

# Разработка метода управления с прогнозированием\*

Беляев Ю.И., Предместьин В.Р., Гавриленко А.И.

Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева  
г. Новомосковск, Российская Федерация  
[docent\\_77@mail.ru](mailto:docent_77@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье представлены основные проблемы современных систем управления технологическими объектами и кратко описан процесс разработки и внедрения одного из возможных решений данной проблемы – регулятора с прогнозированием. Приведено подробное описание использованной экспериментальной установки, для исследования методов управления. Разработан нестандартный метод управления с прогнозированием. Проведено математическое моделирование работы регулятора с прогнозированием и сравнение его работы с стандартным ПИД регулятором. На основании методики запрограммирован регулятор, не требующий никакой предварительной настройки. Проведено сравнение работы регулятора с прогнозированием и стандартного ПИД регулятора. На основании проделанной работы приведены обоснования и сделаны выводы о целесообразности внедрения и применения регулятора с прогнозированием в действующие производства для повышения экономической эффективности систем управления технологическими объектами.

**Ключевые слова:** ПИД регулятор, управление с прогнозированием, настройки регулятора, переходный процесс, перерегулирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Главной причиной ослабления настроек и, как следствие, ухудшение качества работы систем регулирования являются крайне частые изменения характеристик объекта регулирования. Подобные изменения возникают из-за неустойчивого режима работы объектов, свойств измерительных устройств и регулирующих органов, взаимосвязанности контуров в многомерных системах [1].

Обычно при построении систем управления технологическими объектами мы предполагаем, что их математическое описание и возмущающие воздействия либо известны, либо могут быть найдены [2]. Однако, описание реального промышленного объекта, в следствие его нестабильности может оказаться достаточно сложной, а иногда и неразрешимой задачей [3].

В промышленных объектах типичным является изменение подобных параметров, как коэффициенты передачи, постоянные времени, время чистого запаздывания [4]. В реальных технологических объектах данные параметры вполне могут изменяться в несколько раз. Стоит так же отметить, что, как правило, параметры реальных технологических объектов связаны нелинейными и трудноопределимыми зависимостями. Нестабильность в системах управления и технологических объектах возникает в следствие действия двух факторов: не стационарности и нелинейности [5].

Отличительными чертами современных химических производств, которые представляют собой сложные кибернетические системы, являются: нестационарность

статических и динамических характеристик процессов, которые протекают в аппаратах; сложность характера зависимости между входными и выходными переменными процесса, наличие нелинейностей, запаздывания; разнообразие химических и физико-химических процессов, которые протекают в аппаратах и так далее [6].

На сегодняшний день обслуживающий персонал не располагает пригодными для промышленных условий методическими и инструментальными средствами определения произошедшего нарушения работы контура и методиками необходимого пересчета настроечных параметров.

В условиях эксплуатации единственное решение – ослабление настроек, что снизит взаимовлияние контуров друг на друга, обеспечив тем самым требуемый запас устойчивости при различных режимах работы объекта. Однако качество работы системы при этом ухудшится, а прибыль будет меньше, чем при настройках, соответствующих характеристикам объекта [7].

Целью данной работы является исследование возможности применения методов управления с прогнозированием химико-технологическими процессами и создание на основе этих исследований промышленных регуляторов, не требующих предварительной настройки.

## ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Кардинальное решение этой проблемы видится в создании метода управления, не требующего никакой предварительной настройки.

Структурная схема метода управления с прогнозированием представлена на рис. 1.

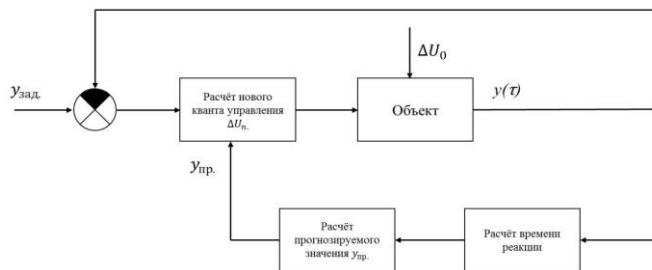


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Изначально подается некоторое ступенчатое воздействие, затем ожидаем реакцию на это воздействие, определяем динамические свойства и переходим к расчёту следующего воздействия [8].

