

Сравнительный анализ применения систем управления с прогнозирующей моделью различных конфигураций на примере гидравлического стенда

Д. А. Мельник¹, Р. Л. Барашкин², В. Е. Попадько³

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

¹dima.mel00@gmail.com, ²barashkin.r@gubkin.ru, ³pve@gubkin.ru

Аннотация. В работе сравнивается качество регулирования системы управления на основе прогнозирующей модели различных конфигураций для стабилизации уровня жидкости в гидравлическом стенде. Рассматривается две конфигурации системы с одним входом и одним выходом, и многими входами и одним выходом. Для реализации регулятора разработана математическая модель объекта управления в пространстве состояний. Задан критерий качества управления и ограничения для решения задачи оптимального управления с конечным горизонтом. Задача оптимального управления в реальном режиме времени решалась с помощью квадратичного программирования в среде разработки LabView. Сравнение качества регулирования предложенных систем управления осуществлялось с помощью интегрального критерия.

Ключевые слова: управление с прогнозирующей моделью, системы с многими входами и одним выходом, системы управления, оптимальное управление с ограничениями, модель в пространстве состояний.

I. ВВЕДЕНИЕ

Управление на основе прогнозирующей модели (model predictive control) широко применяется в промышленности [1–3]. Одним из преимуществ данного подхода является возможность явно учитывать ограничения, накладываемые на состояния входов и выходов при решении задачи оптимального управления. Модель объекта управления используется для онлайн-расчета оптимального управления с конечным горизонтом времени. Используемый математический аппарат позволяет переходить от простых систем с одним входом и одним выходом (single-input, single-output) к многоканальным системам с несколькими входами и несколькими выходами (multiple-input, single-output) [4].

В работе сравнивается система управления с одним входом и одним выходом с системой с двумя входами и одним выходом на примере гидравлического стенда. Входами являются степень открытия входного клапана и мощность насоса, а выходом – уровень воды в ёмкости.

II. УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

A. Модель в пространстве состояний

Управление на основе прогнозирующей модели решает задачу минимизации целевой функции стоимости J , характеризующей близость к заданным значениям

регулируемого параметра при формировании сигнала управления в заданных ограничениях [5].

В качестве основы для расчета алгоритма с прогнозирующей моделью используется передаточная функция объекта, полученная экспериментально на гидравлическом стенде.

Передаточная функция объекта переводится в дискретную модель в пространстве состояний, которая в общем случае записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где A , B , C и D – матрицы коэффициентов состояния, x_k – вектор переменных состояния, u_k – вектор управляющих воздействий, y_k – вектор измерений регулируемых величин. Шаг дискретизации Δt выбирается эмпирически.

Для решения задачи минимизации функционала качества [6] необходимо явно выразить вектор измерений регулируемых величин y через приращения вектора управляющих воздействий Δu . Дискретная модель в пространстве состояний относительно приращений для модели (1) записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \Delta x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A & 0 \\ CA & E_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ CB \end{pmatrix} \Delta u_i \\ p_{i+1} & \quad \bar{A} \quad p_i \quad \bar{B} \\ \bar{C} &= [E_0 \ 1], \end{aligned}$$

где E_0 – нулевая матрица; \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} – матрицы модели в пространстве состояний относительно приращений; p_i – вектор переменных пространства состояний и регулируемой величины.

Запишем прогноз вектора измерений y в k момент времени на P шагов вперед, как функцию от управляющего воздействия в отклонениях Δu :

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= \bar{C} p_{k+1} = \bar{C} \bar{A} p_k + \bar{C} \bar{B} \Delta u_k, \\ y_{k+2} &= \bar{C} p_{k+2} = \bar{C} \bar{A} p_{k+1} + \bar{C} \bar{B} \Delta u_{k+1} \\ &= \bar{C} \bar{A}^2 p_k + \bar{C} \bar{A} \bar{B} \Delta u_k + \bar{C} \bar{B} \Delta u_{k+1}, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$y_{k+P} = \bar{C}p_{k+P} = \bar{C}\bar{A}^P p_k + \bar{C}\bar{A}^{P-1}\bar{B}\Delta u_k + \bar{C}\bar{A}^{P-2}\bar{B}\Delta u_{k+1} + \dots + \bar{C}\bar{B}\Delta u_{k+P-1}$$

