

УДК 004.942

Шифр специальности ВАК: 2.3.3

М.Е. Захаров, М.Н. Чернышов, В.М. Дмитриев, К.Е. Захаров, Л.М. Ульянов

Методика нелинейного предиктивного управления технологическими комплексами нефтегазоподготовки

Актуальность. Нелинейность, инерционность и перекрёстные связи процессов нефтегазоподготовки в сочетании с жёсткими технологическими ограничениями снижают эффективность классических систем автоматического регулирования и требуют перехода к предиктивным алгоритмам управления на основе цифровых двойников. **Цель исследования.** Разработка методики нелинейного предиктивного управления технологическими комплексами нефтегазоподготовки на базе цифрового двойника в отечественной среде имитационного моделирования. **Методы.** Параметрическая идентификация по ретроспективным данным SCADA-систем градиентной коррекцией; линеаризация в рабочей точке с использованием матриц Якоби и последующая дискретизация; сведение задачи оптимального управления к квадратичному программированию на скользящем горизонте; анализ устойчивости, управляемости и наблюдаемости замкнутой системы; верификация модели по паспортным данным и численным экспериментам в MatLab. **Научная новизна.** Впервые предложена методика интеграции цифрового двойника, построенного методом компонентных цепей, в контур предиктивного управления, учитывающая специфику идентификации по данным промышленной SCADA, явные технологические ограничения и проверку устойчивости по Ляпунову; разработан алгоритм перехода от нелинейной дифференциально-алгебраической модели к квадратичной задаче оптимизации, решаемой в реальном времени. **Результаты.** Подтверждена адекватность цифрового двойника теплообменного аппарата: отклонение расчётных статических характеристик от паспортных не превышает 13,5%, а переходные характеристики согласованы с верификационным расчётом в MatLab. Корректность процедур линеаризации и дискретизации обоснована проверкой критериев управляемости и наблюдаемости Калмана и решением уравнения Риккати. Сформулирована постановка задачи предиктивного управления с ограничениями на скользящем горизонте. **Практическая значимость.** Методика предназначена для внедрения в АСУ ТП промышленных объектов нефтегазоподготовки: её применение повысит энергоэффективность и надёжность регулирования, снизит колебательность технологических параметров и может быть использована при проектировании усовершенствованных систем управления теплообменного оборудования.

Ключевые слова: предиктивное управление, имитационное моделирование, цифровой двойник, среда моделирования MAPC, метод компонентных цепей, нефтегазоподготовка, нелинейные системы, оптимизация, теплообменные аппараты, АСУ ТП.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-129-134

Введение

Современные технологические объекты нефтегазоподготовки представляют собой сложные многосвязные динамические системы, функционирующие в условиях неопределённости входных воздействий, изменчивости состава сырья и наличия жёстких технологических ограничений. Процессы тепло- и массообмена характеризуются значительной инерционностью, нелинейностью и наличием перекрёстных связей между переменными.

Классические алгоритмы автоматического регулирования (ПИД-регуляторы), характерные для классической АСУ ТП, ориентированы на компенсацию текущей ошибки и не учитывают будущую динамику системы. В условиях многофакторного влияния и запаздывания процессов это приводит к возникновению колебательных режимов и неэффективному расходу энергоресурсов. Колебательные процессы при регулировании на объектах подготовки газа могут вызывать значительные экономические потери из-за повышенного потребления электрической энергии на аппаратах воздушного охлаждения.

Решение данной проблемы возможно посредством внедрения предиктивного управления (англ. Model Predictive Control, MPC [1–3]), основанного на использовании динамической математической мо-

дели объекта – цифрового двойника [4, 5], что позволяет уменьшить амплитуду колебательных процессов при регулировании.

Целью настоящей статьи является разработка методики синтеза нелинейного предиктивного управления для объектов нефтегазоподготовки, реализуемой на базе среды MAPC. В основе методики лежат принципы компонентного моделирования, открытой архитектуры для параметрической идентификации по данным SCADA-систем и динамического расчета переходных процессов.