Основной вопрос, который возникал при разработке системы управления заключался в том в какой момент

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

времени делать прогноз. Для определения этого времени был введен критерий, названный показателем динамического состояния объекта [7].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА

Для того, чтобы сделать прогноз необходимо, знать постоянную времени процесса. Для оценки постоянной времени был введен некоторый критерий, названный показателем динамического состояния объекта, который позволяет уйти от коэффициента передачи и амплитуды входного сигнала, и рассчитывается по формуле (1)

$$f(\tau) = \frac{y'(\tau)}{y(\tau)} * \Delta\tau. \tag{1}$$

“Поскольку считаем, что объект описывается апериодическим звеном первого порядка” [9] (2), то формулу (1) можно преобразовать, заменив отношение  $\tau$  к  $T$  на  $\zeta$  в результате чего получим уравнение (3)

$$y(\tau) = k * \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right), \tag{2}$$

$$f(\zeta) = \zeta * \frac{e^{-\zeta}}{1 - e^{-\zeta}}, \zeta = \frac{\tau}{T}. \tag{3}$$

Проведенные модельные исследования показали, что независимо от величины постоянной времени значения  $f(\tau)$  и  $f(\zeta)$  будут соответствовать одним и тем же значениям времени переходного процесса по отношению к времени установившегося значения (рис. 2-4).

Приведенные выше графики были получены с помощью приложения Mathcad. Графикам, изображенным на рис. 2, соответствуют формулы (4-5)

$$y(\tau, T_0) = k * \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right), k = 1, T = 1, \tag{4}$$

$$f(\tau, T_0) = \frac{\left(\frac{d}{d\tau}y(\tau, T_0)\right)}{y(\tau, T_0)} * \tau, \tau = 0, 0.01 \dots 6, \tag{5}$$

на рис. 3 – формулы (6-7)

$$y(\tau, T_0) = k * \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right), k = 1, T = 5, \tag{6}$$

$$f(\tau, T_0) = \frac{\left(\frac{d}{d\tau}y(\tau, T_0)\right)}{y(\tau, T_0)} * \tau, \tau = 0, 0.01 \dots 30, \tag{7}$$

а на рис. 4 – формулы (8-9).

$$y\gamma = k * \left(1 - e^{-\gamma}\right), k = 1, \tag{8}$$

$$f\gamma(\gamma) = \frac{e^{-\gamma}}{1 - e^{-\gamma}}, \gamma = 0, 0.01 \dots 6, \tag{9}$$

Очевидно, что зависимость  $f(\zeta)$  можно заранее рассчитать, а затем, рассчитывая в режиме реального времени  $f(\tau)$  можно найти постоянную времени  $T$  при любом  $\tau$ .

В ходе разработки алгоритма были проведены исследования, которые позволили найти оптимальное значение показателя динамического состояния объекта, при котором определяется время, необходимое для прогноза.

Как только  $f(\tau)$  становится меньше 0,7 находим прогнозируемое значение по формуле (10)

$$U_{пр.} = \frac{y_1}{0.63}, \tag{10}$$

Зная  $U_{пр.}$  можно рассчитать коэффициент передачи по формуле (11) для первого переходного процесса, вызванного воздействием  $\Delta U_0$

$$k_0 = \frac{U_{пр.} - y_0}{\Delta U_0}. \tag{11}$$

Рассчитываем следующее управляющее воздействие  $\Delta U_1$  по формуле (12)

$$\Delta U_1 = \frac{y_{зад.} - y_1}{k_0}. \tag{12}$$

Далее рассчитываем все характеристики для переходного процесса, вызванного управляющим воздействием  $\Delta U_1$ .