Запишем в векторном виде:

$$\bar{y} = Lp_k + M\bar{\Delta}u,$$

где

$$M = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{B} & 0 & \dots & 0 \\ \bar{C}\bar{A}\bar{B} & \bar{C}\bar{B} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{C}\bar{A}^{P-1}\bar{B} & \bar{C}\bar{A}^{P-2}\bar{B} & \dots & \bar{C}\bar{B} \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} \bar{C}\bar{A} \\ \bar{C}\bar{A}^2 \\ \dots \\ \bar{C}\bar{A}^P \end{pmatrix}$$

В. Критерий оценки качества при решении задачи оптимального управления на основе прогнозирующей модели

Для решения задачи оптимального управления на основе прогнозирующей модели выбирается функция стоимости J в виде интегрального критерия качества второго порядка:

$$J = \sum_{i=1}^{\infty} (\tilde{y}_i - r_i)^T (\tilde{y}_i - r_i),$$

где \tilde{y}_i – прогнозные значения вектора регулируемых величин, r_i – вектор заданных значений.

Рассмотренный критерий не учитывает возможные колебания управляющего воздействия u при близких значениях текущего измерения регулируемой величины y к заданному значению. Колебания управляющего воздействия негативно скажутся на длительности периода эксплуатации исполнительных устройств. Для снижения колебаний необходимо реализовать возможность задания весов для сигнала рассогласования $(\tilde{y}_i - r_i)$ и управляющего воздействия (u_i) . В модифицированной функции стоимости \tilde{J} величины весов сигнала рассогласования и управляющего воздействия задаются в матрицах R_i и Q_i соответственно:

$$\tilde{J} = \tilde{J}(\tilde{y}, \tilde{u}) = \sum_{i=1}^{\infty} [(\tilde{y}_i - r_i)^T R_i (\tilde{y}_i - r_i) + u_{i-1}^T Q_i u_{i-1}],$$

где R и Q – диагональные матрицы весов.

Для численной реализации алгоритма управления на основе прогнозирующей модели будет использоваться конечный горизонт прогноза P и астатический регулятор с прогнозирующей моделью, минимизирующий функционал качества \tilde{J}_P относительно приращений по управлению Δu :

$$\tilde{J}_P(\bar{y}, \bar{\Delta}u) = \sum_{j=1}^P [(y_j - r_j)^T R_j (y_j - r_j) + \Delta u_{j-1}^T Q_j \Delta u_{j-1}] \quad (2)$$

С. Ограничения

При реализации алгоритма оптимального управления накладываются ограничения на регулируемую величину

u , управляющую величину u и на скорость изменения управляющей величины Δu [7]. В лабораторном стенде регулируемая величина (уровень) изменяется от 1 до 12 см. Управляющий сигнал (степень открытия клапана и мощность насоса) изменяется от 0 до 1. Для увеличения срока службы исполнительного устройства целесообразно ограничивать скорость изменения управляющего сигнала Δu .

Ограничения $\bar{u}_{max}, \bar{u}_{min}, \Delta \bar{u}_{max}, \bar{u}_{min}, \bar{y}_{max}, \bar{y}_{min}$ задаются в виде матриц следующих размеров: для регулируемой величины $[r \cdot P]$, для управляющего воздействия и скорости его изменения $[m \cdot P]$, где P – количество шагов прогнозирования, r – количество входов, m – количество выходов. Запишем следующие ограничения:

$$\begin{pmatrix} \Delta \bar{u}_{min} \\ \bar{u}_{min} - M_0 u_{k-1} \\ \bar{y}_{min} - Lp_k \end{pmatrix} < \begin{pmatrix} E \\ M_u \\ M \end{pmatrix} x < \begin{pmatrix} \Delta \bar{u}_{max} \\ \bar{u}_{max} - M_0 u_{k-1} \\ \bar{y}_{max} - Lp_k \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где E – единично-диагональная матрица; M – матрица коэффициентов при $\Delta \bar{u}$, M_u – единично-диагональная матрица, схожая по конструкции с матрицей M ; M_0 – матрица конструкции $(E_1; E_2; \dots E_P)$; u_{k-1} – управляющий сигнал на прошлом шаге управления, x – вектор прогнозных значений $\Delta \bar{u}, \bar{u}, \bar{y}$.

