

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ И УРОВНЯ ВОДЫ В ТЕПЛОВЫХ И ЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С ПОМОЩЬЮ РЕГУЛЯТОРА С ПРЕДСКАЗАНИЕМ

© 2021 г. З. Лайдани^{1,*}, А. О. Толоконский¹, К. К. Абдулрахим¹, М. Уахуене¹, Р. Беррекси¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

*e-mail: laidani.zahir@gmail.com

Поступила в редакцию 22.06.2020 г.

После доработки 11.03.2021 г.

Принята к публикации 12.03.2021 г.

Контроль уровня жидкости и температуры используются в различных отраслях промышленности, а также в энергоблоках атомных электростанций. Уровень воды и температура играют важную роль на атомных и тепловых электростанциях. Регулятор с предсказанием контролируемого параметра — это алгоритм управления с обратной связью, который использует модель для предсказания будущих результатов процесса. Регулятор с предсказанием использует модель системы для прогнозирования ее будущего поведения для оперативной оптимизации процесса управления, чтобы выбрать наилучшее управляющее действие, которое приводит прогнозируемый выходной сигнал к эталонному значению. В этой статье предлагается модель регулятора с предсказанием для контроля температуры и уровня воды. Регулятор с предсказанием имеет два входа: от датчика температуры и уровня воды. Система базируется на математической модели задачи, а затем разрабатывается пространственная модель. Эти системы с несколькими входами и несколькими выходами используются в качестве испытательного стенда для нахождения оптимальной последовательности управляющих выходов, которые приводят прогнозируемую регулируемую величину выходное значение системы к заданному значению путем изменения горизонта прогнозирования и горизонта управления.

Ключевые слова: регулятор с предсказанием, управление с обратной связью, математическая модель, горизонт управления, горизонт прогнозирования

DOI: 10.1134/S2304487X21010119

ВВЕДЕНИЕ

Регулятор с предсказанием модели использует ряд контролируемых переменных для оптимизации процесса управления [1, 2]. MPC (Model predictive Controller) широко используется в различных областях, включая ядерные и тепловые процессы [3, 4]. MPC (Model predictive Controller) может применяться для оперативной оптимизации процесса в режиме реального времени. Математическая модель установки используется для построения прогнозов будущего поведения системы на конечном горизонте управления, а также решение о стоимости управляющего воздействия и определяет оптимальный входной сигнал для системы управления [5]. Для создания и выбора управляющего воздействия алгоритм MPC (Model predictive Controller) повторяется, и первое управляющее воздействие выполняется в последовательности предсказанных будущих управляющих воздействий. MPC (Model predictive Controller) может обрабатывать линейные или нелинейные ограничения равенства или неравен-

ства, множественные входы и выходы, а также линейные или нелинейные модели объекта управления [6].

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА С ПРЕДСКАЗАНИЕМ, ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Значение управляющего воздействия на шагах управления для определенного горизонта N называются горизонтом прогнозирования. Горизонт прогнозирования N — это будущие выходные значения для исполнительного механизма и регулирующего органа системы управления, которые предсказываются в каждый момент времени t с помощью математической модели объекта управления. Предсказываемые управляющие значения $y(t + k|t)$ для $k = 1, \dots, N$ зависят от известных значений момента t и будущих управляющих сигналов $u(t + k|t)$, $k = 0, \dots, N - 1$, которые должны быть рассчитаны на основе данных о состоянии системы управления и сгенерированных

управляющих значениях, которые были применены на прошлых шагах управления [7].

1. Набор управляющих сигналов для следующего шага управления вычисляется путем оптимизации определенного критерия с целью поддержания процесса как можно ближе к заданной оптимальной траектории $w(t + k)$. Обычно, на практике, чаще всего принимают критерий минимума среднеквадратической ошибки между прогнозируемым выходным сигналом и ожидаемой эталонной траекторией [8].

2. Весь ресурс управления заключен в большинстве случаев целевую функцию – которая определяется выбранным критерием управления. Явное решение может быть получено, если критерий является квадратичным, а математическая модель объекта управления является линейной или линеаризованной, и при этом нет существенных ограничений на ресурс управляющих воздействий. В противном случае, должен использоваться метод итеративной оптимизации. Некоторые предположения о структуре будущего закона управления также делаются в части того, что он будет постоянным и неизменным с определенного момента времени до окончания горизонта управления [9].

