

УДК 62-503.56; 681.5.015.24

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

*А.А. Колодин, В.В. Ёлиин*

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: kolodin@istu.edu, dean\_zvf@istu.edu

**Аннотация.** Рассматривается принцип управления на основе прогнозирующей модели (*Model Predictive Control – MPC*). *MPC* является фундаментальной частью систем усовершенствованного управления технологическими процессами, в основе которого лежат прогнозирующие модели объектов управления. Управление на основе прогнозирующей модели чаще всего применяется на верхнем уровне автоматизации, в системе управления производственными процессами (*Manufacturing Execution System – MES*). В статье данный подход применяется в качестве локального регулятора на нижнем уровне автоматизации, в программируемом логическом контроллере (ПЛК), как альтернатива классическому пропорциональному интегро-дифференциальному (ПИД) регулятору. Использование принципа управления с прогнозирующей моделью позволяет реализовать оперативное управление в реальном времени в оптимальных режимах. Но для применения *MPC* в системах реального времени имеется ряд ограничений, в частности, производительность центрального процессора, время цикла ПЛК и время срабатывания сторожевого таймера. Настроочные параметры регулятора, основанного на принципе управления с прогнозирующей моделью, – это горизонт прогнозирования, горизонт управления и время цикла пересчета. В качестве примера приводится реальный объект, обладающий нелинейными свойствами и большим временем запаздывания, которым выступил эмулятор печи. Приведена модель объекта управления и реализован регулятор на основе управления с прогнозирующей моделью в виде программного модуля для ПЛК (*MPC-регулятор*). Проведен ряд экспериментов и получены качественно-количественные показатели регулирования. В результате сравнения показателей *MPC-регулятора* и *ПИД-регулятора* определено, что первый обладает наилучшим быстродействием, точностью и качеством регулирования. Эти результаты достижимы при соблюдении ограничений применения *MPC-регулятора* в системах реального управления.

**Ключевые слова:** управление, прогнозирование, моделирование, модель, оптимизация, регулятор, *MPC*, *ПИД-регулятор*.

В современных системах автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) с применением программируемых логических контроллеров (ПЛК) наибольшее распространение получили программные регуляторы на основе пропорционального интегрально-дифференциального (ПИД) за-

---

Колодин Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление».

Ёлиин Виктор Владимирович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление».

кона управления, или просто ПИД-регуляторы, на долю которых приходится более 80 % всех задач управления с обратной связью [1]. Их применяют как самостоятельно, так и в каскадных и комбинированных схемах управления. В большинстве случаев этого регулятора достаточно для ведения технологического процесса. Он обладает высоким быстродействием с настраиваемым и достаточным качеством регулирования. Однако применение ПИД-регулятора к нелинейным, слабо определенным, многосвязным объектам с большим временем запаздывания может приводить к нестабильным показателям качества управления, накоплению ошибок и в конечном итоге к ухудшению качества продукции. Даже принципы автоматической настройки или самонастройки, появившиеся за долгую историю применения ПИД-регуляторов [2, 3], эти недостатки не устранили.

В принципах систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП), или Advanced process control (APC), основой управления является так называемое управление на основе прогнозирующей модели (Model Predictive Control – MPC) [4, 5, 6]. В сути метода лежат прогнозирующие модели объектов управления (рис.1). В нем используется ряд методов управления, использующих явную динамическую модель процесса для прогнозирования влияния будущих реакций, управляемых (регулируемых) переменных на входе и управляемых сигналов, полученных путем минимизации целевой функции управления [7, 8]. В MPC используется численная оптимизация для нахождения оптимального управления на некотором временном горизонте в будущем на основе модели процесса. Качество управления регулятора зависит от того, насколько хорошо динамика системы описывается моделью, используемой для проектирования регулятора [9, 10].