В настоящей работе впервые предложена методика интеграции цифрового двойника, построенного на базе метода компонентных цепей (МКЦ) [6, 7], в контур предиктивного управления с учётом:

- специфики параметрической идентификации по данным промышленной SCADA;
- явного учёта технологических ограничений нефтегазоподготовки;
- процедуры линеаризации [8, 9] нелинейной модели в рабочей точке с проверкой устойчивости по Ляпунову [10, 11].

Математическая модель и методика

В основу математического обеспечения среды моделирования MAPC [12] положен МКЦ, позволяющий автоматизировать формирование системы диф-

ференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) на основе графической топологии технологической схемы.

В результате формируется система ДАУ общего вида

$$F(x, \dot{x}, z, u, p, t) = 0, \quad (1)$$

где x – дифференциальные переменные состояния; z – алгебраические переменные; u – управляющие воздействия; p – параметры модели.

При условии невырожденности Якобиана

$$\det\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}}\right) \neq 0 \quad (2)$$

система приводится к нормальной форме Коши. Приведение выполнено численно-символическим методом, реализованным в моделируемой среде: используется метод обратных разностей для жестких систем, алгебраические переменные $z(t)$ исключаются методом подстановки на каждом шаге интегрирования. В результате получаем

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p). \quad (3)$$

Таким образом, цифровой двойник в MAPS представляет собой нелинейную систему первого порядка. Нелинейность в правой части обусловлена теплофизическими зависимостями, однако в рабочей точке выполняется линеаризация, поэтому данная нелинейность является несущественной с точки зрения устойчивости по Ляпунову.

Для полного описания системы в пространстве состояний также задается уравнение наблюдения

$$y(t) = C_x(t) + D_u(t), \quad (4)$$

где $y(t)$ – измеряемые выходы (например, температура на выходе теплообменника); C – матрица наблюдения (в простейшем случае единичная, если все состояния измеряемы); D – матрица прямого прохода (при отсутствии мгновенной связи $D = 0$).

В данной работе C и D задаются исходя из доступных датчиков по данным SCADA.

Исходя из описанного выше, алгоритм работы предиктивного управления в среде MAPS организовывается следующим образом:

1. Определение вектора состояний – определение динамических переменных в технологическом процессе.

2. Определение управляющих воздействий

$$u(t) = [Q_{\text{heat}} F_{\text{feed1}} F_{\text{feed2}} \dots]^T. \quad (5)$$

3. Определение технологических ограничений (диапазон работы оборудования, заданные нормы ведения технологического режима согласно регламенту)

$$\begin{aligned} x_{\min} &\leq x(t) \leq x_{\max}, \\ u_{\min} &\leq u(t) \leq u_{\max}. \end{aligned} \quad (6)$$

4. Построение динамической модели в MAPS.

5. Параметрическая идентификация

$$J_{\text{id}}(p) = \sum_{k=1}^N \|y_k - y_k(p)\|^2, \quad (7)$$

где y_k – реальные измерения; $y_k(p)$ – значения, полученные в модели.

Выполнение градиентной коррекции:

$$p_{i+1} = p_i - \alpha \nabla J_{\text{id}}(p), \quad (8)$$

где критерий сходимости

$$\nabla J_{\text{id}}(p) < \varepsilon. \quad (9)$$

После идентификации цифровой двойник становится репрезентативным.

Этап линеаризации. Линеаризация модели выполняется в рабочей точке с использованием матриц Якоби

$$A = \frac{\partial f}{\partial x}, \quad B = \frac{\partial f}{\partial u}, \quad \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u. \quad (10)$$

Этап дискретизации с шагом Δt дает

$$x_{k+1} = \Phi_{x_k} + \Gamma_{u_k}, \quad (11)$$

где

$$\Phi = e^{A \Delta t}, \quad \Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A(\Delta t - \tau)} B d\tau.$$

В табл. 1 приведены числовые значения коэффициентов полученных уравнений для теплообменного аппарата в рабочей точке (расход греющего теплоносителя 12,5 м³/ч, температура входа 85 °С) при порядке модели $n = 2$ и шаге дискретизации $\Delta t = 10$ с.