Управление осуществляется тактами после того, как

становится известна реакция объекта на предыдущее управляющее воздействие. Разработанный на основе алгоритма регулятор не требует никакой предварительной настройки. Единственное, что необходимо задать заранее – это начальное воздействие, величину которого можно определить исходя из характеристик объекта.

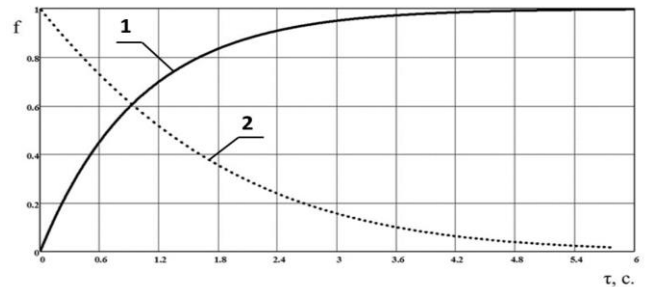


Рис. 2. Сравнение  $f(\tau)$  и  $y(\tau)$   $\tau \in (0 \dots 6)$ : 1 –  $y(\tau, T_0)$ ; 2 –  $f(\tau, T_0)$

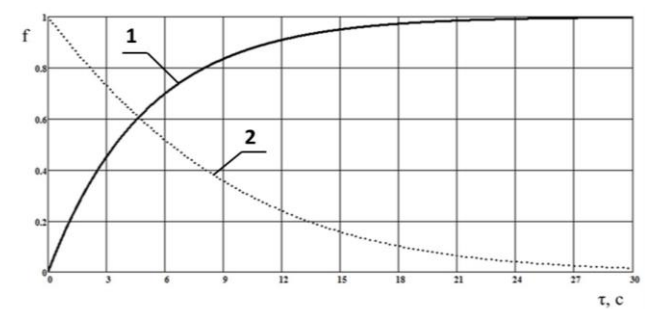


Рис. 3. Сравнение  $f(\tau)$  и  $y(\tau)$   $\tau \in (0 \dots 30)$ : 1 –  $y(\tau, T_0)$ ; 2 –  $f(\tau, T_0)$

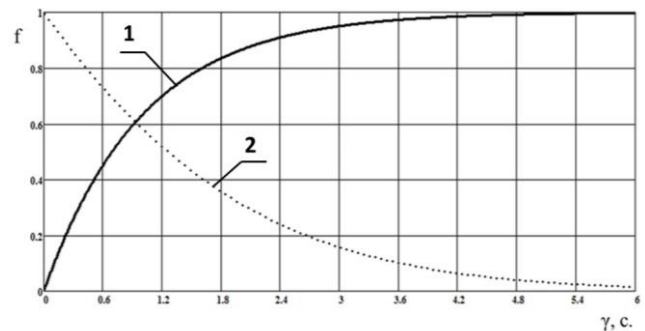


Рис. 4. Сравнение  $f(\zeta)$  и  $y(\zeta)$   $\zeta \in (0 \dots 6)$ : 1 –  $y\gamma$ ; 2 –  $f\gamma(\gamma)$

ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАННОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментальных исследований методов регулирования была создана экспериментальная установка, схема, которой представлена на рис.5. Установка состоит из вертикально расположенной трубы, по которой при помощи вентилятора пропускается воздух, нагреваемый тэном [10].

Для экспериментальных исследований была создана программа на языке C sharp, которая реализует алгоритмы ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием. “Данная программа позволяет выполнять следующие функции: подача ступенчатого воздействия, ПИД регулирование” [11], регулирование с прогнозированием [12].

При разработке алгоритма и проверки его эффективности, в сравнении с ПИД регулятором были проведены десятки исследований. В качестве датчика температуры использовался платиновый термометр сопротивления с

малой инерционностью (0,2 с.). В этом случае результаты работы ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием практически идентичны [7].