Рис. 1. Принцип работы управления на основе прогнозирующей модели

Алгоритм управления с прогнозирующей моделью можно представить в следующем виде [2]:

1. Измерить текущее состояние  $\tilde{x}[k]$ , где  $k$  – текущий тakt времени.

2. Найти последовательность оптимальных управляющих величин  $u[i]$  для горизонта управления  $Nc=k+C$ ,  $k \leq Nc$ , на всем горизонте прогнозирования  $Np=k+P$ , минимизирующую целевую функцию
3. Применить для управления только первую управляющую величину  $u[1]$ , остальные отбросить.
4. Перейти на шаг 1 и повторить процедуру в момент времени  $k+1$ .

В большинстве случаев управление на основе MPC применяется для решения задач оптимального управления на верхнем уровне автоматизации, в системе управления производственными процессами (Manufacturing Execution System — MES), без участия управляющих устройств нижнего уровня. Это обуславливается тем, что вычислительные мощности ПЛК не располагают достаточным быстродействием и объемом памяти для обработки и хранения информации при работе алгоритма. Это утверждение было справедливо для ПЛК прошлого века, современные же устройства снабжаются достаточно производительными процессорами и объемами памяти. Благодаря этому становится возможным применить принципы управления с прогнозирующей моделью на более низком уровне и осуществлять оперативное управление в реальном времени в оптимальных режимах [11].

В общем случае структура MPC-регулятора может быть представлена в следующем виде (рис. 2).

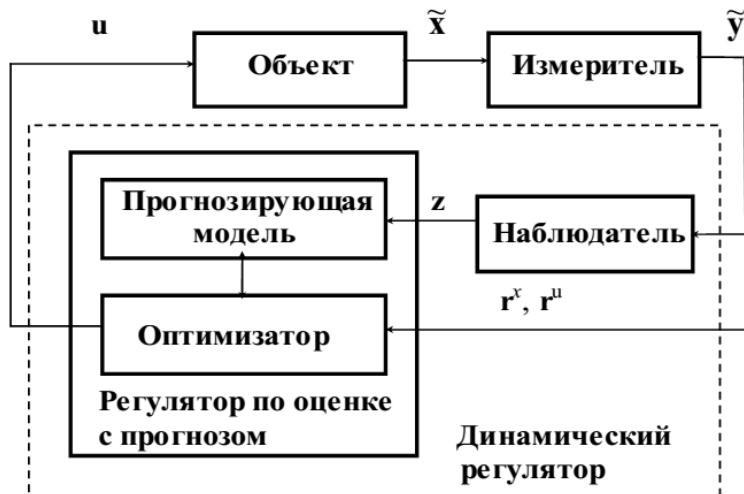


Рис. 2. Структура MPC-регулятора

По аналогии с ПИД-регулятором MPC-регулятор также может работать в контуре один вход – один выход (SISO).

Согласно вышеприведенному алгоритму, основными настроочными параметрами регулятора будут являться:

$Np$  – горизонт прогноза;

$Nc$  – горизонт управления;

$Tt$  – время одного такта перерасчета алгоритма и нахождения оптимальных управляющих величин, т. е. время, через которое будет происходить выполнение алгоритма работы регулятора.

При использовании MPC-регулятора необходимо учитывать различного рода ограничения. В приведенном выше алгоритме выбор горизонта прогноза влияет на время вычисления последовательности управляющих воздействий вкупе с алгоритмами численной оптимизации. Слишком далекий прогноз и сложность вычисления оптимальных значений ведут к увеличению расчетов на каждом такте и могут потребовать большого процессорного времени. Зачастую в системах реального времени, которыми являются ПЛК, имеется аппаратно-программный сторожевой таймер (Watchdog), который отслеживает время выполнения цикла ПЛК. Если время выполнения превышает заданный порог, то в лучшем случае выполнение программы прерывается и цикл ПЛК перезапускается, а в худшем это приводит к остановке работы контроллера. Поэтому нахождение настроек параметров регулятора является важной задачей для успешного применения алгоритма.