Для теплообменного аппарата с характерным временем переходного процесса $\tau \approx 120\text{--}180$ с и шагом дискретизации $\Delta t = 10$ с приняты следующие параметры горизонта:

- горизонт прогноза $N_p = 18$ тактов (180 с);
- горизонт управления $N_u = 6$ тактов (60 с).

Задача предиктивного управления формулируется как поиск вектора управления u , минимизирующего квадратичный функционал J :

$$J = \sum_{i=1}^N \|y_{k+i} - r_{k+i}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \|u_{k+i}\|_R^2, \quad (12)$$

где $y_{k+i} - r_{k+i}$ – ошибка отслеживания задания (отклонения); Δu – изменение управления; Q, R – весовые коэффициенты матрицы.

При проведении оптимизации в границах

$$x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max},$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}.$$

Таблица 1

Пример значений коэффициентов уравнения состояния линеаризованной дискретной модели теплообменного аппарата в рабочей точке

Матрица	Значение (пример)
A	$\begin{bmatrix} -0,0412 & 0,0087 \\ 0,0031 & -0,0295 \end{bmatrix}$
B	$\begin{bmatrix} 0,1520 \\ 0,0043 \end{bmatrix}$
C	$[1 \ 0]$
D	0

Далее формируется стандартная квадратичная задача

$$\min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{H} \mathbf{U} + \mathbf{f}^T \mathbf{U}, \quad (13)$$

где $\mathbf{U}$ – вектор искомых переменных; $\mathbf{H}$ – матрица Гессiana (положительно определенная), описывающая кривизну целевой функции; $\mathbf{f}$ – линейный вектор, учитывающий текущую ошибку и состояние системы.

Устойчивость замкнутой системы проверяется решением дискретного уравнения Риккати

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q}, \quad (14)$$

если $\mathbf{P} \geq 0$, система устойчива.

Критерий управляемости Калмана применим к линейной стационарной системе, полученной на этапе линеаризации нелинейной модели в фиксированной рабочей точке и последующей дискретизации. Матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ в данном случае постоянны (не зависят от времени), что обеспечивает корректность применения рангового критерия:

$$\text{rank}[\mathbf{B}, \mathbf{A}\mathbf{B}, \mathbf{A}^2\mathbf{B}, \dots, \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] = n, \quad (15)$$

где n – размерность вектора состояния системы, которая определяется количеством независимых переменных, необходимых для полного описания её динамики.

В случае управления двумя параметрами порядок системы принимается равным $n = 2$. Наблюдаемость проверяется по аналогичной матрице, составленной из $\mathbf{C}$ и $\mathbf{A}$.

Алгоритм синтеза предиктивного управления:

1. Определение вектора состояний и управляющих воздействий.
2. Задание технологических ограничений.
3. Построение динамической модели в MPC и параметрическая идентификация по данным SCADA (минимизация функции ошибки градиентным методом).
4. Линеаризация в рабочей точке с использованием матриц Якоби и дискретизация с шагом Δt .
5. Формулировка задачи оптимизации: поиск вектора управления $\mathbf{u}$, минимизирующего квадратичный функционал J с весовыми коэффициентами и ограничениями.
6. Проверка устойчивости (уравнение Риккати), управляемости и наблюдаемости (критерий Калмана).

Последовательность операций на каждом такте управления наглядно иллюстрирует обобщённая структурная схема контура краткосрочного прогнозирования и предиктивного управления теплообменным аппаратом (рис. 1).

