптимальное управление производственной системой на основе вероятностного критерия // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 5 (110). С. 7–19. DOI: 10.23859/1994-0637-2022-5-110-1
12. Пищухин, А.М. Управление предприятием на основе прогноза в ассортиментном пространстве // Экономика региона. 2017. Т. 13. № 1. С. 216–225. DOI: 10.17059/2017-1-20
13. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям: пер. с нем. М.: Наука, 1976. 576 с.
14. Ильина Е.А. Моделирование стратегии устойчивого развития промышленных предприятий // Организатор производства. 2021. Т. 29, № 3. С. 130–138. DOI: 10.36622/VSTU.2021.39.13.014

15. Зайченко И.М., Яковлева М.А. Предиктивная аналитика в управлении цепями поставок // Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 2. С. 18–22. DOI: 10.31775/2305-3100-2019-2-18-22
16. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
17. Lorenzen M., Allgöwer F., Cannon M. Adaptive Model Predictive Control with Robust Constraint Satisfaction // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, iss. 1. P. 3313–3318. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.512
18. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Предиктивное управление в техпроцессах при ИПД // ITIDS+RRS'2014. 2014. С. 251–256.
19. Alanqar A., Durand H., Christofides P.D. Fault-Tolerant Economic Model Predictive Control Using Empirical Models // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, iss. 1. P. 3517–3523. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.940
20. Capaci R.B., Vaccari M., Pannocchia G. Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction // Journal of Process Control. 2018. Vol. 71. P. 25–34. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.09.006
21. Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М. Гибридная интеллектуализация системы управления авиационным производством // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 146–150.

#### References

1. Akhmed'yanova G.F., Pishchukhin A.M. *Osnovy mnogourovnevnogo upravleniya v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: monografiya* [Fundamentals of multi-level management in organizational and technical systems: monograph]. Orenburg: Orenburg State University; 2020. 162 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7410-2488-1.
2. Voronov A.A. (Ed.). *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Ch. 1: Teoriya lineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control. Part 1: Theory of linear automatic control systems]. Moscow: Vysshaya shkola; 1986. 367 p. (In Russ.)
3. Manusov V.Z., Orlov D.V., Antonenkov D.V. Predictive control and production process forecasting under deterministic chaos. *Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*. 2022;3:63–78. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002331022030049
4. Cheresenko A.A., Shunderiyuk M.M. Applicability limits of model-based predictive control algorithms under uncertain control object dynamics. *Control Sciences*. 2020;1:17–23. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2020.1.2
5. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003;11(7):733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7
6. Volkov I.K., Zuev S.M., Tsvetkova G.M. *Sluchaynye protsessy* [Random processes]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2006. 448 p. (In Russ.)
7. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka; 1977. 736 p. (In Russ.)
8. Pishchukhin A.M., Akhmedyanova G.F. Algorithms for synthesizing management solutions based on OLAP-technologies. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 – Enterprise Information Systems*. 2018;1015(4):042001. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042001
9. Letov A.M. [Analytical design of regulators. I–IV]. *Automation and telemekhanics*. 1960;4:436–441. 1960;5:561–568; 1960;6:661–665; 1961;4:425–435. (In Russ.)
10. Pishchukhin A.M. Probabilistic model of harmonization of the production process with the regional market. *Vestnik of Samara state technical university. Technical sciences series*. 2019;1(61):20–33. (In Russ.)
11. Akhmedyanova G.F., Pishchukhin A.M. Optimal control of the production system based on a probabilistic criterion. *Cherepovets State University Bulletin*. 2022;5(110):7–19. (In Russ.) DOI: 10.23859/1994-0637-2022-5-110-1
12. Pishchukhin A.M. Company management based on the forecast in product area. *Ekonomika regiona = Economy of region*. 2017;13(1):216–225. (In Russ.) DOI: 10.17059/2017-1-20

13. Kamke E. *Handbook of Ordinary Differential Equations*. Translation from German. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 576 p. (In Russ.)
14. Ilyina E.A. Modeling the strategy of sustainable development of industrial enterprises. *Organizer of production*. 2021;29(3):130–138. (In Russ.) DOI: 10.36622/VSTU.2021.39.13.014
15. Zaychenko I.M., Iakovleva M.A. Predictive analytics in supply chain management. *Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management*. 2019;2:18–22. (In Russ.) DOI: 10.31775/2305-3100-2019-2-18-22
16. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
17. Lorenzen M., Allgöwer F., Cannon M. Adaptive Model Predictive Control with Robust Constraint Satisfaction. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3313–3318. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.512
18. Darintsev O.V., Migranov A.B. [Predictive control in technical processes with IPD]. In: *ITIDS+RRS'2014*. 2014. P. 251–256. (In Russ.)
19. Alanqar A., Durand H., Christofides P.D. Fault-Tolerant Eco-nomic Model Predictive Control Using Empirical Models. *IFAC-PapersOnLine*. 2017;50(1):3517–3523. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.940
20. Capaci R.B., Vaccari M., Pannocchia G. Model predictive control design for multivariable processes in the presence of valve stiction. *Journal of Process Control*. 2018;71:25–34. DOI: 10.1016/j.jprocont.2018.09.006
21. Akhmed'yanova G.F., Pishchukhin A.M. Hybrid intellectualization of the management system in aircraft manufacture. *Russian Aeronautics*. 2021;64(1): 157–162. DOI: 10.3103/S1068799821010220

#### **Информация об авторах**

**Ахмедьянова Гульнара Фазульевна**, канд. пед. наук, доц., доц. кафедры управления и информатики в технических системах, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ahmedyanova@bk.ru.

**Пищухин Александр Михайлович**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления и информатики в технических системах. Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; pishchukhin55@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Gulnara F. Akhmedyanova**, Cand. Sci. (Education), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management and Informatics in Technical Systems of the, Orenburg State University, Orenburg, Russia; ahmedyanova@bk.ru.

**Alexander M. Pishchukhin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. Doctor of Technical Sciences. Professor of the Department of Control and Informatics in Technical Systems of the, Orenburg State University, Orenburg, Russia; pishchukhin55@mail.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 06.11.2023**

**The article was submitted 06.11.2023**