ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2022, том 11, № 3, с. 266–272

> __ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ _____ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 681.513.54

УПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ С МОДЕЛЬНЫМ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2022 г. З. Лаидани^{1,*}, А. О. Толоконский¹, К. К. Абдулрахим¹, Р. Беррекси¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Москва, 115409, Россия *e-mail: laidani.zahir@gmail.com Поступила в редакцию 03.10.2022 г. После доработки 04.10.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Динамическая двухфазная модель механизма дисбаланса компенсатора давления в водо-водяном реакторе (ВВР) атомной электростанции была построена на основе некоторых разумных упрощений и основных гипотетических предположений. Уравнения сохранения энергии и массы используются при получении математической модели работы компенсатора давления. Компенсатор давления разделен на две области, область пара и область жидкости, но не обязательно в равновесии друг с другом. В данной работе с помощью MATLAB/Simulink создана модель системы управления компенсатора давления. Для решения проблем, связанных с большим перерегулированием, задержкой реакции и плохой стабильностью системы управления давлением в компенсаторе давления, предлагается усовершенствованная модель, основанная на алгоритме модельного предсказательного управления. Исследованы возможности и потенциал стратегий управления с предсказанием модели (МРС) для управления компенсатором давления на атомных электростанциях (АЭС). Эти исследования были проведены с использованием линеаризованной динамической модели компенсатора давления. Используемые МРС-контроллеры основаны на существующих методологиях. Кроме того, были исследованы возможности улучшения производительности за счет точной настройки некоторых параметров управления на основе динамических характеристик компенсатора давления. Оценка эффективности была проведена с помошью общирного компьютерного моделирования. Результаты продемонстрировали потенциал контроллера МРС для улучшения работы компенсатора давления.

Ключевые слова: компенсатор давления, модельное предсказательное управление, моделирование **DOI:** 10.56304/S2304487X22030063

введение

Управление с предсказанием модели часто поразному называют управлением с уходящим горизонтом и управлением с обобщенным предсказанием, но их основные концепции управления одинаковы. Метод управления с предсказанием модели заключается в решении в режиме реального времени оптимизационной задачи для конечного будущего в текущий момент времени и реализации только первого оптимального входа управления в качестве текущего входа управления. Этот метод имеет много преимуществ по сравнению с обычным управлением с бесконечным горизонтом, потому что можно систематически обрабатывать ограничения на входе и выходе во время проектирования и реализации управления.

1. МОДЕЛЬ ПРЕДСКАЗАНИЙ

Модель является фундаментом MPC; полная конструкция должна включать необходимые ме-

ханизмы для получения наилучшей возможной модели, которая должна быть достаточно полной, чтобы полностью отражать динамику процесса, а также должна позволять рассчитывать прогнозы и в то же время быть интуитивно понятной и допускать теоретический анализ [1]. Использование модели процесса определяется необходимостью расчета предсказываемого выхода в будущие моменты времени y(t+k|t). Различные стратегии МРС могут использовать различные модели для представления взаимосвязи между выходами и измеряемыми входами, некоторые из них являются управляемыми переменными, а другие могут рассматриваться как измеряемые возмущения, которые могут быть компенсированы с помощью обратной связи. Модель возмущений также может быть принята во внимание для описания поведения, которое не отражается моделью процесса, включая влияние неизмеряемых входов, шума и ошибок модели [2, 3]. Модель можно разделить на две части: модель реального процес-



Рис. 1. Схематическая диаграмма компенсатора давления.

са и модель возмущений. Обе части необходимы для предсказания.

2. КОМПЕНСАТОР ДАВЛЕНИЯ

Принципиальная схема компенсатора давления представлена на рис. 1. Компенсатор давления разделен на две области: область пара и область жидкости, но не обязательно в равновесии друг с другом. Сохранение массы и энергии применяется к каждой области. При полном или пустом заполнении компенсатора давления уменьшается до одной области с выражениями сохранения массы и энергии только для имеющегося объема [4]. Компенсатор давления включает внешние соединения для импульсного потока, для потока распыления и сброса, а также для электрического питания нагревателя. Отдельная модель импульсной линии обеспечивает двунаправленный поток от или к первичному контуру. Как видно из рисунка 1, компенсатор давления представляет собой вертикальный резервуар, оснашенный нагревателем, распылительным клапаном, клапаном нагнетательной линии и предохранительным клапаном. Когда давление в компенсаторе давления снижается, вода из горячей трубы поступает в нижнюю часть компенсатора давления через клапан нагнетательной линии. Затем вода смешивается с жидкостью в нижней части компенсатора давления и активирует нагреватель. Когда пар в верхней части компенсатора давления становится перегретым и температура повышается, охлаждающая вода из холодной ноги поступает в компенсатор давления через распылительный клапан для охлаждения пара. Одновременно открывается перепускной клапан для выпуска пара в атмосферу [5, 6].

