ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.5

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130

Объекты управления с переменным транспортным запаздыванием

Леонов Р. Е.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: Inprep2011@yandex.ru

Реферат

Цель работы – анализ одного из классов систем автоматического регулирования горнообогатительных объектов, в которых управляющим воздействием является расход энергоносителя или вещества, осуществляемый транспортируемым органом, с целью выработки рекомендаций по повышению устойчивости и качества регулирования.

Методика исследований состоит в получении модели системы автоматического регулирования и исследовании на ней влияния переменного транспортного запаздывания, возникающего в процессе стабилизации выходной величины системы автоматического регулирования. На модели системы измерялась среднеквадратичная ошибка регулирования выходной величины при изменении запаздывания основного управляющего воздействия.

Обсуждение результатов произведено на примере процесса управления, в котором регулирование выходной величины объекта управления осуществляется конвейером, подающим руду. Показано, что при изменении управляющего воздействия (расхода руды) одновременно изменяется и время доставки. Такие объекты относятся к объектам с изменяющимся параметром – запаздыванием в управлении, и изучены мало. Показано, что системы регулирования подобного типа не могут в общем случае удовлетворительно работать. Одним из основных методов повышения качества таких систем регулирования является применение «упредителя Смита». Однако в этом случае система автоматического регулирования будет удовлетворительно работать при неизменности параметров объекта управления, что в горнообогатительном производстве практически невыполнимо. Запаздывание в таких системах однозначно связано со скоростью подачи материала. Предложено в зависимости от скорости конвейера автоматически изменять настройки регулятора. В качестве альтернативы предложено подачу материала осуществлять агрегатом с постоянной скоростью, а расход осуществлять в соответствии с изменением выходной величины объекта управления отдельным дозатором.

Ключевые слова: система автоматического регулирования; переменные параметры; переменное запаздывание; настройки; пропорционально-интегральный регулятор.

Введение. При создании систем автоматического регулирования (САР) на этапе проектирования часто необходимо ориентировочно определить настройки регулятора и оценить работоспособность САР.

Большое число объектов регулирования составляют технологические агрегаты, моделью которых в автоматике принято считать инерционное звено с запаздыванием. Сюда в частности относятся мельницы обогатительных фабрик, сушилки и обжиговые печи и целый ряд других объектов горнообогатительной промышленности и химических технологий.

Управляющим воздействием является обычно расход материала, топлива, руды, пульпы и прочих веществ, изменяя который стабилизируют выходную величину объекта управления (ОУ).

В качестве примера далее рассматривается ОУ, выходом которого является технологический параметр, например содержание полезного компонента, который должен находиться на заданном уровне.

Уровень выходной величины регламентирован технологическими требованиями, и при отклонении его значения от заданной величины САР поддерживает его на заданном уровне путем изменения количества вещества, подаваемого в агрегат.

В свою очередь, подача вещества регулируется за счет изменения скорости конвейера, подающего продукт на вход ОУ. На обогатительных фабриках в начале конвейера находится бункер, из которого продукт подается на конвейер. Это одна из самых распространенных схем расположения оборудования.

Рис. 1. Технологическая схема ОУ:

- 1 – бункер с материалом; 2 – конвейер подачи материала;
 3 – материал на ленте конвейера; 4 – технологический ОУ;
 5 – выходная величина ОУ; 6 – приводной двигатель с редуктором
- Fig. 1. Flow sheet of the control object:
 1 – bunker filled with material; 2 – material feed belt conveyor;
 3 – material on the conveyor track; 4 – process control object; 5 – output value of the control object; 6 – drive actuator with a reducer

Для некоторых ОУ в качестве управляющей величины используется не твердый продукт, а пульпа. Последняя подается трубопроводом, и изменение ее расхода осуществляется путем изменения производительности насоса, перекачивающего пульпу. В обоих приведенных примерах управляющим воздействием является расход транспортируемого вещества.

В настоящее время за счет применения в качестве регуляторов программируемых логических контроллеров (ПЛК) и регулируемых электроприводов конвейеров и перекачивающих насосов изменение входного потока вещества в ОУ осуществляется путем регулирования скорости конвейера или производительности насоса, перекачивающего пульпу.

При этом однако не учитывается, что одновременно с основным воздействием САР (регулированием расхода) изменяется и время доставки продукта до ОУ.