Каждый параметр  $N_p$ ,  $N_c$ ,  $T_t$  оказывает влияние на качество регулирования, скорость расчета оптимальных управлений и на чувствительность управляющей системы. Критериями выбора являются минимизация квадратичной ошибки и скорость расчета поиска оптимального варианта управления. При прочих равных условиях предпочтение необходимо отдавать комбинации параметров с наименьшим временем пересчета алгоритма.

Для проведения эксперимента был выбран учебный лабораторный стенд с объектом управления эмулятором печи ОВЕН ЭП10 [12], программируемым логическим контроллером ОВЕН ПЛК-154, исполнительным устройством твердотельным реле (управляющий входом 0–10 В). Регулируемая величина – температура печи ЭП10. Управляющая величина – напряжение на нагревателе, управляемое через твердотельное реле.

Статическая характеристика печи имеет нелинейность в области управления от 0 до 1,9 В [13]. Это обусловлено наличием зоны нечувствительности твердотельного реле. Свыше 1,9 В наблюдается зона квадратичной зависимости вплоть до температуры 120 °С, свыше которой нагревать печь не рекомендуется.

После серии проведенных экспериментов была получена математическая модель объекта управления в статике и динамике. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 7000 \frac{d^2y}{dt^2} + 360 \frac{dy}{dt} + (y - et_0) = 0.01055 \times (0.88u + 21)^2, u < 1.9; \\ 7000 \frac{d^2y}{dt^2} + 360 \frac{dy}{dt} + (y - et_0) = 0.01055 \times (45u - 85.5)^2, u \geq 1.9, \end{cases}$$

где  $y$  – выходная величина, температура печи;  
 $u$  – управляющее воздействие, напряжение твердотельного реле;  
 $e$  – поправочный коэффициент при температуре окружающей среды  $t_0$ .

Полученная нелинейная математическая модель легла в основу прогнозирующей модели для MPC-регулятора.

Дальнейшее исследование продолжилось в направлении получения набора оптимальных настроек параметров MPC-регулятора. Для этой цели в программе математического моделирования была собрана схема объекта управления и реализован алгоритм работы MPC-регулятора, период дискретизации составлял 1 сек. Для каждого набора параметров вычислялось время пересчета алгоритма и качество регулирования.

Из всего многообразия полученных результатов лучшее сочетание расчет – качество имеет набор со следующими параметрами  $N_p = 40$ ,  $N_c = 10$ ,  $T_t = 5$ . При этих значениях параметров регулятора и проводились дальнейшие исследования.

Программа для ПЛК-154 написана на стандартных языках стандарта IEC 61131-3 в среде разработки CodeSys v.2.3 (рис. 3). В алгоритме программы было организовано два цикла – основной цикл для «главной программы» и цикл по временному прерыванию в 1 сек, что соответствует времени пересчета модели в моделирующей программе. Первый цикл выполнял функцию контроля и управления оборудованием, расчета значений прогнозируемой модели и управляющих воздействий. Во втором цикле рассчитывались текущие состояния объекта и номер такта пересчета ( $k$ ). Сторожевой таймер в ПЛК устанавливался в 200 мс. Общая блок-схема алгоритма работы программы ПЛК представлена на рис. 4.