3. МРС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАТОРОМ ДАВЛЕНИЯ (КД)

МРС-контроллер для КД вычисляет управляющий сигнал в каждый момент времени выборки путем решения задачи оптимального управления с открытым контуром с конечным горизонтом, используя состояния установки [7]. Вычисляется последовательность оптимальных управляющих сигналов.

Модель КД используется для предсказания будущих состояния и выхода x(k + i|k), y(k + i|k), i = 1,...p системы на временном горизонте p, как показано на рис. 2 [3, 4]. Когда управляющая переменная (расход исходной воды скорость) u(k + i|k), i = 0, 1,...m - 1 изменяется в течение некоторого будущего временного горизонта, т.е. горизонт управления m, используя эти прогнозы, m управляющих сигналов u(k + i|k), i = 0, 1,...m - 1вычисляются для минимизации индекса эффективности на горизонте предсказания p. Первый управляющий сигнал (действие) в последовательности, т.е., u(k|k), затем подается на клапан управления подачей воды [8, 9].

Оставшиеся оптимальные входы отбрасываются, и в каждый момент времени выборки решается новая задача оптимального управления [10].

Функция затрат может быть определена как квадратичная ошибка между будущей эталонной переменной и будущей управляемой переменной в пределах выбранного дискретного временного горизонта *m* следующим образом [11, 12]:

$$J_{p}(k) = \sum_{i=1}^{p} (r(k+i|k) - y(k+i|k))^{T} \times Q_{v}r(k+i|k) - y(k+i|k) +$$



Рис. 2. Основная концепция МРС.



Рис. 3. Блок-схема компенсатора давления.

$$+\sum_{i=1}^{m-1} u(k+i|k)^{T} R_{u}u(k+i|k) +$$

$$+\sum_{i=1}^{m-1} \Delta u(k+i|k)^{T} R_{\Delta u}u(k+i|k),$$
(3.1)

где r(k) — уставка КД, y(k) — это измерение КД (управляемая переменная), u — расход подачей воды (управляющая переменная), а Q_y , R_u , $R_{\Delta u} \ge 0$ это весовая матрица.

Индекс производительности или функция затрат J(k) в уравнении (3.1) отражает ошибку отслеживания между эталонным и измеренным КД. Он также включает в себя усилия по управлению в виде сигналов, поступающих на клапан.

При условии следующих ограничений на управляющий вход, следующие ограничения на вход управления u(k + i|k), i = 0, 1, ..., m - 1, состояния и выход x(k + i|k), y(k + i|k),

i = 1, ... p:

$$u_{j,\min} \le u_j(k+i|k), \quad i = 1,\dots p, j = 1,2\dots, n_u, \quad i = 0,1,\dots m-1,$$
(3.2)

$$\begin{aligned} |\Delta u_j(k+i|k)| &\leq \Delta u_{j,\max}, \quad i = 1, \dots p, \\ j &= 1, 2 \dots, \quad n_u, \quad i = 0, 1, \dots m - 1, \end{aligned} \tag{3.3}$$

где $u_{j,\min}$ и $u_{j,\max}$ — минимальный и максимальный пределы управляющего сигнала, и

$$\Delta u(k+i|k) = u(k+i|k) - u(k+i-1|k).$$

Ограничения на выход КД и состояния:

$$y_{j,\min} \le y_j(k+i|k) \le y_{j,\max}, \quad j = 1,...n_y,$$

 $j = 1,2..., \quad n_y, \quad i = 0,1,...p,$ (3.4)

$$x_{j,\min} \le x_j(k+i|k) \le x_{j,\max}, \quad j = 1,...n_x, j = 1,2..., \quad n_x, \quad i = 0,1,...p.$$
(3.5)

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 11 № 3 2022

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предположение и приближения приведены ниже:

1. Давление все время равномерно в компенсаторе давления.

2. Массообмен между границами раздела жидкости и пара происходит мгновенно.

d

3. Распыленная вода достигает температуры насыщения, прежде чем покинуть паровую фазу и перейти в жидкую.

4. Входящий поток охлаждающей воды идеально смешивается с горячей водой в нижней части бака.