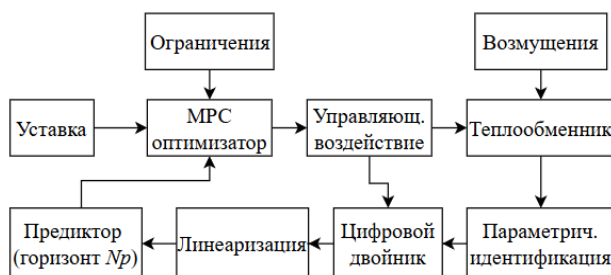


Рис. 1. Обобщённая структурная схема контура краткосрочного прогнозирования и предиктивного управления теплообменным аппаратом

Результаты и обсуждение

Для разработанного цифрового двойника теплообменного аппарата проведено сравнение расчётных статических характеристик с паспортными данными (табл. 2). Максимальная относительная погрешность составила 13,5%, что позволяет считать модель адекватной для синтеза алгоритмов управления.

Для подтверждения расчётных данных в динамике выполнен численный эксперимент в среде MatLab: получены переходные характеристики температур горячего и холодного потоков на выходе теплообменного аппарата при ступенчатом возмущении по расходу теплоносителя (рис. 2).

Разработанный цифровой двойник обладает потенциалом для реализации предиктивного управления. Как показано в работе [15], применение MPC для нелинейных объектов со значительным запаздыванием позволяет повысить качество регулирования более чем на 20% по сравнению с ПИД-регулятором.

Однако в работе [15] рассматривался общий подход к синтезу регулятора, тогда как в настоящей статье предложена полная методика – от построения цифрового двойника в отечественной среде имитационного моделирования MAPS до формирования квадратичной задачи оптимизации с учётом специфики нефтегазоподготовки (изменчивость сырья, жёсткие ограничения по давлению/температуре).

Таблица 2
Сравнение расчётных статических характеристик с паспортными данными

Параметр	Паспортные данные	Расчетные данные	Отклонение, %
Тепловая нагрузка	1 250	1 315	5,2
Коэффициент теплопередачи	480	545	13,5
Сопротивление в трубах	45	39	13,3
Сопротивление в межтрубном пространстве	60	52	6,6

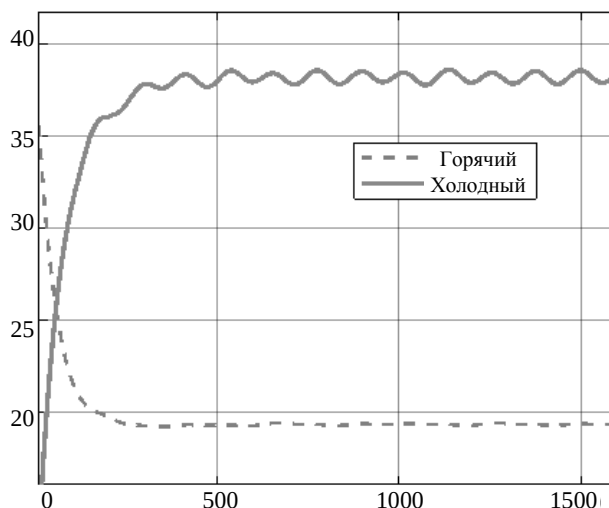


Рис. 2. Зависимость температур горячего и холодного потоков на выходе теплообменного аппарата при ступенчатом возмущении по расходу теплоносителя

Заключение

Показано, что метод компонентных цепей, реализованный в среде MAPS, обеспечивает формирование адекватных динамических моделей (цифровых двойников) технологических аппаратов с учётом нелинейности, инерционности и перекрёстных связей.

Предложена методика параметрической идентификации моделей на основе ретроспективных данных SCADA, позволяющая адаптировать цифровой двойник к реальным условиям эксплуатации.

Описана процедура перехода от нелинейной модели ДАУ к линейному дискретному представлению в пространстве состояний, пригодному для решения задачи оптимального управления.

Сформулирована постановка задачи предиктивного управления на скользящем горизонте с квадратичным критерием качества и учётом технологических ограничений.