3. Управляющий сигнал $u(t|t)$ поступает на исполнительный механизм и регулирующий орган, в то время как следующие вычисленные управляющие воздействия отклоняются на данном шаге (такте) управления, поскольку на следующем шаге управления $y(t + 1)$ управляющее значение уже известно (рассчитано заранее) и следующий шаг управления выполняется с новым значением, и все последовательности обновляются. Таким образом, вычисляется $u(t + 1|t + 1)$ (которое, в принципе, может отличаться от $u(t + 1|t)$ из-за новой доступной информации о состоянии объекта управления) с использованием принципов отступающего горизонта. Данное обозначение указывает, что значение переменной в момент $t + k$ было рассчитано в момент t , то есть заранее [10].

Предположим, что имеется объект управления с m входами, q выходами и n состояниями. Будем считать, что количество выходов объекта управления меньше или равно количеству входов. Если количество выходов объекта управления больше количества входов, то в данном случае, теряется возможность управления каждым из измеренных выходов независимо с нулевыми ошибками стационарного состояния выходных переменных объекта управления. В общей постановке задачи управления с предсказанием, с учетом шума и помех объекта управления [11, 12]:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(K) + Bw(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

где $w(k)$ является входным возмущающим воздействием. Это означает, что последовательность белого шума (k) задается уравнением разности (между входным возмущающим воздействием в момент времени k и возмущающим воздействием в момент времени $(k - 1)$):

$$w(k) - w(k - 1) = k \quad (3)$$

Заметим, что из (1) также верно следующее разностное уравнение для переменной состояния:

$$\dot{x}(k) = Ax(k - 1) + Bu(K - 1) + Bw(k - 1) \quad (4)$$

Определяя $\Delta \dot{x}(k) = x(k) - x(k - 1)$ и $\Delta u(K) = u(k) - u(k - 1)$, затем вычитая (4) из (1) получаем, что:

$$\Delta x(k + 1) = A\Delta x(k) + B\Delta u(K) + Bw(k) \quad (5)$$

Для того, чтобы найти связь между выходом $y(k)$ и переменной состояния $\Delta x(k)$, необходимо сложить (2) из (5):

$$\begin{aligned} \Delta y(k + 1) &= C\Delta x(k + 1) = \\ &= CA\Delta x(K) + CB\Delta u(K) + CBw(k) \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\Delta y(k + 1) = y(k + 1) - y(K)$$

Выбор нового вектора переменной состояния:

$$x(k) = [\Delta x(k)^T \ y(k)^T]^T$$

В данном случае:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x(k + 1) \\ y(k + 1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & O^T \\ CA & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} \Delta u(k) + \begin{bmatrix} B \\ CB \end{bmatrix} e(k) \end{aligned} \quad (7)$$

$$[y(k)] = [O \ I] \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ y(k) \end{bmatrix},$$

где I – это матрица идентичности с размерами $r \times r$, которая является числом выходов; и O – это $r \times n$ нулевых матриц.

В (7) A , B и C имеют размерность $n \times n$, $n \times m$ и $r \times n$ соответственно.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОВХОДОВЫХ / МНОВХОДОВЫХ СИСТЕМ ПОД МОДЕЛЬНЫМ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Большинство промышленных и ядерных процессов управляются алгоритмами управления (в данном случае речь идет именно об алгоритмах управления, программную и аппаратную части системы управления в данном случае рассматривать не будем), которые имеют ряд входных переменных и выходных переменных. Например, рас-

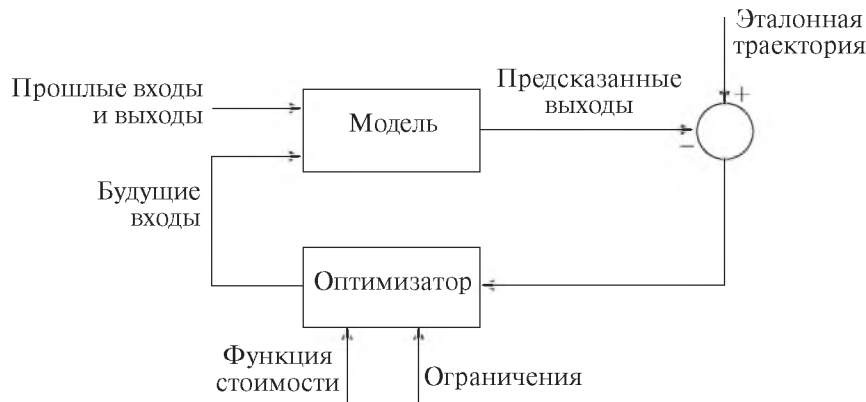


Рис. 1. Диаграмма принципа работы Регулятора с предсказанием.

