АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ/AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПОДАЧИ РУДЫ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

Мансурова О.К.[1], Лебедик Е.А.[2], Васильев А.Е.[3]

[1, 2, 3] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (lebedik_ea[at]pers.spmi.ru)

Аннотация

В работе рассматривается возможность применения обобщенного регулятора в системе автоматического управления скоростью движения ленточного конвейера при действии возмущающих воздействий гармонического типа для обеспечения заданной производительности транспортировки руды. Возмущения среды эксплуатации транспортных конвейеров вызывают падение производительности вследствие колебаний нагрузки исполнительного механизма, что приводит к изменению скорости. В качестве типовых возмущающих воздействий рассматриваются воздействия гармонического вида, аппроксимирующие описание возмущений. Для подавления влияния подобных возмущений на качество стабилизации скорости ленточного конвейера в работе предлагается использовать обобщенный регулятор, представляющий параллельное включение в контур ошибки пропорционально-интегрирующего (ПИ) регулятора и регулятора со встроенной моделью возмущающего воздействия. Обобщенный регулятор позволяет в замкнутой системе обеспечить астатизм первого порядка относительно задающего воздействия и полное подавление возмущающих воздействий, описание которых задается той же моделью, что и встроенная модель обобщенного регулятора.

Ключевые слова: ленточный конвейер, встроенная модель, обобщенный регулятор, управление, возмущение.

SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED CONTROL OF BELT CONVEYOR ORE CONVEYOR FOR METALLURGICAL PRODUCTION

Research article

Mansurova O.K.[1], Lebedik Y.A.[2], Vasilev A.Y.[3]

[1, 2, 3] Saint Petersburg Mining university, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (lebedik_ea[at]pers.spmi.ru)

Abstract

The work examines the possibility of using a generalized regulator in the system of automatic control of belt conveyor speed under the action of disturbing influences of harmonic type to ensure a given productivity of ore transportation. Disturbances in the environment of transport conveyors cause a drop in productivity due to fluctuations in the load of the executive mechanism, which leads to a change in speed. As typical, perturbing influences are regarded as influences of harmonic type, approximating the description of perturbations. To suppress the influence of such disturbances on the quality of belt conveyor speed stabilization, a generalized regulator is proposed to be used in the work, which represents a parallel inclusion of a proportional-integral (PI) regulator and a regulator with an embedded model of the disturbing influence in the error loop. In a closed-loop system, the generalized controller allows to ensure first-order astaticity with respect to the setting action and complete suppression of disturbing influences, the description of which is given by the same model as the built-in model of the generalized controller.

Keywords: belt conveyor, embedded model, generalized controller, control, disturbance.

Введение

Ленточные конвейеры – распространенные транспортные средства, применяемые в шахтах и карьерах для транспортирования руды и породы из проходческих, вскрышных, добычных забоев по горизонтальным и наклонным выработкам горных предприятий, для подъёма руды на поверхность с последующим её перемещением к обогатительной фабрике или погрузочному пункту внешнего транспорта, а породы — в отвал [1], [2], [3]. Одна из актуальных задач горного производства – качественное функционирование системы автоматического управления ленточным конвейером, обеспечивающее заданную производительность. В процессе эксплуатации ленточного конвейера можно выделить основные возникающие возмущения, такие как неравномерное поступление объемной массы, неоднородность размеров, состава, прочности и влажности подаваемой руды, изменение напряжения питания [2], [3]. Негативным последствием этих возмущений является нестабильная скорость движения ленты, пиковые нагрузки на натяжение ленты и на другие конструктивные элементы конвейера, приводящие к падению его производительности.

Цель работы – поддержание заданной технологическим процессом скорости движения ленты конвейера при действии возмущающих воздействий для обеспечения производительности.

Постановка задачи

Математические модели промышленных систем представлены в настоящее время в виде функциональных, структурных схем и направлены на освоение основ теории и практического использования современных методов анализа и синтеза систем на этапах проектирования [4], [5]. Функциональная схема системы автоматического управления ленточным конвейером представлена на рисунке рис. 1.