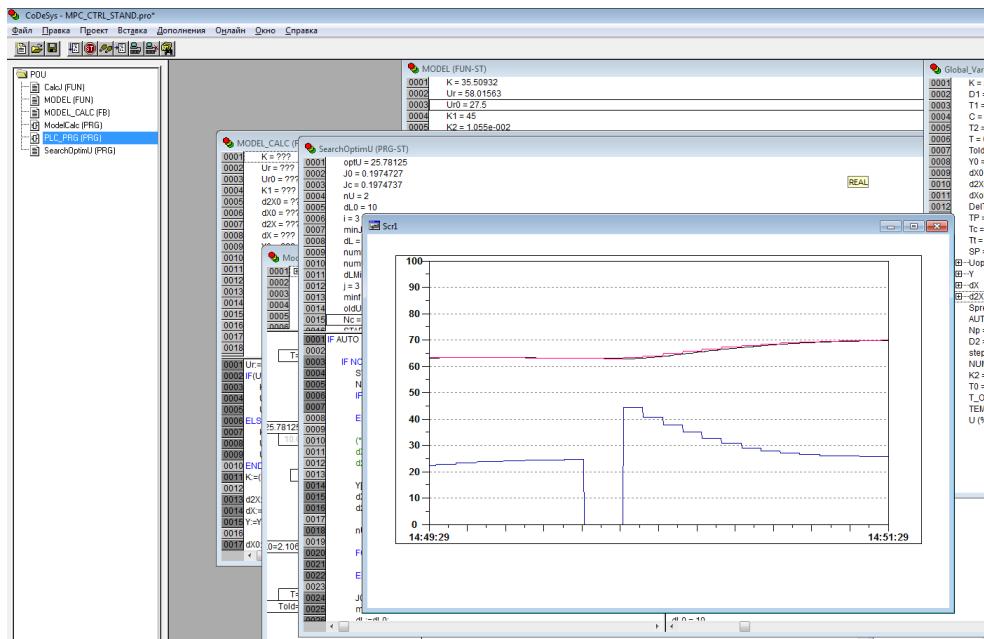


Рис. 3. Среда разработки CodeSys и набор программных модулей для решения задачи управления на основе MPC-регулятора

В такте пересчета, соответствующего параметру  $T_t$ , осуществляется нахождение оптимальной последовательности  $U$  в подпрограмме «Нахождение оптимальных  $U$ », алгоритм которой приведен ранее, на основании прогнозирующей модели с параметрами  $N_p$  и  $N_c$ .

Отлаженная программа была загружена в контроллер и проведены испытания работы MPC-регулятора в режиме выхода температуры печи на заданное значение температуры 63 °C (рис. 5). Из рисунка видно, что значения, смоделированные в программе (кривая 2), и измеренные значения (кривая 1) значительно отличаются друг от друга. Это говорит о том, что в прогнозирующей модели имеются ошибки моделирования. Тем не менее, как видно из графика, работа регулятора не была нарушена вследствие этих ошибок, он справился со своей задачей, выведя значение температуры печи до заданного величины, хотя и не в оптимальном режиме.

Таким образом, здесь наблюдается еще одно положительное свойство MPC-регулятора – это его робастность, которая обеспечит высокую надежность и устойчивость регулятора на основе MPC с обратной связью [14, 15].