смотрим процесс термического смешивания, показанный на рисунке 2, как системы с несколькими входами/несколькими выходами [13, 14].

Уровень h в баке и температура T должны контролироваться путем регулировки величины потока горячей и холодной жидкости, W_h и W_c , соответственно.

Температуры входного потока T_h и T_c считаются переменными возмущения. Положение управляющей задвижки поддерживает выходной расход w постоянным, а свойства жидкости считаются неизменными на всем временном промежутке управления, то есть на них не влияет ни температура, ни объем жидкости, но энергетические и массовые балансы для этого процесса могут меняться во времени.

$$\rho C \frac{d[V(T - T_{ref})]}{dt} = w_h C(T_h - T_{ref}) + w_c C(T_c - T_{ref}) - w C(T - T_{ref}) \quad (8)$$

$$\rho C \frac{dV}{dt} = w_h + w_c - w \quad (9)$$

Учитывая изменение во времени энергетических и массовых балансов получим следующее уравнение:

$$\frac{d[V(T - T_{ref})]}{dt} = \left((T - T_{ref}) \frac{dV}{dt} + V \frac{dT}{dt} \right) \quad (10)$$

В уравнении (10) можно заменить правую часть уравнения на правую часть уравнения (8).

После замены баланса масс (9) получается более простой набор уравнений с $V = Ah$,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho Ah} [w_h T_h + w_c T_c - (w_h + w_c) T] \quad (11)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho A} (w_h + w_c - w) \quad (12)$$

После линеаризации (11) и (12), приведения их в отклонение от рабочих точек системы управления и проведения преобразования Лапласа, мы получаем набор из восьми передаточных функций, описывающих влияние каждой входной переменной (W_h, W_c, T, T_c) на каждую выходную переменную (T и h):

$$\frac{T(s)}{W_h(s)} = \frac{T_h - T}{ks + 1} \quad (13)$$

$$\frac{T(s)}{W_c(s)} = \frac{T_c - T}{\tau s + 1} \quad (14)$$

$$\frac{T(s)}{T_h} = \frac{W_h}{ks + 1} \quad (15)$$

$$\frac{T(s)}{T_c(s)} = \frac{W_c}{ks + 1} \quad (16)$$

$$\frac{H(s)}{W_h(s)} = \frac{1}{s} \quad (17)$$

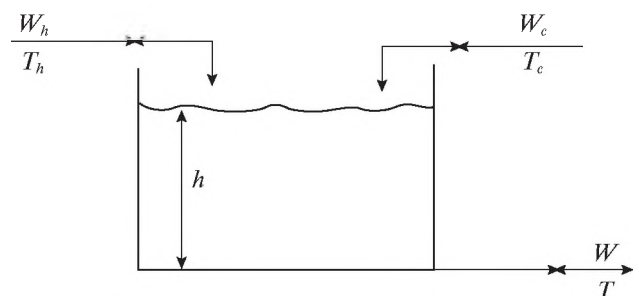


Рис. 2. Бак-смеситель горячих и холодных жидкостей.