5. Жидкая фаза либо насыщена, либо переохлаждена, а паровая фаза может быть либо насыщена, либо перегрета.

$$\frac{(M_{\text{total}})}{dt} = W_{su} + W_{sp} - W_{rv}, \qquad (4.1)$$

$$\frac{d(Q_{\text{total}})}{dt} = W_{su}h_{su} + W_{sp}h_{sp} - W_{rv}h_{rv} + Q, \qquad (4.2)$$

$$\frac{d(M_{\text{total}})}{dt} = (\dot{\rho}_l V_l + \dot{\rho}_v V_v)\dot{\rho} + (\rho_l - \rho_v)\dot{V}_l, \qquad (4.3)$$

$$\frac{d(Q_{\text{total}})}{dt} = (\dot{\rho}_l V_l h_l + \dot{\rho}_v V_v h_v + \rho_l V_l \dot{h}_l + \rho_v V_v \dot{h}_v) \dot{\rho} + (\rho_l h_l - \rho_v h_v) \dot{V}_l, \qquad (4.4)$$

$$M = \begin{vmatrix} \dot{\rho}_l V_l + \dot{\rho}_v V_v & \rho_l - \rho_v \end{vmatrix}, \qquad (4.5)$$

$$\left[\dot{\rho}_{l}V_{l}h_{l}+\dot{\rho}_{v}V_{v}h_{v}+\rho_{l}V_{l}\dot{h}_{l}+\rho_{v}V_{v}\dot{h}_{v}\rho_{l}h_{l}-\rho_{v}h_{v}\right]$$

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{su} & h_{sp} & -h_{rv} & 1 \end{bmatrix},$$
(4.6)

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{V}_{l} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{\rho}_{l} V_{l} + \dot{\rho}_{v} V_{v} & \rho_{l} - \rho_{v} \\ \dot{\rho}_{l} V_{l} h_{l} + \dot{\rho}_{v} V_{v} h_{v} + \rho_{l} V_{l} \dot{h}_{l} + \rho_{v} V_{v} \dot{h}_{v} & \rho_{l} h_{l} - \rho_{v} h_{v} \end{vmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ V_{l} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{su} & h_{sp} & -h_{rv} & 1 \end{bmatrix},$$
(4.7)

y

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ V_l \end{bmatrix}. \tag{4.8}$$

Сохранение массы $\frac{d(M_{total})}{dt}$ формулируется как уравнение (4.1), а сохранение энергии $\frac{d(Q_{total})}{dt}$ как уравнение (4.2). Путем дифференцирования сохранение массы формулируется в виде уравнения (4.3), и сохранение энергии формулируется в виде уравнения (4.4). Сравнивая уравнение (4.1) с уравнением (4.3), и сравнивая уравнение (4.2) с уравнением (4.3), и сравнивая уравнение (4.2) с уравнением (4.4), получаем уравнение (4.5): $M 2 \times 2$ матрица, где элементы первой строки взяты из коэффициентов $\dot{\rho}$ и \dot{V}_l из уравнения (4.3), а элементы второй строки взяты из коэффициентов $\dot{\rho}$ и \dot{V}_l из уравнения (4.4). $N 2 \times 4$ матрица, в которой элементы первой строки взяты из коэффициентов W_{su}, W_{sp}, W_{rv} уравнения (4.1), а элементы второй строки из коэффициентов $W_{su}, W_{sp}, W_{rv}, Q$ уравнения (4.2). *N* формулируется в виде уравнения (4.6). Реализована модель пространства состояний. Сравнивая с общей моделью пространства состояний, мы получаем новую модель пространства состояний, сформулированную в виде уравнений (4.7) и (4.8).

Эти уравнения будут подставлены в параметры пространства состояний в программе SIMULINK для получения результата моделирования.

5. РЕЗУЛЬТАТ И АНАЛИЗ

Параметры блока пространства состояний для моделирования в SIMULINK. *А* представляет собой переход состояния матрица; *В* представляет вход; *С* представляет выход и *D* представляет подачу. На рисунках 4 и 5 показаны результаты моделирования для различных значений горизонта предсказания и управления соответственно.



Рис. 4. Схема реакции давления на изменения в горизонте предсказания.



Рис. 5. Схема реакции давления на изменение горизонта управления.

Анализ основан на характеристиках входных и выходных сигналов (время нарастания, пиковое время, перерегулирование, время установления и ошибка установившегося режима).