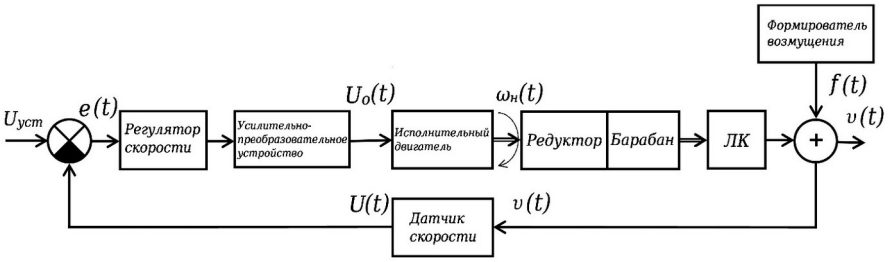

Рисунок 1 - Функциональная схема системы автоматического регулирования скорости ленточного конвейера
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.1

Функциональная схема содержит следующие элементы и обозначения:

- объект управления - ленточный конвейер ЛК, v(t)- линейная скорость перемещения ленты конвейера;
- исполнительный механизм, включающий двигатель с редуктором, барабаном и усилительно-преобразовательным устройством, $\omega_н$ (t) – номинальное значение скорости вращения двигателя, U(t) – напряжение обратной связи;
- первичные измерительные преобразователи - датчик скорости

перемещения ленты конвейера и натяжения ленты, U(t) – напряжение пропорциональное скорости движения ленты;

- обобщенный регулятор, вырабатывающий управляющие воздействия по текущей информации о скорости перемещения ленты конвейера и значении заданной скорости;
- задающее устройство, вырабатывающее задающий сигнал $U_{уст}$, соответствующий требуемой скорости перемещения ленты конвейера по регламенту технологического процесса;
- f(t) – возмущающие воздействия.

При анализе системы и синтезе регулятора будем использовать линейные модели элементов функциональной схемы в виде их передаточных функций. Обозначим через $W_0(p)$ передаточную функцию, включающую описание объекта управления, исполнительного механизма, датчика скорости и натяжения, $W_{рег}(p)$ передаточную функцию регулятора, и будем считать, что система структурно приведена к единичной обратной связи. Тогда структурная схема системы примет вид, представленный на рис. 2.

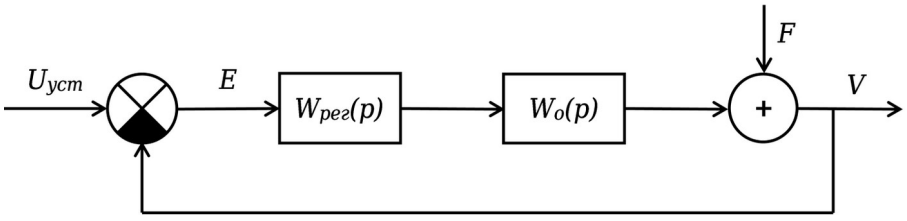

Рисунок 2 - Структурная схема системы
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.2

Задача синтеза регулятора для системы автоматического регулирования скорости ленточного конвейера заключается в выборе типа регулятора, его структуры и определении значений его параметров, обеспечивающих в замкнутой системе желаемые динамические свойства [6], [7]:

- показатели качества переходных процессов в виде времени переходного процесса $t_п \le t_п^*$, где $t_п$ – время переходного процесса системы, $t_п^*$ – желаемое время переходного процесса и величины перерегулирования $\sigma \le \sigma^*$, где σ – перерегулирование системы, σ^* - допустимое значение перерегулирования;
- точностные показатели в виде в виде максимально допустимой ошибки e_{max} отработки заданной скорости конвейера и возмущающих воздействий (перегрузка, недогрузка, растяжение ленты), описываемых в первом приближении гармоническим воздействием вида $f(t) = f_0\sin(\omega t)$, где f_0 – амплитуда гармонического воздействия, ω – круговая частота. Параметры возмущающего воздействия ограничены максимально допустимым значением амплитуды f_0^* ($f_0 \le f_0^*$) и диапазоном изменения круговой частоты $\omega_{min} \le \omega \le \omega_{max}$.