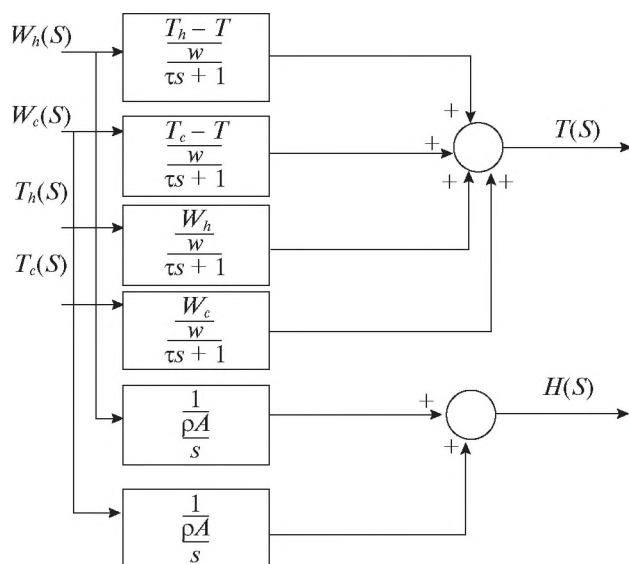


Рис. 3. Блок-схема передаточной функции танка.

$$\frac{H(s)}{W_c(s)} = \frac{1}{s} \quad (18)$$

$$\frac{H(s)}{T_h(s)} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{H(s)}{T_c(s)} = 0, \quad (20)$$

где $k = \frac{\rho A h}{w}$ конструкционный параметр бака, характеризующий его объем.

Уравнения (13)–(16) показывают, что все четыре входных сигнала влияют на температуру резервуара через передаточные функции первого порядка и единственную постоянную времени T .

Уравнения (17) и (18) показывают, что входной расход влияет на уровень через интегрирование передаточных функций, возникающих в результате работы подающего насоса на выходной линии.

Наконец, из уравнений (19) и (20) ясно, что изменения температуры на входе не оказывают никакого влияния на уровень жидкости.

Очень компактный способ выражения уравнения (13) через уравнение (20) является матрицей передаточной функции:

$$\begin{bmatrix} T(s) \\ H(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_h - T}{\tau s + 1} & \frac{T_c - T}{\tau s + 1} & \frac{W_h}{\tau s + 1} & \frac{W_c}{\tau s + 1} \\ \frac{1}{\frac{\rho A}{s}} & \frac{1}{\frac{\rho A}{s}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Соответственно, управляемые переменные w_h и w_c могут быть изолированы от возмущающих переменных T_h и T_c с помощью двух передаточных функций:

$$\begin{bmatrix} T(s) \\ H(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_h - T}{\tau s + 1} & \frac{T_c - T}{\tau s + 1} \\ \frac{1}{\frac{\rho A}{s}} & \frac{1}{\frac{\rho A}{s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_h(s) \\ W_c(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{W_h}{\tau s + 1} & \frac{W_c}{\tau s + 1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_h(s) \\ T_c(s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Структурная схема системы управления представлена на рис. 3.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для создания новой модели в среде Simulink был создан код в редакторе MATLAB и перенесен в MPCtool, который используется для генерации моделирования математической модели в модель Simulink [15, 16].

При моделировании, потоки горячего и холодного равны, поэтому количество входов сокращается до 3 входов и 2 выходов.

Параметры MPC изменялись постепенно, чтобы получить наилучший отклик путем изменения параметра настройки (горизонт управления и горизонт прогнозирования).

На первом этапе моделирования время выборки было установлено равным 1 секунде, горизонт управления – 2, а горизонт прогнозирования – 10. Полученные графики приведены на рис. 4.

Можно сделать отклик модели системы управления более быстрым, соответствующим образом настроив значение для горизонта предсказания. В этом эксперименте были проверены различные значения контрольного и прогностического горизонтов, результаты приведены на графике рис. 5 и 6. Различные значения, тестируемые для горизонта прогнозирования, выполняются путем фиксации контрольного горизонта и изменения горизонта прогнозирования P . Тестируемые значения приведены в таблице 1. Различные значения, проверенные для контрольного горизонта, выполняются путем фиксации горизонта прогнозирования и изменения контрольного горизонта M , приведены в таблице 2.