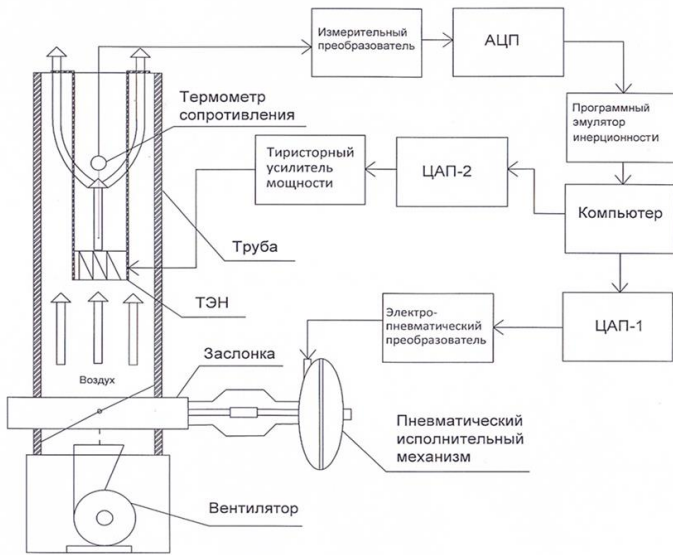


Рис. 5. Схема установки

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА

Следующий этап исследований был связан с подключением программного эмулятора в результате чего инерционность возросла до 5 минут. Рис. 6-9 иллюстрируют работу ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием при этой инерционности [5].

В табл. 1-3 представлено подробное сравнение характеристик ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием.

Табл. 1

Сравнение времени переходного процесса ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием

	Время переходного процесса, с.		
	при переходном процессе	при изменении задания	при изменении нагрузки
ПИД	1220	856	1260
Рег. с прогн.	370	684	171
Отношение	3,2	1,2	7,3

Табл. 2

Сравнение перерегулирования ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием

	Перерегулирование, °С.		
	при переходном процессе	при изменении задания	при изменении нагрузки
ПИД	2,3	3	12
Рег. с прогн.	0,1	0,3	3
Отношение	23	10	4

Табл. 3

Сравнение энергозатрат ПИД регулятора и регулятора с прогнозированием

	Энергозатраты, В <sup>2</sup> * С		
	при переходном процессе	при изменении задания	при изменении нагрузки
ПИД	111523,3	9069,3	38422,4
Рег. с прогн.	51875,8	5746	3444,9
Отношение	2,1	1,5	11,1

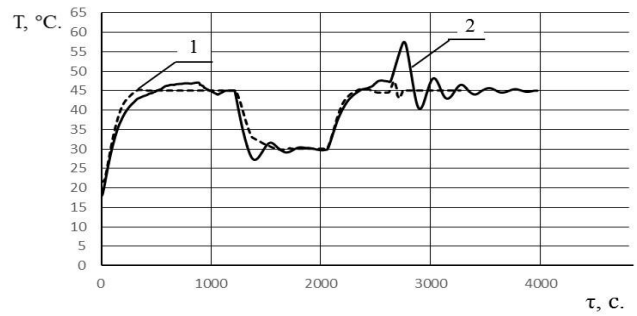


Рис. 6. Переходный процесс: 1 – регулятора с прогнозированием; 2 – ПИД регулятора

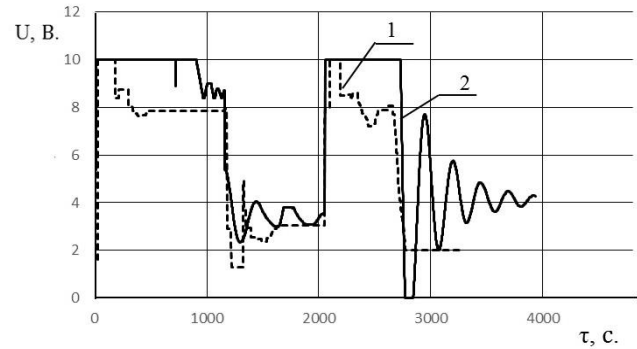


Рис. 7. Управляющее воздействие: 1 – регулятора с прогнозированием; 2 – ПИД регулятора