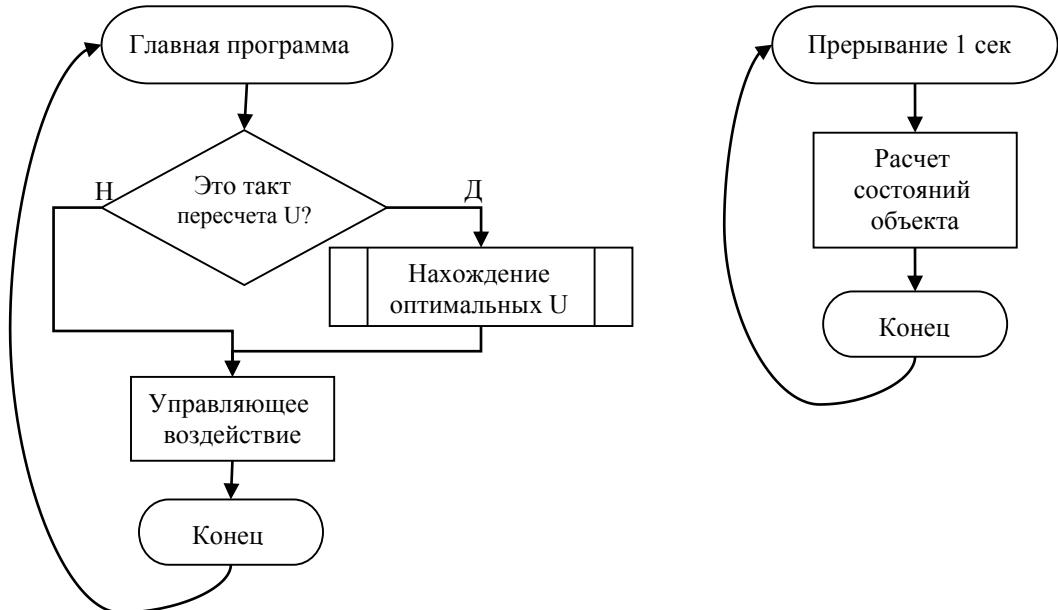


Рис. 4. Алгоритм ПЛК программы регулятора на основе MPC

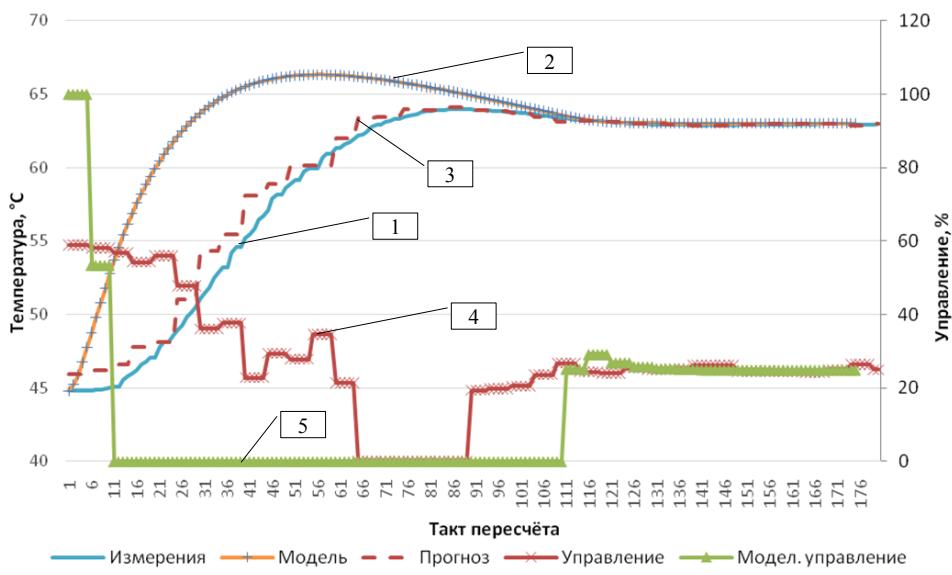


Рис. 5. Работа MPC-регулятора в режиме выхода температуры печи на задание:  
1 – измеренное значение температуры; 2 – смоделированное значение температуры;  
3 – расчетное прогнозное значение температуры; 4 – управляющий сигнал;  
5 – смоделированный управляющий сигнал

На рис. 6 показаны переходные процессы работы регулятора при изменении задания с 63 до 72, 57, 65 °C соответственно.