Методика проведения исследований

Предлагается для решения поставленной задачи использовать обобщенный регулятор, содержащий две составляющие [6], [8], [9], [10]. Первая составляющая, обеспечивает пропорционально-интегральный закон

управления, а вторая составляющая обеспечивает закон управления по встроенной модели внешнего воздействия. Первая составляющая обеспечивает в замкнутой системе требуемые показатели по качеству переходных процессов – времени переходных процессов, значению перерегулирования и точностные характеристики в виде добротности по скорости и соответствующему значению ошибки при отработке входного воздействия с постоянной скоростью [7], [11], [12]. В целях получения нулевой установившейся ошибки при отработке возмущающего воздействия данного типа в контур управления вводится вторая составляющая на основе знания модели внешнего воздействия. Предполагается, что анализ класса возмущающих воздействий позволил выделить наиболее существенные возмущения, приводящие к возникновению наибольших ошибок и получить модель их возникновения в виде автономного дифференциального уравнения.

Передаточная функция ПИ составляющей регулятора

$$W_{пи}(p) = \frac{k_{\text{Н}}\left(\frac{k_{\text{П}}}{k_{\text{Н}}}p+1\right)}{p}, \quad (1)$$

где $k_{и}$ коэффициент передачи интегральной составляющей, $k_{п}$ коэффициент передачи пропорциональной составляющей.

Для данной системы типовым возмущающим воздействием является гармоническое воздействие с максимальным значением амплитуды $f_0^* = 0{,}2v^*$ и круговой частотой ω_0 ($f(t) = f_0^* \cdot \sin\omega_0 t$). Моделью, которая генерирует подобное воздействие, является консервативное звено, описание которого задается передаточной функцией внешнего воздействия

$$W_{\text{вв}}(p) = \frac{1}{p^2+\omega_0^2}, \quad (2)$$

а амплитуда сгенерированного сигнала определяется заданием начальных условий.

Передаточная функция составляющей регулятора с встроенной моделью

$$W_{\text{вм}}(p) = \frac{k_{\text{В}}\left(\frac{k_{\text{М}}}{k_{\text{В}}}p+1\right)}{p^2+\omega_0^2}, \quad (3)$$

где $k_{в}$ и $k_{м}$ – настроечные параметры регулятора со встроенной моделью, $k_{в}$ –коэффициент передачи по выходной переменной встроенной модели, $k_{м}$ – коэффициент передачи по скорости изменения выходной переменной. Передаточная функция $W_{вм}(p)$ содержит описание консервативного звена и описание дифференцирующего звена с постоянной времени $T_{\text{В}} = \frac{k_{\text{М}}}{k_{\text{В}}}$. Модель, генерирующая гармоническое воздействие частоты ω_0 описывается также консервативным звеном, поэтому составляющая с передаточной функцией $W_{вм}(p)$ консервативного звена, и называют составляющей регулятора со встроенной моделью.

Обобщенный регулятор (рис. 3) формируется как параллельное соединение двух составляющих регулятора и его передаточная функция равна

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = W_{\text{пи}}(p) + W_{\text{вм}}(p) = \frac{k_{\text{и}}\left(\frac{k_{\text{п}}}{k_{\text{и}}}p+1\right)\left(p^2+\omega_0^2\right)+k_{\text{м}}p^2+k_{\text{в}}p}{p\left(p^2+\omega_0^2\right)} \quad (4)$$

где U(p) изображение Лапласа управляющего воздействия, а E(p) изображение Лапласа ошибки – входного воздействия регулятора. Структурная схема обобщенного регулятора представлена на рис. 3.