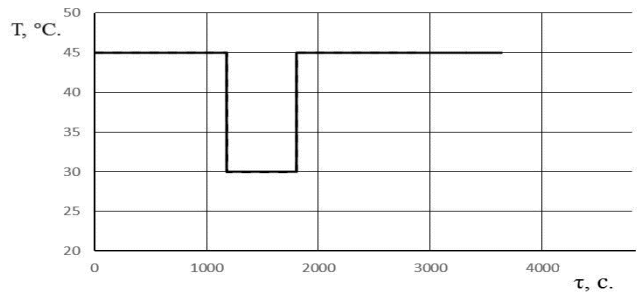


Рис. 8. Задание

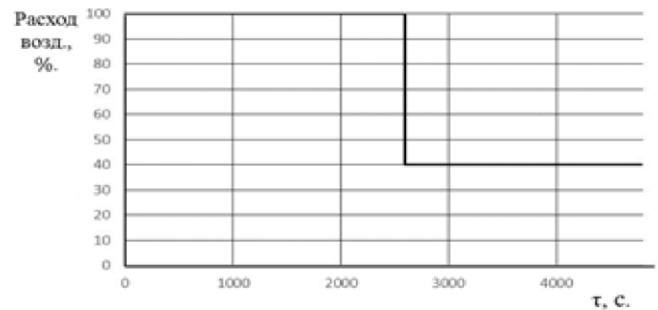


Рис. 9. Возмущающее воздействие

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные проблемы повышения качества управления технологическими процессами при использовании стандартных промышленных регуляторов [13].

На современных предприятиях более половины контуров работают с настройками, которые приближены к размыванию контуров (ослабленные настройки).

Настройки контуров ослабляются для того, чтобы обеспечить работу АСУТП при изменении нагрузки на объект, свойств сырья, параметров окружающей среды и т.д.[14]

Ослабленные (всерезимные) настройки регуляторов, являются основным недостатком в работе действующих систем управления.[15]

Основными факторы, влияющими на настройки стандартных регуляторов:

- изменение свойств сырья;
- нагрузка на аппарат;
- изменение природных условий;
- ремонт и обновление технологического оборудования;
- человеческий фактор.

К сожалению, большинство методов улучшения качества, которые предлагает теория управления, являются по сути непригодными для промышленных условий.

Поэтому в данной работе была исследована возможность разработки и создания регулятора, который не требовал бы никакой предварительной настройки.

Отличительные особенности регулятора:

- управление осуществляется тактами после того, как становится известна реакция объекта на предыдущее управляющее воздействие;
- данный регулятор не требует никакой предварительной настройки;
- единственный параметр, который необходимо задать заранее – это начальное воздействие, величину которого можно определить исходя из характеристик объекта.

Для проведения исследований была создана лабораторная установка, которая обладает отличительными чертами промышленных технологических объектов, а именно: нестационарностью статических и динамических характеристик процессов; сложностью характера зависимости между входными и выходными переменными процесса, наличием нелинейностей, запаздывания [3].

Эксперименты, проведенные на установки, показали высокую эффективность регулятора с прогнозированием в сравнении с ПИД регулятором, которая подтверждается расчётом основных критериев качества системы управления, таких, как время переходного процесса и перерегулирование. Следует так же отметить значительно меньшее энергопотребление при управлении у регулятора с прогнозированием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Stephanopoulos G. Chemical Process Control – An Introduction to Theory and Practice. – Prentice Hall. – 1984.
2. Добрынин А.С. К вопросу построения прецедентных управляющих систем на основе опорно-возмущенного движения / А.С. Добрынин, М.Ю. Гудков, Р.С. Койнов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – №3. – С. 17-24.
3. Сапожников А.В. Применение теории бинарных систем для управления химико-технологическими процессами // Молодой ученый. – 2014. – №10(69). – С. 204-205. — URL: <https://moluch.ru/archive/69/11802/> (дата обращения: 20.12.2021).
4. Шишмарёв В. Ю. Автоматика: учебник для академического бакалавриата. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 280 с.