В случае, если система управления имеет более быстрый отклик, то изменяя соответственно значение горизонта прогнозирования и горизонта управления, рассматривая несколько различных параметров, как показано на рис. 5 и 6 соответ-

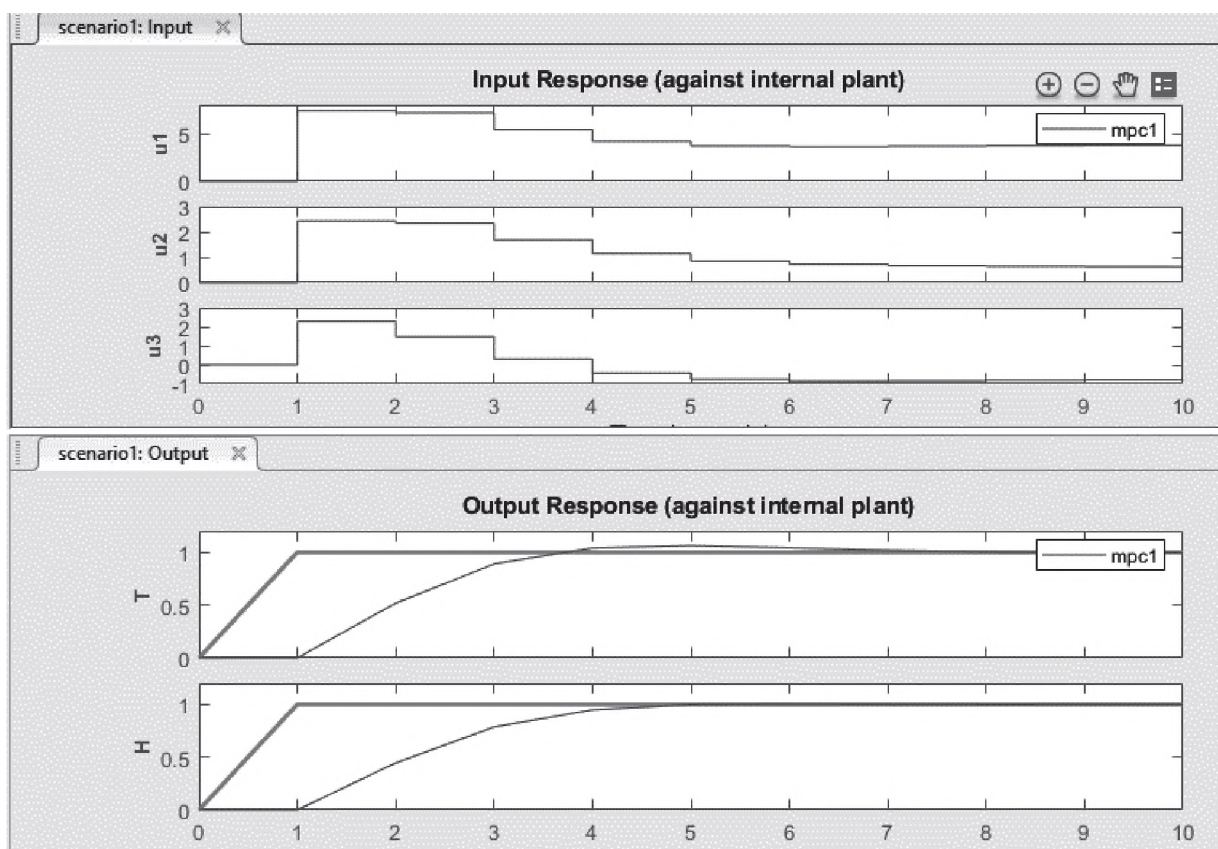


Рис. 4. MPCtool в результатах моделирования MATLAB: u_1 , u_2 и u_3 – вход системы, а T и H – выход системы.