Для решения задачи оптимального управления (2) с учетом ограничений (3) с помощью квадратичного программирования перепишем функционал в следующем виде:

$$\min J_k(\Delta \bar{u}) = \frac{1}{2} \Delta \bar{u}^T H \Delta \bar{u} + f^T \Delta \bar{u},$$

$$I_{min} < D \cdot x < I_{max}. \quad (4)$$

Функционал качества управления (2) нужно представить в виде квадратичной формы (4). Ограничения перепишем в зависимости от $\Delta \bar{u}$.

$$\tilde{J}_p(\Delta \bar{u}) = (\bar{y}(\Delta \bar{u}) - \bar{r})^T R (\bar{y}(\Delta \bar{u}) - \bar{r}) + \Delta \bar{u}^T Q \Delta \bar{u}$$

$$\tilde{J}_p(\Delta \bar{u}) = (Lp_k + M\Delta \bar{u} - \bar{r})^T R (Lp_k + M\Delta \bar{u} - \bar{r}) + \Delta \bar{u}^T Q \Delta \bar{u} \quad (5)$$

Раскроем скобки выражения (5) и приведем его к виду (4). В результате преобразования получаем матрицу H и вектор f :

$$H = M^T R M + Q$$

$$f = M^T R L p_k - M^T R \bar{r}$$

Для решения задачи квадратичного программирования в средах LabView и Matlab была использована функция quadprog, которая принимает на вход матрицы $H, f, I_{max}, I_{min}, D$; на выходе рассчитывается вектор управляющих сигналов на P шагов вперед.

III. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Гидравлический стенд

Для сравнительного анализа работы алгоритма управления на основе прогнозирующей модели применялся гидравлический стенд (рис. 1). В состав стенда входит: контроллер ОВЕН ПЛК-160 и Arduino

UNO R3, драйвер двигателя L298N, насос SR-600, электрический клапан TFA20-M-C, поплавковый сигнализатор уровня, ультразвуковой датчик уровня HC-SR04, расходомер YF-B1, источник питания NI PS-15 [8].

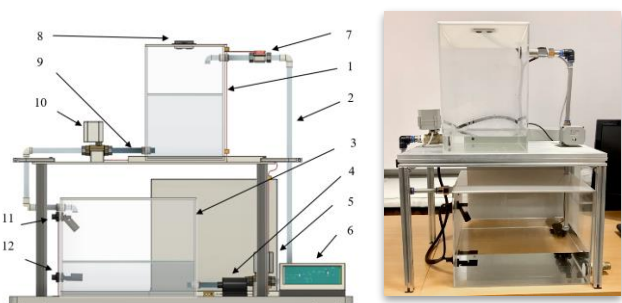


Рис. 1. Внешний вид гидравлического стенда: 1 – резервуар верхний; 2 – трубопровод; 3 – резервуар нижний; 4 – насос; 5 – впускной электрический клапан; 6 – панель управления; 7 – турбинный расходомер; 8 – уровнемер; 9 – трубопровод; 10 – сливной электрический клапан; 11, 12 – сигнализаторы уровня

В работе с помощью алгоритма управления на основе прогнозирующей модели регулируется уровень воды в верхнем резервуаре при помощи входного клапана и насоса.