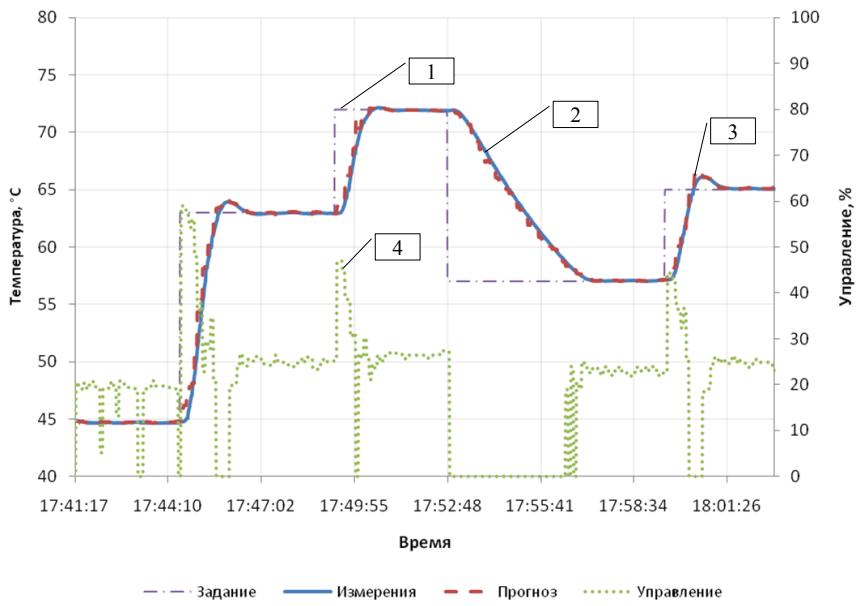


Рис. 6. Переходные процессы работы MPC-регулятора при изменении задания:  
 1 – значение задания температуры; 2 – измеренное значение температуры;  
 3 – расчетное прогнозное значение температуры; 4 – управляющий сигнал

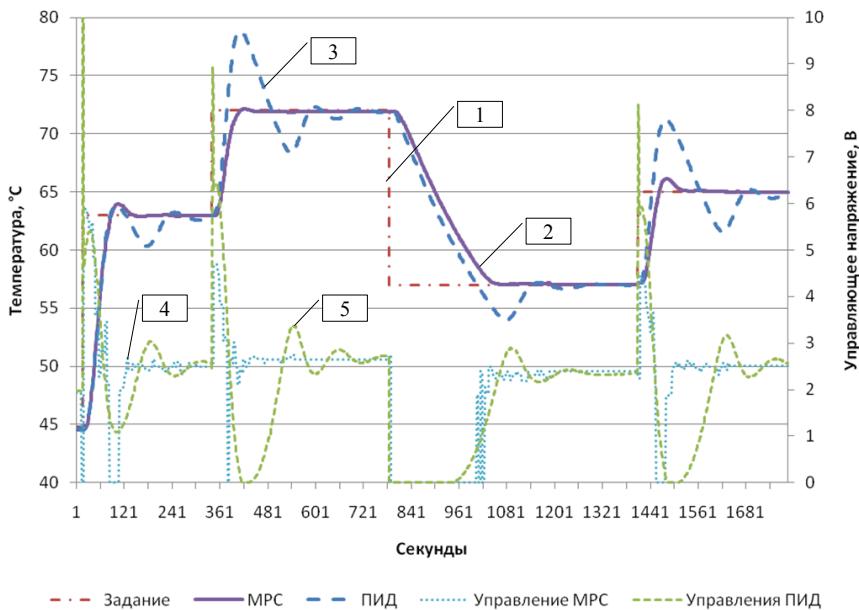


Рис. 7. Переходные процессы работы MPC и ПИД-регуляторов при изменении задания:  
 1 – значение задания температуры; 2 – измеренное значение температуры для MPC-регулятора;  
 3 – измеренное значение температуры для ПИД-регулятора; 4 – управляющий сигнал для MPC-ре-  
 гулятора; 5 – управляющий сигнал для ПИД-регулятора

Основная цель разработки MPC-регулятора для систем реального времени – это замена классического ПИД-регулятора. Для этого на том же стенде был реализован и испытан ПИ-регулятор стандартной поставки в составе CodeSys библиотеки util.lib. После нахождения оптимальных параметров регулятора (процесс нахождения выходит за рамки данной статьи) были сняты аналогичные переходные характеристики, приведенные выше для MPC-регулятора. На рис. 7 показаны сравнительные графики переходных процессов для MPC- и ПИД-регуляторов.