Время нарастания — это время, необходимое сигналу для изменения от заданного низкого значения до заданного высокого значения. Обычно эти значения составляют 0-10% и 90% от высоты ступени. Время пика Tp — это время, необходимое для того, чтобы реакция достигла первого пика перерегулирования. Время установления Ts — это время, прошедшее с момента подачи идеального мгновенного ступенчатого входного сигнала до момента, когда выход вошел и остался в пределах заданного диапазона погрешности.

Перебор (Overshoot, OS) — это когда сигнал или функция превышает свою цель. Ошибка установившегося состояния определяется как разница.

Сравнение времени задержки, времени нарастания, времени пика, времени установления, перерегулирования и ошибки установившегося состояния MPC (различные значения для горизонта предсказания и управления) приведено в таблице 1 и таблице 2.

В таблицах 1 и 2 показано сравнение времени нарастания, пикового времени, времени установления, перерегулирования и ошибки установившегося режима МРС. По данным таблиц 1 и 2 видно, что МРС-контроллер имеет более быстрый отклик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод управления был основан на математических моделях компенсатора давления и модели MPC с пространством состояний. Результаты моделирования демонстрируют эффективность и высокую производительность предложенного метода MPC с пространством состояний для компенсатора давления. Предложенная система управления быстро отражается и плавно стабилизируется на желаемых значениях.

P = 40, M = 2	P = 30, M = 2	P = 20, M = 2	P = 10, M = 2
RiseTime: 1.3836	RiseTime: 1.1306	RiseTime: 1.1070	RiseTime: 0.7433
SettlingTime: 2.4571	SettlingTime: 2.8312	SettlingTime: 3.3411	SettlingTime: 3.1531
SettlingMin: 0.9020	SettlingMin: 0.9074	SettlingMin: 0.9044	SettlingMin: 0.9251
SettlingMax: 1.0037	SettlingMax: 1.0281	SettlingMax: 1.0801	SettlingMax: 1.1274
Overshoot: 0.3550	Overshoot: 2.8070	Overshoot: 8.0129	Overshoot: 12.7360
Undershoot: 0	Undershoot: 0	Undershoot: 0	Undershoot: 0
Peak: 1.0037	Peak: 1.0281	Peak: 1.0801	Peak: 1.1274
PeakTime: 4.0338	PeakTime: 2.4320	PeakTime: 2.4347	PeakTime: 1.7000

Таблица 1. Сравнение времени задержки, времени нарастания, времени пика, времени установления, перерегулирования и ошибки установившегося состояния MPC (различные значения для горизонта предсказания)

Таблица 2. Сравнение времени задержки, времени нарастания, времени пика, времени установления, перерегулирования и ошибки установившегося состояния MPC (различные значения для горизонта управления)

M = 2, P = 40	M = 10, P = 40	M = 20, P = 40	M = 30, P = 40	M = 40, P = 40
RiseTime: 1.3836	RiseTime: 0.8493	RiseTime: 0.8187	RiseTime: 0.8079	RiseTime: 0.8079
SettlingTime: 2.4571	SettlingTime: 2.4283	SettlingTime: 2.3658	SettlingTime: 3.1555	SettlingTime: 3.1558
SettlingMin: 0.9020	SettlingMin: 0.9197	SettlingMin: 0.9054	SettlingMin: 0.9060	SettlingMin: 0.9059
SettlingMax: 1.0037	SettlingMax: 1.0782	SettlingMax: 1.0881	SettlingMax: 1.1004	SettlingMax: 1.1004
Overshoot: 0.3550	Overshoot: 7.8163	Overshoot: 8.8079	Overshoot: 10.0378	Overshoot: 10.0388
Undershoot: 0				
Peak: 1.0037	Peak: 1.0782	Peak: 1.0881	Peak: 1.1004	Peak: 1.1004
PeakTime: 4.0338	PeakTime: 1.8698	PeakTime: 1.8123	PeakTime: 1.8000	PeakTime: 1.8000

Преимущества предложенного метода МРС в пространстве состояний подтверждаются сравнением между предложенным различными значениям для горизонта управления предсказания, кроме того, предложенная система управления обладает высокой устойчивостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Garcia C.E., Prett D.M., Morari M.* Model predictive control: theory and practice a survey. // Automatica, 1989. V. 25. № 3. P. 335–348.
- Clarke D.W., Mohtadi C. Properties of Generalized Predictive Control // Automatica, 1989. V. 25. № 6. P. 859–875.
- 3. *Garcia E., Prett D.M., Morari M.* Model Predictive Control: Theory and Practice-a Survey // Automatica, 1989. V. 25. № 3. P. 335–348.
- Jinming Yi. et al. Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on CMAC and PID Controller // IEEE 2009. P. 8–11.
- Jian-Hua Ye et al. Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on RBF Neural Network and PID Controller // IEEE, 2010. P. 1486–1489.