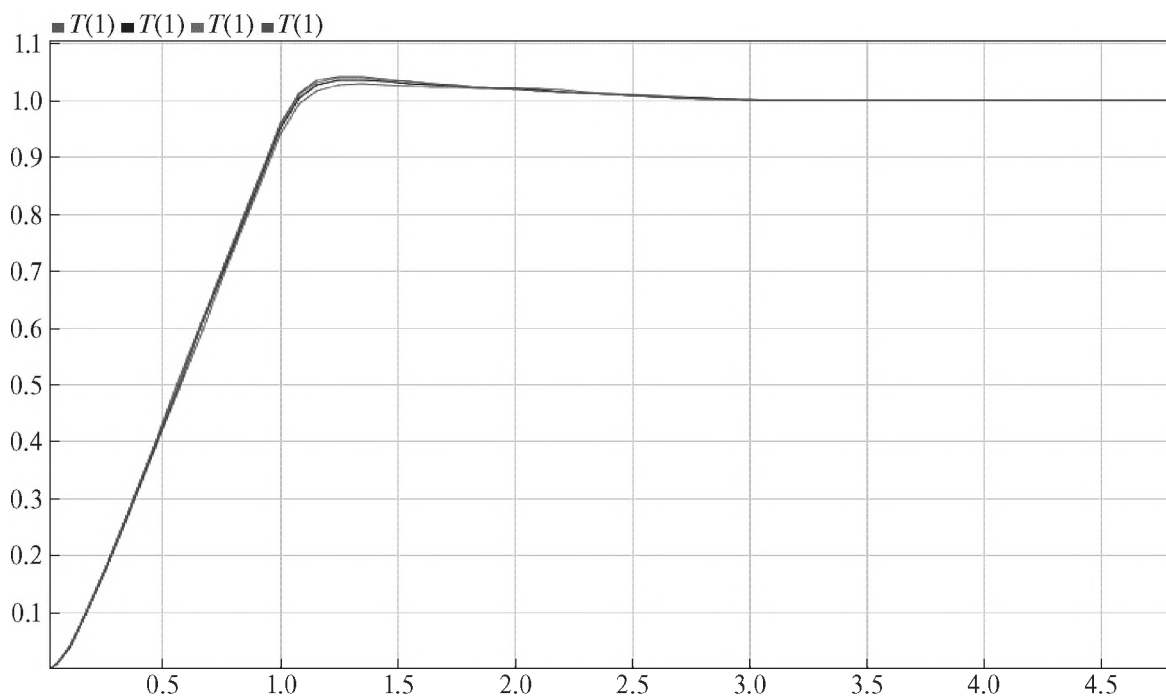


Рис. 5. Реакция температуры и уровня на изменение горизонта прогноза.

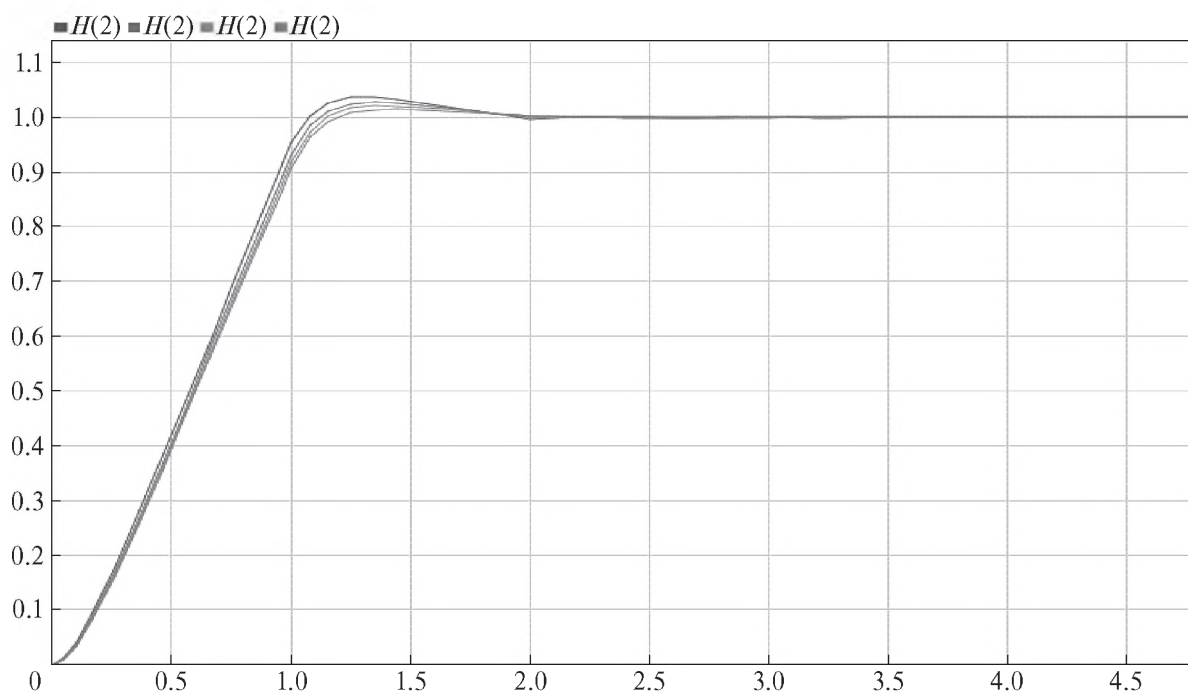


Рис. 6. Реакция температуры и уровня на изменение горизонта управления.