Если изменение расхода предусмотрено как основное управляющее воздействие САР, то изменение времени доставки материала до ОУ приводит к изменению запаздывания в САР. Таким образом, рассматриваемый класс САР относится к системам с переменным запаздыванием, в более общей терминологии – САР с переменными параметрами. Таким процессам, в частности в горнообогатительной промышленности, разработчики САР уделяют мало внимания. Между тем, как показано далее, изменение времени запаздывания в некоторых случаях приводит к ухудшению параметров САР и может даже привести к неработоспособным режимам.

Целью работы является исследование работоспособности систем с переменным запаздыванием в управляющем воздействии и рекомендации по обеспечению работоспособности таких систем.

Методика исследований. На рис. 1 приведена схема рассматриваемого далее ОУ.

Как видно из рис. 1, регулирование выходной величины ОУ осуществляется за счет изменения расхода материала 3, подаваемого в ОУ. В свою очередь, изменение расхода осуществляется изменением скорости конвейера 2. Скорость изменяет электродвигатель конвейера с редуктором 6.

При создании САР к объекту рис. 1 добавляется регулятор (ПЛК), который в соответствии с заданием САР изменяет скорость конвейера при отклонении выходной величины ОУ от заданного значения.

Работоспособность САР с запаздыванием существенно зависит от соотношения величины запаздывания и постоянных времени элементов САР [1, 2–5].

Рис. 2. Функциональная схема САР
Fig. 2. Functional flow block diagram of ACS

При разработке САР настройки регулятора обычно рассчитывают на основе методики [6, 8–11], которая основана на допущении о постоянном отношении времени запаздывания ОУ к его постоянной времени. Кроме того, эта методика предполагает, что ОУ является инерционным звеном первого порядка. Оба этих допущения, как видно из сказанного, в данном случае не выполняются.

Исследование выполнено на примере системы, приведенной на рис. 2.

Передаточная функция конвейера с электроприводом, тиристорным преобразователем и преобразователем входного сигнала в расход продукта на ленте имеет вид $W1(s) = 1/(20s + 1)$, передаточная функция ОУ с преобразователем выходной величины в масштаб, сравнимой с заданием пропорционально интегральному (ПИ) регулятору имеет вид $W2(s) = 0,005 \exp(-L/v)/(200s + 1)$. На рис. 3 приведена преобразованная схема замкнутой САР с переменным запаздыванием. На схеме запаздывание отнесено к ОУ.

Запаздывание связано с длиной конвейера и скоростью движения ленты как $\tau = L/v$, где L – длина ленты конвейера, v – скорость ленты.

Для численных расчетов использованы следующие данные: $L = 20$ м. Первоначально скорость конвейера принималась равной 1 м/с и в дальнейшем изменялась в диапазоне от 0,1 до 1,2 м/с.

Задача исследования САР с переменным запаздыванием в управляющем воздействии выполнялась в два этапа. На первом этапе сделана попытка оптимальной постоянной настройки регулятора в системе.

Влияние переменного запаздывания на работоспособность САР изучалось на модели системы. Для сравнения эффективности управления варьировались настройки ПИ-регулятора (коэффициент пропорциональности P и величина I , обратная времени удвоения). ПИ-регулятор представлен в параллельной форме: $P + I/s$. Для ряда значений P и I система настраивалась на технический оптимум [12].

Эффективность настройки САР зависит от допустимого перерегулирования, времени достижения выходной величиной установившегося значения (времени

переходного процесса), оценки переходного процесса, которая принимается во внимание (по задающему воздействию или по возмущению), от места приложения возмущения, если настройка производится по возмущению, от величины и наличия колебаний выходной величины и многих других факторов. Многие из этих величин носят качественный характер (например, есть ли какие-либо ступеньки в переходной характеристике и сколько таких ступенек). К сожалению, сегодня отсутствует какой-либо способ учесть все эти величины в виде одного критерия, по которому можно было бы сравнивать различные настройки САР.

Рис. 3. Преобразованная схема САР с переменным запаздыванием
Fig. 3. Transformed scheme of ACS with varying delay

На этом этапе исследования оптимальной считалась такая настройка САР, при которой перерегулирование выходной величины было не более 20 %, допустимое количество колебаний выходной величины составляло не более двух полуолн. Сравнение различных настроек САР производилось по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (RMS) выходной величины САР по сравнению с заданием. Среднеквадратичная ошибка определялась за время 2000 с. Это более чем в 4 раза превышает сумму всех постоянных времени звеньев САР.