В. Идентификация параметров модели объекта управления

Для решения задачи оптимального управления на основе прогнозирующей модели требуется построить модель объекта управления [9]. В качестве инструмента для идентификации параметров был использован пакет «System Identification Toolbox» из среды Matlab. На системы с одним входом и одним выходом (ОКС – одноканальная система) и двумя входами и одним выходом (МКС – многоканальная система) были поданы скачки управляющего сигнала. В результате идентификации параметров моделей были получены передаточные функции (6), (7) и построены графики реакции регулируемой величины на скачкообразное изменение управляющего сигнала (рис. 2).

$$W_{\text{ОКС}} = \frac{0.0673}{s^2 + 0.58s + 0.0015} \quad (6)$$

$$W_{\text{МКС1}} = \frac{0.008}{s^2 + 0.0172s + 0.001}$$

$$W_{\text{МКС2}} = \frac{0.003}{s^2 + 0.0175s + 0.0006} \quad (7)$$

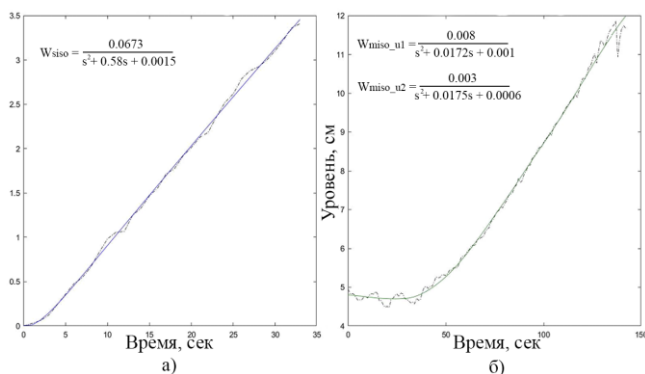


Рис. 2. Графики зависимости уровня жидкости от времени при подаче скачкообразного управляющего сигнала в а) одноканальной и б) многоканальной системах

Полученные передаточные функции (6), (7) переведены в дискретную модель в пространстве состояний с помощью пакета Matlab:

$$A_{\text{ОКС}} = \begin{bmatrix} 0.56 & -0.036 \\ 0.024 & 0.999 \end{bmatrix};$$

$$B_{\text{ОКС}} = \begin{bmatrix} 1.517 \\ 0.026 \end{bmatrix};$$

$$C_{\text{ОКС}} = [0 \quad 1.077];$$

$$A_{\text{МКС}} = \begin{bmatrix} 0.88 & -0.19 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0.98 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.89 & -0.12 \\ 0 & 0 & 0.18 & 0.99 \end{bmatrix};$$

$$B_{\text{МКС}} = \begin{bmatrix} 2.83 & 0 \\ 0.27 & 0 \\ 0 & 1.41 \\ 0 & 0.13 \end{bmatrix};$$

$$C_{\text{МКС}} = [0 \quad 0.51 \quad 0 \quad 0.44].$$

С. Сравнительный анализ систем

На основе полученных моделей в пространстве состояний создается два регулятора стабилизации уровня в резервуаре с прогнозирующей моделью для ОКС и МКС. Первый регулятор для ОКС при помощи изменения степени открытия входного клапана. Второй регулятор для МКС при помощи изменения степени открытия входного клапана и мощности насоса.

Для сравнения качества работы регуляторов используется интегральная абсолютная ошибка (ИАО) [10]:

$$\text{ИАО} = \sum_{i=0}^{t_{\max}} |r_i - y_i|,$$

где r_i – заданное значение, y_i – текущее значение регулируемой величины.

Зададим начальный уровень жидкости в резервуаре y_0 равным 4 см. Заданное значение уровня r – 10 см. Переведем положение клапана u_1 в 0, а также полностью отключим насос $u_2 = 0$. Для рассматриваемого гидравлического стенда были заданы следующие ограничения: $u_{\max} = 1$, $u_{\min} = 0$, $\Delta u_{\max} = 0.3$, $\Delta u_{\min} = 0$, $u_{\max} = 12$, $u_{\min} = 1$. Элементы весовых матриц R и Q равны 1.

После установленных начальных условий был выполнен эксперимент, в котором менялось количество шагов прогнозирования P . Полученные результаты приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ИАО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ШАГАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Р шагов	Система	ИАО	t_{\max} сек
4	ОКС	196	112
	МКС	190.16	90
8	ОКС	193	80
	МКС	190.15	90
12	ОКС	192.6	70
	МКС	190.12	90
18	ОКС	192.6	70
	МКС	190	85

С увеличением шагов прогнозирования P снижается ИАО (табл. 1), т.е. регулятор быстрее приводит

регулируемую величину к заданному значению. Стоит заметить, что для МКС шаги прогнозирования значительно не понижают ИАО и время регулирования, в то время, как в ОКС изменение шагов прогнозирования значительно влияют на время регулирования и в меньшей степени на ИАО. На рис. 3 представлены графики регулирования для ОКС и МКС при $P = 12$.