Перспективы дальнейших исследований:

- отказ от линеаризации в пользу нелинейного решателя NMPC [16–18] в реальном времени для расширения рабочей области;
- интеграция разработанного алгоритма в промышленный контур АСУ ТП с тестированием на реальном объекте нефтегазоподготовки;
- разработка адаптивного механизма коррекции весовых коэффициентов функционала J в зависимости от режима эксплуатации.

Практическая реализация предложенного подхода открывает возможности для повышения энергоэффективности и надёжности функционирования промышленных объектов за счёт перехода от классического регулирования к усовершенствованному управлению на основе прогнозирующих моделей.

Литература

1. Model predictive control for gas turbine shaft speed based on model compensation using extended state observer / F. Zhang, Ya. Xue, B. Wei, B. Zhang // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – 2023. – Vol. 237, No. 3. – P. 513–523. DOI: 10.1177/09596518221127511.
2. Fan Sh. Model predictive current control method for PMSM drives based on an improved prediction model / Sh. Fan, Ch. Tong // *Journal of Power Electronics*. – 2020. – Vol. 20. – P. 1456–1466. DOI: 10.1007/s43236-020-00125-4.
3. Optimization of an Integrated Production Model Using Long Short-Term Memory and Model Predictive Control under Constraints / M. Fadaei, M. Ja. Ameri, Y. Raffei et al. // *Digital Technologies Research and Applications*. – 2025. – Vol. 4, No. 3. – P. 97–112. DOI: 10.54963/dtra.v4i3.1604.
4. The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin / C. Zhuang, T. Miao, J. Liu, H. Xiong // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2021. – Vol. 68. – P. 102075. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102075.
5. Hypermedia-based digital twin ecosystems: A proposal for digital twin interoperability / A. Giulianelli, S. Burattini, A. Ciorrea, A. Ricci // *Future Generation Computer Systems*. – 2026. – Vol. 177. – P. 108219. DOI: 10.1016/j.future.2025.108219.
6. Дмитриев В.М. Методика построения многоуровневых компонентных цепей для моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа // *Доклады ТУСУР*. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 98–102. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-82-86.
7. Дмитриев В.М. Среда многоуровневого компьютерного моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа. – Томск: Изд-во ТГУ, 2017. – 332 с. – ISBN 978-5-7511-2514-1.
8. Мануйлов Ю.С. Линеаризация модели движения многосвязного динамического объекта методом псевдоординатной линеаризации / Ю.С. Мануйлов, А.В. Толоконников // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. – 2025. – № 3 (43). – С. 58–67. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-58-67.
9. Гаюбов Т.Н. Некоторые проблемы теории линеаризации приемной информации микропроцессорного приемника рельсовых цепей кодовой автоблокировки / Т.Н. Гаюбов, А.Н. Садиков, С.К. Убайдуллаев // *Universum: технические науки*. – 2022. – № 4-12 (97). – С. 59–62.
10. Курбаншоев С.З. Решение систем разностных уравнений при помощи функций Ляпунова / С.З. Курбаншоев, Н.С. Якубов // *Вестник Бохтарского гос. ун-та им. Носира Хусрава. – Сер. естественных наук*. – 2026. – № 2-1 (144). – С. 5–7.
11. Alov R.D. Numerical study of Lyapunov stability of an upwind difference scheme for a quasilinear hyperbolic system / R.D. Alov, A.S. Berdishev, D.E. Nematova // *Problems of Computational and Applied Mathematics*. – 2025. – No. 3(67). – P. 83–96. DOI: 10.71310/pcam.3_67.2025.07.
12. Кочергин М.И. Методика и алгоритмы визуального моделирования непрерывных и дискретно-непрерывных физико-технических задач методом компонентных цепей: специальность 05.13.18: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 2019. – 242 с.
13. Захаров М.Е. Применение компьютерного моделирования для усовершенствованного управления перекачивания углеводородного сырья с целью исключения гидроударов в трубопроводной системе / М.Е. Захаров, Т.В. Ганджа // *Электронные средства и системы управления: матер. докладов XXI Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч.* – Томск: ТУСУР; В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2025. – Ч. 2. – С. 171–173.
14. Захаров М.Е. Применение метода прогнозирующего управления модели для оптимизации автоматизированных систем управления технологическими процессами нефтегазовых объектов // *Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений: сб. тезисов VIII науч.-техн. конф., Томск, 24–25 сентября 2025 г.* – Томск: ООО «РН-Проектирование Добыча», 2025. – С. 233–236.
15. Колодин А.А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели / А.А. Колодин, В.В. Елшин // *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. – Сер.: Технические науки*. – 2021. – Т. 29, № 1(69). – С. 36–45. DOI: 10.14498/tech.2021.1.3.
16. Hierarchical NMPC for energy-efficient torque vectoring in four in-wheel motor electric vehicles / S. Park, Ju. Kim, D.G. Nguyen et al. // *Control Engineering Practice*. – 2025. – Vol. 164. – P. 106477. DOI: 10.1016/j.conengprac.2025.106477.
17. NMPC design for a self-aligning compliant gait rehabilitation robot / Y. Jin, T. Goyal, P. K. Jamwal et al. // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2025. – Vol. 194. – P. 105128. DOI: 10.1016/j.robot.2025.105128.
18. Xu J. N-GKLS: An NMPC problem generator and a test platform for NMPC solvers / J. Xu, L. Xu // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – Vol. 214. – P. 119029. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119029.