ственно можно получить наилучшие траектории управления, которые соответствуют значению горизонта прогнозирования равному 20, а горизонту управления равному 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контроль уровня и температуры жидкости в резервуарах является одной из основных проблем в технологических отраслях промышленности и ядерных процессах. Для достижения этой цели

моделируется и внедряется контроллер МРС для установки.

Работа включает в себя проектирование и моделирование системы управления уровня и температуры жидкости. Математическая модель построена на основе обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для численного решения задач стационарного и динамического анализа использовались простой итерационный метод и метод Рунге–Кутты. Эти анализы показывают в основном нелинейность системы и приводят к выбору передаточной функции второго порядка.

Используемый прогностический контроль имеет хорошие результаты с точки зрения принятого критерия качества регулирования, за исключением самого начала управления, так как алгоритм должен быть настроен через горизонт управления и прогнозирования, где изменение значения этого фактора приводит к более плавному, но более медленному отклику.

Управление прогностической моделью имеет многообещающий результат во многих областях применения, таких как тепловые и ядерные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ke H., Yuan J. Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level, *Energ. Convers. Manage.* 2008. V. 49. P. 1167–1174.

Таблица 1. Изменение горизонта прогнозирования

Горизонт прогнозирования	Горизонт управления
5 шагов	2 шага
8 шагов	2 шага
12 шагов	2 шага
20 шагов	2 шага

Таблица 2. Контроль изменения горизонта

Горизонт прогнозирования	Горизонт управления
20 шагов	2 шага
20 шагов	5 шагов
20 шагов	8 шагов
20 шагов	12 шагов

2. Tan W. Water Level Control for a Nuclear Steam Generator. Nucl. Eng. Des. 2011. V. 241. P. 1873–1880.
3. Pinheiro, Carla IC, Lester S. Kershenbaum. Model predictive control of reactor temperature in a CSTR pilot plant operating at an unstable steady-state. Computers & Chemical Engineering. 1999. V. 23. P. 859–862.
4. Kvasnica, Michal, Martin Herceg, Ľuboš Čirka, and Miroslav Fikar. Model predictive control of a CSTR: A hybrid modeling approach. Chemical papers. 2010. V. 64. № 3. P. 301–309.
5. Morari, Manfred, Jay H. Lee. Model predictive control: past, present and future. Computers & Chemical Engineering. 1999. V. 23. № 4–5. P. 667–682.
6. Shah, Gaurang, Sebastian Engell. Tuning MPC for desired closed-loop performance for MIMO systems. In Proceedings of the 2011 American Control Conference. IEEE, 2011. P. 4404–4409.
7. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. Control Systems, Robotics and Automation—Volume XI: Advanced Control Systems. V. 2009. P. 24.
8. Allgower, Frank, Rolf Findeisen, Zoltan K. Nagy. Nonlinear model predictive control: From theory to application. Journal-Chinese Institute of Chemical Engineers, 2004. V. 35. № 3. P. 299–316.
9. Camacho, Eduardo F., Carlos Bordons Alba. Model predictive control. Springer Science & Business Media, 2013.
10. Garcia, Carlos E., David M. Prett, Manfred Morari. Model predictive control: theory and practice – a survey. Automatica. V. 25. № 3. P. 335–348.
11. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. Control Systems, Robotics and Automation and Advanced Control Systems. 2009. V. 9. P. 24.
12. Bemporad, Alberto, Manfred Morari, and N. Lawrence Ricker. Model Predictive Control Toolbox User's Guide. The Mathworks, 2010.
13. Allgower, Frank, Rolf Findeisen, and Zoltan K. Nagy. Nonlinear model predictive control: From theory to application. Journal-Chinese Institute of Chemical Engineers. 2004. V. 35.3. P. 299–316.
14. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. Control Systems, Robotics and Automation. Volume XI: Advanced Control Systems. V. 2009. P. 24.
15. Taemiriosgouee, Ahmad. Investigation of Model Predictive Control (MPC) for Steam Generator Level Control in Nuclear Power Plants. Engineering, 2016.
16. Ke H., Yuan J. Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level, Energ. Convers. Manage. 2008. V. 49. P. 1167–1174.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 1, pp. 55–62