Таблица 1. Результаты оптимальной настройки САР с переменным запаздыванием

Table 1. Outcome of optimal adjustment for ACS with varying delay

Скорость v , м/с	Коэффициент пропорциональности P	Коэффициент I	100RMS	Перерегулирование, %
1,0	350	3,00	19,81	Менее 20
0,8	350	3,00	20,53	Менее 20
0,6	500	2,00	19,84	20
0,4	500	1,80	22,24	Отсутствует
0,2	200	0,80	30,87	Менее 20
0,1	200	0,55	39,05	Менее 20

Предполагаемая длина конвейера, подающего руду, (управляющее воздействие) принята 20 м, скорость ленты в процессе управления изменялась в диапазоне от 0,1 до 1,2 м/с.

Для возможности сравнения с САР, у которой отсутствует запаздывание, отдельно на модели исследованы режимы работы САР при скорости движения ленты 20 м/с. Естественно, такие скорости конвейерной ленты практически невозможны. Однако рассмотрение такого режима (τ примерно равно нулю) дает возможность сравнить реальную САР с САР без запаздывания, так как при этих величинах скорости запаздывание САР с конвейером длиной 20 м пренебрежимо мало по сравнению с постоянными времени звеньев САР.

Исследования показали, что САР с незначительным запаздыванием (менее 1 с) легко настроить даже со значениями $P = 2000\text{--}3000$ и значениями $I = 4\text{--}9$.

При этом значения среднеквадратичной ошибки $100\text{RMS} = 8\text{--}9$. Оптимальной считалась САР с минимальной величиной RMS.

В табл. 1 приведены данные оптимальной настройки САР при скоростях конвейера 0,1–1,0 м/с.

По сравнению с САР без запаздывания среднеквадратичная ошибка за время 2000 с оказалась в 3–4 раза больше, что свидетельствует о незначительной эффективности постоянной настройки регулятора.

На втором этапе исследования считалась приемлемой такая настройка регулятора, при которой учитывалось время переходного процесса.

Таблица 2. Влияние скорости конвейера на переходные режимы САР
Table 2. Conveyor speed influence on ACS transition modes

Эксперимент	v , м/с	Настройки регулятора		Время переходного процесса, с	Примечания
		P	I		
1	1,2	200	1,2	420	Без перерегулирования
2	0,1	200	1,2	7000	Колебательный переходный процесс, перерегулирование 50 %
3	1,2	500	5,0	400	Перерегулирование 20 %
4	0,8	500	4,0	400	Перерегулирование 20 %
5	0,1	100	0,6	2000	Перерегулирование 20 %
6	0,1	500	4,0	–	Неустойчивость

Настройки пропорционально интегрального регулятора были подобраны так, чтобы получить переходный процесс в замкнутой САР без перерегулирования и с минимальным временем выхода на установившийся режим работы. Результаты влияния изменения скорости конвейера на показатели переходного процесса в замкнутой САР приведены в табл. 2.

В экспериментах 1, 2 САР первоначально была настроена на переходный процесс без перерегулирования. Из результатов этих экспериментов следует, что снижение скорости конвейера хотя и не привело к неустойчивости САР, но в то же время в 16 раз увеличило время переходного процесса по сравнению с первоначальными настройками.

При первоначальной настройке САР на переходный процесс с 20 %-ным перерегулированием (результаты 3–6) качество системы существенно ухудшилось. В частности, замедление конвейера привело к потере работоспособности САР (неустойчивость в режиме 6). При подстройке регулятора можно сохранить работоспособность САР (режим 5). Однако и в этом случае происходит недопустимое увеличение времени окончания переходного процесса.

На рис. 4 приведены графики переходных процессов при единичном ступенчатом воздействии на входе САР при высокой (1,2 м/с) и низкой (0,1 м/с) скорости конвейера. T_z – время запаздывания. Как видно из графиков σ , ε , при малой скорости конвейера ($T_z = 200$ с) время переходного процесса в САР недопустимо велико.

В большинстве рассматриваемых в публикациях САР с переменными параметрами параметры являются функциями времени [1, 2–4, 11, 12]. В отличие от этих систем в рассматриваемой САР изменяется запаздывание. При этом переменный параметр – запаздывание – является функцией от управляющей величины и непосредственно от времени не зависит.

Такие САР изучены мало. В то же время знание, что с каждой величиной управляющего воздействия однозначно связано определенное запаздывание, дает

возможность предвидеть результаты управления и заблаговременно принять меры. В частности, известен способ улучшения качества САР с запаздыванием с использованием упредителя Смита [6]. В данном случае такая схема может быть легко реализована программным путем на ПЛК.