Захаров Михаил Евгеньевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050;
инж. проектирования АСУ 1-го уровня отд. АСУ ТП
ООО «РН-Проектирование Добыча»
Говорова ул., 196, г. Томск, Россия, 634057
Тел.: +7-913-869-99-40
Эл. почта: eprsn97@mail.ru

Чернышов Михаил Николаевич

Вед. инж. отд. концептуального проектирования
ООО «РН-Проектирование Добыча»
Мира пр-т, 70А, г. Томск, Россия, 634027;
аспирант Национального исследовательского
Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77
Эл. почта: mixailcher35@gmail.com

Дмитриев Вячеслав Михайлович

Д-р техн. наук, проф. КСУП ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-1089-6993
Тел.: +7-913-867-01-56
Эл. почта: dmitriewvm@gmail.com

Захаров Кирилл Евгеньевич

Специалист инженерной школы ядерных технологий
(ИЯТШ) НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77
Эл. почта: kzaharov18@gmail.com

Ульев Леонид Михайлович

Д-р техн. наук, проф. НИ ТПУ
Ленина пр-т, 30, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-2732-6444
Тел.: +7 (382-2) 70-17-77
Эл. почта: uljevml@mail.ru

Поступила в редакцию: 03.03.2026.

Принята к публикации: 19.08.2026.

Zakharov M.E., Chernyshov M.N., Dmitriev V.M.,
Zakharov K.E., Uliev L.M.

Methodology for nonlinear predictive control of oil and gas treatment complexes

Relevance. The nonlinearity, inertia, and cross-couplings inherent in oil and gas treatment processes, combined with strict technological constraints, reduce the efficiency of conventional automatic control systems and necessitate the transition to predictive control algorithms based on digital twins. **Purpose of the study.** Development of a methodology for nonlinear predictive control of oil and gas treatment complexes based on a digital twin implemented in the domestic MARS simulation environment. **Methods.** Parametric identification is performed using retrospective SCADA data via gradient correction; linearization at the operating point is carried out using Jacobian matrices followed by discretization. The optimal control problem is reduced to quadratic programming on a receding horizon. Stability, controllability, and observability of the closed-loop system are analyzed. Model verification is conducted against nameplate data