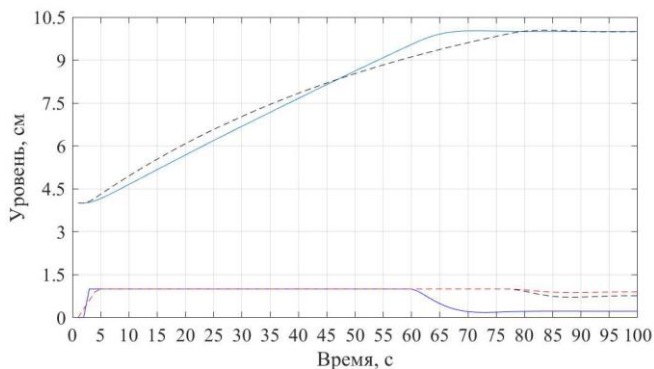


Рис. 3. Графики реакции одноканальной (сплошная линия) и многоканальной (пунктирная линия) систем на изменение заданного значения регулируемой величины с 4 см до 10 см

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение регулятора с прогнозирующей моделью с двумя входами и одним выходом незначительно лучше показателей качества работы регулятора с одним входом и одним выходом.

При выборе системы регулирования стоит учитывать вычислительную мощность устройства, где выполняется расчет алгоритма управления на основе прогнозирующей модели. Получение математической модели многоканальной системы занимает достаточно более длительное время по сравнению с одноканальной. Если вычислительное устройство способно выполнять расчет алгоритма управления на основе прогнозирующей модели на 12 и более шагов вперед с требуемой частотой, то целесообразно выбирать более простую одноканальную систему.

При недостаточной мощности вычислительного устройства предлагается выбирать многоканальную систему, которая обеспечивает заданное качество регулирования за 4–8 шагов прогнозирования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность доценту кафедры Автоматизация технологических процессов РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина Южанину Виктору Владимировичу за ценные советы при проведении исследования и рекомендации по подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] H. Zabiri, Y. Samyudia, "A hybrid formulation and design of model predictive control for system under actuator saturation and backlash," *Journal of Process Control* 16, 2006. P. 693-709.
- [2] Manfred Morari, Miroslav Barić, "Recent developments in the control of constrained hybrid system," *Computer and Chemical Engineering* 30, 2006. P. 1619-1631.
- [3] S.J. Qin, T.A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control Engineering Practice*, 2003. P. 1-32.
- [4] Bojan Likar, Juš Kocijan, "Predictive control of gas-liquid separation plant based on a Gaussian process model," *Computer and Chemical Engineering* 31, 2007. P. 142-152.
- [5] Yuzhanin V.V. Automatic pressure control system with prediction and compensation of pressure waves // *Automation, telemechanization and communication in the oil industry* № 5 (550), 2019. P. 5-10.
- [6] Barashkin R.L., Yuzhanin V.V. Centralized system of automatic control of the main oil pipeline with a predictive model // *Scientific conference on control problems in technical systems. – St. Petersburg.*, 2015. P. 150–154
- [7] Veksler A., Johansen T.A., Borrelli F., Realfsen B., Dynamic positioning with model predictive control // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016. P.14.
- [8] Rawlings, J.B. *Model Predictive Control: Theory and Design* / J.B. Rawlings, D.Q. Mayne // Madison: Nob Hill Publishing. 2009. P. 11-20.
- [9] Roman Barashkin, Vladimir Popadko, Shokhrukh Abdivoitov. Laboratory Stand for Study Process Dynamics and Control/ // *2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 17-19 November 2022. INSPEC Accession Number: 22480744. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002967.
- [10] Badgwell T.A. *Model-Predictive Control in Practice* / T.A. Badgwell, S.J. Qin // *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. 2015. pp.1-6. DOI:10.1007/978-1-4471-5102-9_8-1