На рис. 5 приведена схема САР с использованием упредителя Смита.

На схеме обозначены: W_p – регулятор, W_o – объект регулирования с запаздыванием, W – модель объекта без учета запаздывания.

Рис. 4. Переходные процессы замкнутой САР
Fig. 4. Transition processes of the closed ACS

Использование схемы упредителя позволяет в некоторой мере снизить отрицательное влияние запаздывания на качество систем регулирования. В то же время надо отметить [5], что такая схема требует точного соответствия модели объекта управления реальному объекту. Это условие почти всегда трудно достижимо. Анализ на модели системы управления транспортным устройством с переменным запаздыванием, рассмотренной ранее, показал, что изменение коэффициента передачи объекта, постоянных времени объекта или привода конвейера, заложенных в модели, на 20 % резко увеличивает переходный процесс или вообще делает систему регулирования неустойчивой.

В то же время подстройка параметров регулятора с учетом скорости движения ленты конвейера позволяет избежать этого.

При реализации управления для любого управляющего воздействия (расхода) устанавливается соответствующая скорость конвейера. В свою очередь, каждой скорости однозначно соответствует запаздывание. Следовательно, можно в соответствии с известным запаздыванием программно создать компенсирующую цепь.

Моделирование системы рис. 5 с учетом компенсации показало, что даже в наихудших режимах работы САР сохраняет устойчивость, хотя время регулирования безусловно увеличивается. Полностью избавиться от увеличения длительности переходного процесса при малых скоростях движения ленты конвейера (большом времени запаздывания) невозможно, так как при таких скоростях слишком мала величина управляющего воздействия.

Рассмотренное исследование показало, что кардинальным способом обеспечения качества систем управления рассмотренного типа является разделение изменения основной управляющей величины (расхода) и времени его доставки. САР рассмотренного типа более работоспособны, если регулировать расход вещества не с помощью изменения скорости конвейера, а с помощью изменения производительности дозатора под бункером, например изменения числа его оборотов или открытия шиберов под бункером.

Рис. 5. Компенсация запаздывания упредителем Смита

Fig. 5. Delay compensation by the Smith predictor

В случае, когда управляющим воздействием является расход пульпы, то целесообразно изменять расход потока, меняя проходное сечение трубопроводов с помощью задвижки и оставляя неизменным число оборотов перекачивающего насоса.

Выводы. Исследование качества и работоспособности САР с переменным запаздыванием в управляющем воздействии показало, что изменение величины запаздывания при изменении управляющего воздействия приводит к ухудшению качества САР и в некоторых режимах – к неустойчивости САР.

Возможность однозначно рассчитать величину запаздывания при изменении управляющего воздействия позволяет программно корректировать настройки регулятора в процессе работы САР, сохранять ее устойчивость и приемлемое качество управления.

Кардинальным способом улучшения качества САР подобного типа является разделение управляющего воздействия на управление потоком вещества и постоянную величину запаздывания управляющей величины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Б. Н., Соколов Н. И., Липатов А. В. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
2. Определение систем с переменными параметрами. URL: www.montag.ru/avtomatika/225-opredelenie-sistemy-s-premennymi-parametrami/ (дата обращения: 04.04.2020).
3. Системы с запаздыванием. URL: kilinachevny.ru/tau/0100.htm (дата обращения: 04.04.2020).
4. Куртис И. В. Система автоматического регулирования внутренней емкостной энергией объекта с переменными параметрами: пат. 2474857 Рос. Федерация. № 2010111738/08; заявл. 26.03.2010; опубл. 10.02.2013.
5. Бобиков А. И., Бубнова Т. С. Настройка параметров предиктора Смита с фильтром с помощью пакета Simulink response optimization. URL: <http://vestnik.rsreu.ru/ru/archive/2017/3-vypusk-61/461-1995-4565-2017-61-3-96-104> (дата обращения: 10.07.2020).
6. Гудвин Г. К., Гребен С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: Бином, 2010. 911 с.
7. Система автоматического регулирования для объектов с запаздыванием. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU538339A1_19761205 (дата обращения: 10.10.2020).
8. Система регулирования объектов с запаздыванием и нестационарных объектов. URL: <https://helpiks.org/4-8905.html> (дата обращения: 20.11.2020).
9. Устойчивость систем с запаздыванием. URL: <https://infopedia.su/15x14.d.html> (дата обращения: 12.11.2020).
10. Анализ устойчивости САР с транспортным запаздыванием. URL: https://studme.org/183431/tehnika/analiz_ustoychivosti_transportnym_zapazdyvaniem (дата обращения: 20.10.2020).