and through numerical experiments in MATLAB. **Scientific novelty.** For the first time, a methodology is proposed for integrating a digital twin built by the component chain method into the predictive control loop, which accounts for the specifics of identification based on industrial SCADA data, explicit technological constraints, and Lyapunov stability verification. An algorithm is developed for converting a nonlinear differential-algebraic model into a quadratic optimization problem solvable in real time. **Results.** The adequacy of the heat exchanger digital twin has been confirmed: the deviation of the calculated steady-state characteristics from the nameplate values does not exceed 13.5%, and the transient responses agree with the verification computation performed in MATLAB. The correctness of the linearization and discretization procedures is substantiated by verifying the Kalman controllability and observability criteria and by solving the Riccati equation. The problem statement for constrained receding-horizon predictive control has been formulated. **Practical significance.** The methodology is intended for implementation in the industrial control systems (ICS) of oil and gas field treatment facilities. Its application is expected to enhance energy efficiency and control reliability, reduce the oscillations of process parameters, and can be used in the design of advanced control systems for heat exchange equipment.

Keywords: predictive control, simulation modeling, digital twin, MARS simulation environment, component chain method, oil and gas treatment, nonlinear systems, optimization, heat exchangers, industrial control systems (ICS).

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-129-134

References

1. Zhang F., Xue Y., Wei B., Zhang B. Model predictive control for gas turbine shaft speed based on model compensation using extended state observer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2023, vol. 237, no. 3, pp. 513–523. DOI: 10.1177/09596518221127511.
2. Fan S., Tong C. Model predictive current control method for PMSM drives based on an improved prediction model. *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1456–1466. DOI: 10.1007/s43236-020-00125-4.
3. Fadaei M., Ameri M.J., Rafiei Y., Al-Alimi A., Hatami Golmakani H., Vafadar Eidgahi M.M. Optimization of an Integrated Production Model Using Long Short-Term Memory and Model Predictive Control under Constraints. *Digital Technologies Research and Applications*, 2025, vol. 4, no. 3, pp. 97–112. DOI: 10.54963/dtra.v4i3.1604.
4. Zhuang C., Miao T., Liu J., Xiong H. The connotation of digital twin, and the construction and application method of shop-floor digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, vol. 68, Art. 102075. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.102075.
5. Giulianelli A., Burattini S., Ciortea A., Ricci A. Hypermedia-based digital twin ecosystems: A proposal for digital twin interoperability. *Future Generation Computer Systems*, 2026, vol. 177, art. 108219. DOI: 10.1016/j.future.2025.108219.
6. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. [Method to construct multilevel component chains for modeling chemical-technological systems]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 98–102. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-82-86 (in Russ.).
7. Dmitriev V.M., Gandzha T.V. *Sreda mnogourovnevnogo kompyuternogo modelirovaniya khimiko-tehnologicheskikh sistem* [Multilevel computer modeling environment for chemical-technological systems]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 332 p. (in Russ.).