- Jianghua Guo et al. Research on Pressurizer Water Level Control System Based on Fuzzy-PID Control // IEEE, 2011. P. 706–709. https://doi.org/10.1109/IWACI.2011.6160099
- 7. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. 477 с.
- 8. *De Keyser R.* A Gentle Introduction to Model Based Predictive Control. In PADI2 International Conference on Control Engineering and Signal Processing, Piura, Peru, 1998.
- 9. *Pengfei Wang*. Mathematical modeling of a pressurizer in a pressurized water reactor for control design. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy and Technology, China.
- Jin M.A. et al. Mechanism Model and Simulation of Pressurizer in the Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant // IEEE, 2011. P. 1538–1543.
- 11. *Balbis L., Katebi R., Ordys A.* Model predictive control design for industrial applications. University of Strathclyde, 2006.
- 12. *Thomas Meikle V. et al.* Mathematical modeling of nuclear plant systems // IEEE, 2011. P. 1–10.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2022, vol. 11, no. 3, pp. 266-272

Control of the Nuclear Pressurizer Using Model Predictive Control

Z. Laidani^{*a*,#}, A. O. Tolokonsky^{*a*}, K. K. Abdulrahim^{*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 October 3, 2022; revised October 4, 2022; accepted October 4, 2022

Abstract—A dynamic two-phase model of the pressure compensator imbalance mechanism in a nuclear power plant pressurized water reactor (PWR) has been constructed based on some reasonable simplifications and basic hypothetical assumptions. The energy and mass conservation equations are used to derive a mathematical model of the pressurizer operation. The pressurizer is divided into two regions, the vapor region and the liquid region, but not necessarily in equilibrium with each other. A model of the pressurizer control system has been developed using MATLAB/Simulink. An improved model based on the model predictive control algorithm is proposed to solve the problems of large overshoot, delayed response, and poor stability of the pressurizer pressure control system. The possibilities and potential of model predictive control (MPC) strategies for pressurizer control in nuclear power plants are studied using a linearized dynamic model of the pressurizer. The MPC controllers used are based on existing methodologies. In addition, the possibilities of improving the performance by tuning some control parameters precisely based on the dynamic characteristics of the pressurizer are investigated. The efficiency has been evaluated by means of extensive computer simulations. The results demonstrate the potential of the MPC controller to improve the performance of the pressurizer.

Keywords: pressurizer, model predictive control, simulation

DOI: 10.56304/S2304487X22030063

REFERENCES

- 1. Garcia C.E., Prett D.M., Morari M. Model predictive control: theory and practice a survey. *Automatica*, 1989, vol. 25, no. 3, pp. 335–348.
- Clarke D.W., Mohtadi C. Properties of Generalized Predictive Control. *Automatica*, 1989, vol. 25, no. 6, pp. 859–875.
- 3. Garcia E., Prett D.M., Morari M. Model Predictive Control: Theory and Practice-a Survey. *Automatica*, 1989, vol. 25, no. 3, pp. 335–348.
- Jinming Yi. et al. Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on CMAC and PID Controller. *IEEE*, 2009, pp. 8–11.
- Jian-Hua Ye et al. Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on RBF Neural Network and PID Controller. *IEEE*, 2010, pp. 1486–1489.
- 6. Jianghua Guo et al. Research on Pressurizer Water Level Control System Based on Fuzzy-PID Control. *IEEE*, 2011, pp. 706–709. https://doi.org/10.1109/IWACI.2011.6160099

- Denisov V.P., Dragunov Yu.G. *Reaktornyye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Reactor installations VVER for nuclear power plants]. Moscow, Publishing House Publ., 2002, 480 p.
- 8. *De Keyser R.* A Gentle Introduction to Model Based Predictive Control. In PADI2 International Conference on Control Engineering and Signal Processing, Piura, Peru, 1998.
- 9. Pengfei Wang. *Mathematical modeling of a pressurizer in a pressurized water reactor for control design*. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy and Technology, China.
- Jin M.A. et al. Mechanism Model and Simulation of Pressurizer in the Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant. *IEEE*, 2011, pp. 1538–1543.
- 11. Balbis L., Katebi R., Ordys A. *Model predictive control design for industrial applications*. University of Strathclyde, 2006.
- 12. Thomas Meikle V. et al. Mathematical modeling of nuclear plant systems. *IEEE*, 2011, pp. 1–10.