11. Control systems/systems delays. URL: https://en.wikibooks.org/wiki/Control_Systems/Systems_Delays (дата обращения: 06.09.2020).

12. Delays in control systems. URL: <http://users.ece.utexas.edu/~buckman/H3.pdf> (дата обращения: 02.09.2020).

Поступила в редакцию 28 октября 2020 года

Сведения об авторах:

Леонов Рафаил Ефимович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий Уральского государственного горного университета. E-mail: lnprep2011@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130

Control objects with variable transport delay

Rafail E. Leonov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim is to analyze a class of automatic control systems at mining and concentrating facilities, where controlling action is the consumption of fuel or substance by a transporting body in order to develop recommendations on stability and control quality improvement.

Research methodology consists in working out a model of automatic control system and studying the influence of varying transportation delay on the model, which arises in the process of stabilizing the output value of the system of automatic control. The RMS error of output value control was measured on the system's model when measuring the delay of the main controlling action.

Discussion was carried out by the example of the control process where the output value of the control object is regulated by the conveyor which feeds the ore. It has been shown that when changing the controlling action (ore consumption), time the delivery time also changes at the same time. These facilities refer to the facilities with the varying parameter – delay in control; they are poorly explored. It has been shown that control systems like that cannot adequately operate in the general case. One of the main methods of improving the quality of such control systems is to use the Smith predictor. However, in this case the system of automatic control will operate adequately under constant parameters of the control object, which is highly unlikely in the conditions of mining treatment. Delay in such systems is definitely associated with the speed of material feed. It has been proposed to automatically change regulator's settings depending on the speed of the conveyor. Material can be fed using an assembly with constant speed, as an alternative, while the consumption may be carried out in accordance with the variation of the control object output value by a separate feeder.

Key words: automatic control system; variable; varying delay; settings; proportional-plus-integral action controller.

REFERENCES

1. Petrov B. N., Sokolov N. I., Lipatov A. V. *Systems of automatic control of objects with variable parameters*. Moscow: Mashinostroyeniye Publishing; 1986. (In Russ.)
2. *Determining the systems with variable parameters*. Available from: www.montag.ru/avtomatika/225-opredelenie-sistemy-s-premennymi-parametrami [Accessed 04 April 2020].
3. *Systems with delay*. Available from: kilinachevnu.ru/tau/0100.htm [Accessed 04 April 2020].
4. Kurtis I. V. *System of automatic control by the internal capacity energy of the object with variable parameters*. Patent RF no. 2474857; 2013. (In Russ.)
5. Bobikov A. I., Bubnova T. S. *Adjusting the parameters of the Smith predictor with a filter with the help of Simulink response optimization software*. Available from: <http://vestnik.rsreu.ru/ru/archive/2017/3-vypusk-61/461-1995-4565-2017-61-3-96-104> [Accessed 10 July 2020]. (In Russ.)
6. Gudvin G. K., Grebe S. F., Salgado M. E. *Designing control systems*. Moscow: Binom Publishing; 2010. (In Russ.)
7. *System of automatic control for objects with delay*. Available from: https://yandex.ru/patents/doc/SU538339A1_19761205 [Accessed 10 October 2020]. (In Russ.)
8. *System of control for objects with delay and nonstationary objects*. Available from: <https://helpiks.org/4-8905.html> [Accessed 20 November 2020]. (In Russ.)
9. *Stability of systems with delay*. Available from: <https://infopedia.su/15x14.d.html> [Accessed 12 November 2020]. (In Russ.)
10. *Stability analysis for ACS with transport delay*. Available from: https://studme.org/183431/tehnika/analiz_ustoychivosti_transportnym_zapazdyvaniem [Accessed 20 October 2020]. (In Russ.)
11. Control systems/systems delays. Available from: https://en.wikibooks.org/wiki/Control_Systems/Systems_Delays [Accessed 06 September 2020].
12. Delays in control systems. Available from: <http://users.ece.utexas.edu/~buckman/H3.pdf> [Accessed 02 September 2020].

Received 28 October 2020

Information about authors:

Rafail E. Leonov – PhD (Engineering), Associate Professor, professor of the Department of Automation and Computer Technology, Ural State Mining University. E-mail: lnprep2011@yandex.ru

Для цитирования: Леонов Р. Е. Объекты управления с переменным транспортным запаздыванием // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 122–130. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130
For citation: Leonov R. E. Control objects with variable transport delay. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 122–130 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130