5. Николаев Е. В. Технологические объекты второго порядка с запаздыванием // Молодой ученый. – 2017. – №23(157). – С. 149-152. – URL: <https://moluch.ru/archive/157/44323/> (дата обращения: 20.12.2022).

6. Давыдов Р. В. Адаптивное управление и прогнозирование состояния нестационарных технологических объектов с запаздыванием: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: – Ангарск, 2003. – 215 с.

7. Предместьин В.Р. Проблемы повышения качества промышленных систем регулирования / В.Р. Предместьин, И.В. Предместьин, Н.А. Федин // XXXI научная конференция профессорско-преподавательского состава и сотрудников НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Тезисы докладов. Часть 2 / ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт(филиал), Новомосковск, 2017. – С. 123-124.

8. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пиани. СПб.: Невский Диалект. – 2001.

9. Серебряков А.С. Автоматика: учебник и практикум для академического бакалавриата / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов, Е.А. Чернов; под общ. ред. А.С. Серебрякова. — М.: Издательство Юрайт, 2016. – 431 с.

10. Беляев Ю.И. Исследование эффективности метода управления с прогнозированием / Ю.И. Беляев, В.Р. Предместьин, И.В. Предместьин. – LAP LAMBERT Academic Publishing is a trademark of International Book Market Service Ltd., – 2019. – 95 с.

11. Предместьин И.В. Разработка и исследование метода интуитивного управления / И.В. Предместьин, В.Р. Предместьин, П.А. Киреев, Ю.И. Беляев // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXI, №4(173). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2016. – С. 65-67.

12. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. – 2006. – №4. – С. 66-74.

13. Сидорова А.А. Анализ эффективности алгоритмов автоматической настройки адаптивных промышленных пид-регуляторов / А.А. Сидорова, А.М. Мальшенко // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т.318, №5. – 115 с.

14. Александров А.Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах / А.Г. Александров, М.В. Паленов // Труды 3-й Всерос. конф. с междунар. участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения». – М.: ИПУ РАН, 2012. – С. 1577-1587.

15. Штейнберг Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Серёжин, И.Е. Залуцкий, И.Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С. 1-7.



# Development of a Control Method with Forecasting

Belyaev Yu.I., Predmestin V.R., Gavrilenko A.I.

Novomoskovsk affiliate branch of D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
Novomoskovsk, Russian Federation  
[docent\\_77@mail.ru](mailto:docent_77@mail.ru)

**Abstract.** This article presents the main problems of modern control systems of technological objects and briefly describes the process of development and implementation of one of the possible solutions to this problem - a controller with forecasting. A detailed description of the experimental setup used to test control methods is presented. A non-standard method of control with forecasting is developed. The mathematical modeling of the regulator with forecasting and compare of its work with the PID regulator has been carried out. Based on the method, a controller that does not require any presetting has been programmed. The work of the

regulator with forecasting and the standard PID regulator was compared. On the results of this work, justifications and conclusions about the expediency of introducing and using the forecasting regulator in the existing production facilities to improve the economic efficiency of control systems of technological objects have been made.

**Keywords:** PID controller, prediction control, regulator settings, transient, overshoot.

---

## Библиографическое описание статьи

Беляев Ю.И. Разработка метода управления с прогнозированием / Ю.И. Беляев, В.Р. Предместин, А.И. Гавриленко // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2022. – Т.9, №2. – С. 34-38. DOI: 10.24892/RIJIE/20220206

---

## Reference to article

Belyaev Yu.I., Predmestin V.R., Gavrilenko A.I. Development of a control method with forecasting, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, vol.9, no.2, pp. 34-38. DOI: 10.24892/RIJIE/20220206

---