Temperature and Water Level Control in Thermal and Nuclear Processes Using a Model Predictive Controller

Z. Laidani^{a,#}, A. O. Tolokonsky^a, K. K. Abdulraheem^a, M. Ouahioune^a, and R. Berreksi^a

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

[#]e-mail: laidani.zahir@gmail.com

Received June 22, 2020; revised March 11, 2021; accepted March 12, 2021

Abstract—Liquid level and temperature are employed in different industries such as nuclear power plant and power generator units. The water level and temperature have an essential role in nuclear and thermal power plants. A model predictive controller is a feedback control algorithm involving a model of a system to predict its future behavior, and it solves an online optimization algorithm to select the best control action that drives the predicted output to the reference. In this paper, a model predictive controller has been proposed to monitor the temperature and water level. The model predictive controller has two inputs from the temperature sensor and the water level. The system is based on a mathematical model for the task, and then a space model is developed. These systems with multiple inputs and multiple outputs are used as a testbed to find the optimal sequence of control inputs that drive the predicted plant output to track setpoint by changing the prediction horizon and control horizon.

Keywords: model predictive controller, feedback control, mathematical model, control horizon, prediction horizon

DOI: 10.1134/S2304487X21010119

REFERENCES

1. H. Ke, J. Yuan, Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level, *Energ. Convers. Manage*, 2008, vol. 49, pp. 1167–1174.
2. Tan W. Water Level Control for a Nuclear Steam Generator. *Nucl. Eng. Des.*, 2011, vol. 241, pp. 1873–1880.
3. Pinheiro, Carla IC, and Lester S. Kershenbaum. Model predictive control of reactor temperature in a CSTR pilot plant operating at an unstable steady-state. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, vol. 23, pp. 859–862.
4. Kvasnica, Michal, Martin Herceg, Ľuboš Čirka, and Miroslav Fikar. Model predictive control of a CSTR: A hybrid modeling approach. *Chemical papers*, 2010, vol. 64, no. 3, pp. 301–309.
5. Morari, Manfred, and Jay H. Lee. Model predictive control: past, present and future. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, vol. 23, no. 4–5, pp. 667–682.
6. Shah, Gaurang, and Sebastian Engell. Tuning MPC for desired closed-loop performance for MIMO systems. *In Proceedings of the 2011 American Control Conference*, pp. 4404–4409. IEEE, 2011.
7. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. *Control Systems, Robotics and Automation-Volume XI: Advanced Control Systems*, vol. 2009, pp. 24.
8. Allgower, Frank, Rolf Findeisen, and Zoltan K. Nagy. Nonlinear model predictive control: From theory to application. *Journal-Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2004, vol. 35.3, pp. 299–316.
9. Camacho, Eduardo F., and Carlos Bordons Alba. Model predictive control. *Springer Science & Business Media*, 2013.
10. Garcia, Carlos E., David M. Prett, and Manfred Morari. Model predictive control: theory and practice—a survey. *Automatica*, vol.25, no. 3, pp. 335–348.
11. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. *Control Systems, Robotics and Automation and Advanced Control Systems*, 2009, vol. 9, pp. 24.
12. Bemporad, Alberto, Manfred Morari, and N. Lawrence Ricker. *Model Predictive Control Toolbox User's Guide*. The Mathworks, 2010.
13. Allgower, Frank, Rolf Findeisen, and Zoltan K. Nagy. Nonlinear model predictive control: From theory to application. *Journal-Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2004, vol. 35.3, pp. 299–316.
14. De Keyser, Robin. Model based predictive control for linear systems. *Control Systems, Robotics and Automation-Volume XI: Advanced Control Systems*, vol. 2009, pp. 24.
15. Taemiriosgouee, Ahmad. Investigation of Model Predictive Control (MPC) for Steam Generator Level Control in Nuclear Power Plants. *Engineering*, 2016.
16. H. Ke, J. Yuan. Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level. *Energ. Convers. Manage*, 2008, vol. 49, pp. 1167–1174.