При анализе графика видно преимущество применения MPC-регулятора. Визуально наблюдается, что он обладает лучшим быстродействием, точностью и качеством регулирования. Качественно-количественные показатели регулирования следующие:

- квадратичная ошибка MPC-регулятора меньше на 27,96 %, чем ПИД;
- время выхода на задание (в диапазон 1 % при изменении задания на 10 %) среднее для MPC – 45 сек, ПИД – 132 сек;
- среднее перерегулирование MPC-регулятора – 0,65 %, ПИД-регулятора – 7,13 %.

Использование принципа управления с прогнозирующей моделью для регулирования технологических параметров наравне с ПИД-регулятором – достаточно перспективное направление. Как показали исследования для нелинейных процессов с существенным временем запаздывания, при правильном выборе параметров регулятора качество регулирования может вырасти более чем на 20 % при одногранном сокращении времени выхода на заданное значение и практически исключением перерегулирования. Но необходимо при этом учитывать ряд ограничений, накладываемых на ПЛК при применении MPC-регуляторов, в частности, по количеству применяемых регуляторов, так как в некоторых случаях реализовать в одном контроллере более 4–5 таких регуляторов – достаточно сложная задача. Все эти ограничения обуславливаются все той же недостаточной производительностью процессора и памятью ПЛК, хотя часть ограничений снимаются при разработке более производительного и оптимального алгоритма работы MPC-регулятора. Тем не менее его наиболее эффективное применение видится в процессах с длительными переходными процессами и процессах с значительным временем запаздывания, когда расчет прогнозирующей модели можно растянуть во временном интервале.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control. International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation. 2010. Vol. 3, No. 4. P. 47–63.
2. Колодин А.А., Мельник С.А. Управление на основе прогнозирующей модели (model predictive control) // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. – С. 9–14.
3. Martin-Sánchez Juan M., Rodellar José. Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization. Prentice-Hall. 1996. P. 352.
4. Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba. Model Predictive Control. Springer publication, London. 2007. P. 405.
5. Rawlings J.B. Tutorial: Model Predictive Control Technology. Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California. 1999. Pp. 662–676.
6. Carlos E. Garcia, David M. Prett and Manfred Morari, Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey. Automatica. 1989. Vol. 25, No. 3. Pp. 335–348.
7. Tao Zheng. Advanced Model Predictive Control. InTech, Croatia. 2011. P. 418.
8. Holkar K.S., Waghmare L.M. Discrete Model Predictive Control for DC drive Using Orthonormal Basis function. UKACC International Conference on CONTROL. Coventry, UK. 2010. Pp. 435–440.

9. Mohanty, Swati. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column. Journal of Process Control. 2009. Vol. 19. Pp. 991–999.
10. Richalet J. Industrial applications of model based predictive control. Automatica. 1993. Vol. 29. P. 1251–1274.
11. Abu-Ayyad M., Dubay R. Real-time comparison of a number of predictive controllers. ISA Transactions. 2007. Vol. 46. Pp. 411–418.
12. ЭП10 эмулятор печи. <https://owen.ru/product/ep10> (дата обращения 10 ноября 2020 г.)
13. Тарасов Д.Е., Колодин А.А. Построение математической модели печи учебного стенда // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2020. – С. 238–242.
14. Kothare M., Balakrishnan V., Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. Automatica. 1996. Vol. 32(10). Pp. 1361–1379.
15. Draeger S. Engel H. Ranke. Model predictive control using neural networks. IEEE Control System Magazine. 1995. Vol. 15, No. 5. Pp. 61–66.