8. Manuylov Yu.S., Tolokonnikov A.V. [Linearization of the motion model of a multi-connected dynamic object by pseudo-coordinate linearization]. *Intellectual Technologies on Transport*, 2025, no. 3(43), pp. 58–67. DOI: 10.20295/2413-2527-2025-343-58-67 (in Russ.).
 9. Gayubov T., Sadikov A., Ubaydullayev S. Some problems of the theory of linearization of receiving information of a microprocessor receiver of code auto-locking rail circuits. *Universum: Technical Sciences*, 2022, no. 4-12 (97), pp. 59–62.
 10. Kurbanshoyev S.Z., Yakubov N.S. [Solving systems of difference equations using Lyapunov functions]. *Bulletin of Bokhtar State University named after Nosiri Khusrav. Series of natural sciences*, 2026, no. 2-1 (144), pp. 5–7 (in Russ.).
 11. Aloev R.D., Berdishev A.S., Nematova D.E. Numerical study of Lyapunov stability of an upwind difference scheme for a quasilinear hyperbolic system. *Problems of Computational and Applied Mathematics*, 2025, no. 3(67), pp. 83–96. DOI: 10.71310/pcam.3_67.2025.07.
 12. Kochergin M.I. *Metodika i algoritmy vizual'nogo modelirovaniya nepreryvnykh i diskretno-nepreryvnykh fiziko-tekhnicheskikh zadach metodom komponentnykh tsepey* [Methodology and algorithms for visual modeling of continuous and discrete-continuous physical and technical problems by the method of component circuits. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2019, 242 p (in Russ.).
 13. Zakharov M.E., Gandzha T.V. *Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya dlya usovershenstvovannogo upravleniya perekachivaniya uglevodorodnogo syr'ya s tsel'yu iskhlyucheniya gidroudarov v truboprovodnoy sisteme* [Application of computer modeling for improved control of hydrocarbon raw materials pumping to eliminate water hammers in the pipeline system]. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. [Electronic control means and systems]*. Proc. of the XXI International Scientific and Practical Conference, Tomsk, TUSUR, V-Spectr (Individual Entrepreneur V.M. Bochkareva), 2025, 2nd part, pp. 171–173 (in Russ.).
 14. Zakharov M.E. *Primenenie metoda prognoziruyushchego upravleniya modeli dlya optimizatsii avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami neftegazovykh ob'ektov* [Application of the model predictive control method for optimizing automated control systems for technological processes of oil and gas facilities]. *Tekhnologii obustroystva neftyanykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy [Technologies for the development of oil, gas and gas condensate fields]* Proc. of the VIII scientific and technical conf., Tomsk, LLC «RN-Upstream Design», September 24–25, 2025, pp. 235–236 (in Russ.).
 15. Kolodin A.A., Elshin V.V. [Research and development of the controller based on the model predictive control]. *Vestnik of Samara State Technical University (Technical Sciences Series)*, 2021, vol. 29, no. 1 (69), pp. 36–45. DOI: 10.14498/tech.2021.1.3 (in Russ.).
 16. Park S., Kim Ju., Nguyen D.G. et al. Hierarchical NMPC for energy-efficient torque vectoring in four in-wheel motor electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 2025, vol. 164, pp. 106477. DOI: 10.1016/j.conengprac.2025.106477.
 17. Jin Y., Goyal T., Jamwal P. K. et al. NMPC design for a self-aligning compliant gait rehabilitation robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2025, vol. 194, pp. 105128. DOI: 10.1016/j.robot.2025.105128.
 18. Xu J., Xu L. N-GKLS: An NMPC problem generator and a test platform for NMPC solvers. *Expert Systems with Applications*, 2023, vol. 214, pp. 119029. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119029.
-
- Mikhail E. Zakharov**
Postgraduate Student, Department of Computer Control and Design Systems (CCDS), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050;
Control System Design Engineer (Level 1) Industrial Automation Department (I&C), LLC «RN-Upstream Design»
19b, Govorova St., Tomsk, Russia, 634057
Phone: +7-913-869-99-40
Email: epsn97@mail.ru
- Mikhail N. Chernyshov**
Lead Engineer, Conceptual Design Department, LLC «RN-Upstream Design»
70A, Mira Ave., Tomsk, Russia, 634027;
Postgraduate Student,
National Research Tomsk Polytechnic University (TPU)
30, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-17-77
Email: mixailcher35@gmail.com
- Vyacheslav M. Dmitriev**
Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department of CCDS, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-1089-6993
Phone: +7-913-867-01-56
Email: dmitriewvm@gmail.com
- Kirill E. Zakharov**
Specialist, School of Nuclear Science & Engineering, TPU
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia
Phone: +7 (382-2) 70-17-77
Email: kzaharov18@gmail.com
- Leonid M. Uliev**
Doctor of Science in Engineering, Professor, TPU
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia.
ORCID: 0000-0002-2732-6444
Phone: +7 (382-2) 70-17-77
Email: ulyevlm@mail.ru
- Received: 03.03.2026.
Accepted: 19.08.2026.