*Статья поступила в редакцию 18 ноября 2020 г.*

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE CONTROLLER BASED ON THE MODEL PREDICTIVE CONTROL

**A.A. Kolodin, V.V. Elshin**

Irkutsk National Research Technical University  
83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**Abstract.** Modern automated process control systems that use programmable logic controllers use software controllers based on the proportional integral-differential control law, the PID controller. In most cases, this regulator is sufficient for conducting the technological process. It has high performance with configurable and sufficient quality of regulation. However, using a PID controller for non-linear, poorly defined, multi-connected objects with a long delay time can lead to unstable control quality indicators, accumulation of errors, and ultimately to a deterioration in product quality. One of the most promising methods of control is Model Predictive Control - MPC. The method base on predictive models of control objects. The quality of the controller's control depends on how well the system dynamics described by the model used to design the controller. In most cases, MPC-based control use to handle optimal control problems on the Manufacturing Execution System-MES. However, thanks to the development of microprocessors and increased CPU performance, it becomes possible to apply the principles of control with a predictive model at a lower level, and perform real-time operational control in optimal modes. The work presents the algorithm of MPC controller. The control object is a SISO object with a nonlinear characteristic and a long transition process. Studies of the developed MPC regulator showed that the quality of regulation, compared to the PID regulator, increased by more than 20%, the time to get to set point decreased, and there was almost no over-regulation. The most effective application of the MPC controller is seen in processes with long transitions and with a significant delay time.

**Keywords:** control, prediction, modelling, model, optimization, Model Predictive Control, MPC, PID controller.

---

Aleksey A. Kolodin, Senior Lecture.

Viktor V. Elshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

## REFERENCES

1. *Holkar K.S., Waghmare L.M.* An Overview of Model Predictive Control. International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation. 2010. Vol. 3, No. 4. P. 47–63.
2. *Kolodin A.A., Melnik S.A.* Upravlenie na osnove prognoziruyushhej modeli (model predictive control). Pererabotka prirodnogo i texnogenного sy`r`ya: sbornik nauchnyx trudov studentov, magistrantov, aspirantov i molodyx uchenyx Instituta vy`sokix texnologij. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2018. Pp. 9–14. (In Russian).
3. *Martin-Sánchez Juan M., Rodellar José.* Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization. Prentice-Hall. 1996. P. 352.
4. *Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba.* Model Predictive Control. Springer publication, London. 2007. P. 405.
5. *Rawlings J.B.* Tutorial: Model Predictive Control Technology. Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California. 1999. Pp. 662–676.
6. *Carlos E. Garcia, David M. Prett and Manfred Morari,* Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey. Automatica. 1989. Vol. 25, No. 3. Pp. 335–348.
7. *Tao Zheng.* Advanced Model Predictive Control. InTech, Croatia. 2011. P. 418.
8. *Holkar K.S., Waghmare L.M.* Discrete Model Predictive Control for DC drive Using Orthonormal Basis function. UKACC International Conference on CONTROL. Coventry, UK. 2010. Pp. 435–440.
9. *Mohanty, Swati.* Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column. Journal of Process Control. 2009. Vol. 19. Pp. 991–999.
10. *Richalet J.* Industrial applications of model based predictive control. Automatica. 1993. Vol. 29. P. 1251–1274.
11. *Abu-Ayyad M., Dubay R.* Real-time comparison of a number of predictive controllers. ISA Transactions. 2007. Vol. 46. Pp. 411–418.
12. EP10 e`mulyator pechi. <https://owen.ru/product/ep10> (accessed November 10, 2020) (In Russian).
13. *Tarasov D.E., Kolodin A.A.* Postroenie matematicheskoy modeli pechi uchebnogo stenda. Perspektivy razvitiya texnologii pererabotki uglevododorodnyx i mineral`nyx resursov. Materialy X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. 2020. Pp. 238–242. (In Russian).
14. *Kothare M., Balakrishnan V., Morari M.* Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. Automatica. 1996. Vol. 32(10). Pp. 1361–1379.
15. *Draeger S. Engel H. Ranke.* Model predictive control using neural networks. IEEE Control System Magazine. 1995. Vol. 15, No. 5. Pp. 61–66.