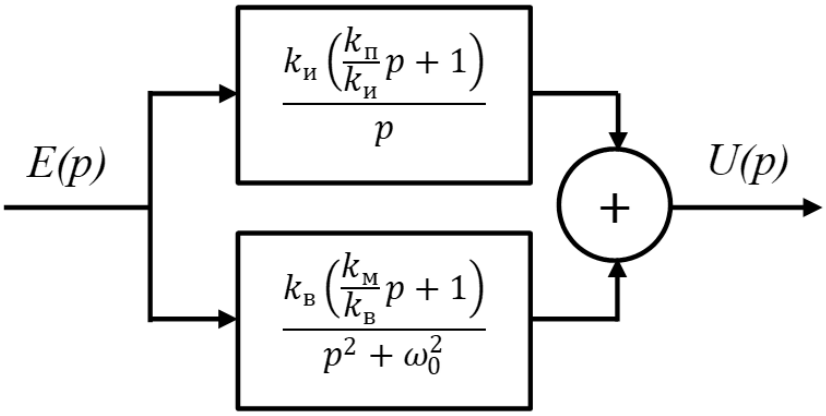

Рисунок 3 - Структура обобщенного регулятора

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.3

Настроечными параметрами регулятора являются коэффициенты $k_{и}$, $k_{п}$, $k_{в}$ и $k_{м}$. Введение в регулятор составляющей со встроенный моделью возмущающего воздействия позволяет получить в установившемся режиме

нулевое значение ошибки отработки возмущающего воздействия, модель которого включена в регулятор. В данном случае, с нулевой ошибкой отрабатывается гармоническое воздействие $f(t) = f_0^* \sin \omega_0 t$.

Результаты моделирования

Проиллюстрируем приведенные результаты на примере настройки параметров регулятора ленточного конвейера КЛС-800. Передаточная функция $W_0(p)$ имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{0{,}96}{(0{,}012p+1)(0{,}9p+1)} \quad (5)$$

Требуемые показатели качества для системы стабилизации скорости ленты конвейера:

- максимальное значение скорости движения ленты v* = 3м/с
- значение добротности по скорости K*≥10 с-1
- максимально допустимая ошибка отработки заданной скорости конвейера и возмущающих воздействий $e_{мах}$= 0,05 м/с.
- желаемое время переходного процесса $t_п^*$ = 0,6 с,
- допустимое значение перерегулирования σ^*=30%,
- возмущающее воздействие гармоническое с максимальными значениями амплитуды f_0^* = 0,2v* и осредненным значением круговой частоты ω_0= 0,314 с-1,

Перепишем передаточную функцию регулятора (4) в виде

$$W_{рег}(p) = \frac{k_и\left(\frac{k_п}{k_и}p+1\right)\left(p^2+\omega_0^2\right)+k_в\left(\frac{k_м}{k_в}p^2+p\right)}{p\left(p^2+\omega_0^2\right)}$$

и выберем согласно методу настройки на модульный оптимум значения $\frac{k_п}{k_и} = \frac{k_м}{k_в} = \tau = T_{0max} = 0,9$ с , где T_{0max} - максимальное значение постоянной времени исходного объекта. Тогда передаточная функция регулятора примет вид

$$W_{рег}(p) = \frac{k_и\left(\frac{k_п}{k_и}p+1\right)\left(p^2+\omega_0^2\right)+k_в\left(\frac{k_м}{k}p^2+p\right)}{p\left(p^2+\omega_0^2\right)} = \frac{(\tau p+1)\left(k_и\,p^2+k_в\,p+k_и\,\omega_0^2\right)}{p\left(p^2+\omega_0^2\right)} =$$
$$= \frac{k_и\,\omega_0^2(\tau p+1)\left(\frac{1}{\omega_0^2}p^2+\frac{k}{k_и\,\omega_0^2}p+1\right)}{p\left(p^2+\omega_0^2\right)} \quad (6)$$

При этом, постоянная времени дифференцирующего звена регулятора равнаz $\tau = \frac{k_п}{k_и} = \frac{k_м}{k_в} = \tau = T_{0max}$ компенсирует наибольшую постоянную времени постоянной апериодических звеньев объекта.

Отметим, что добротность по скорости рассматриваемой системы, как это следует из вида передаточных функций (5) и(6), равна $K^* = k_и * 0,96$, поэтому коэффициент $k_и$ выбирается из требуемого значения добротности по скорости $k_и = \frac{K^*}{0,96} == \frac{10}{0,96} \approx 11 с^{-1}$, а коэффициент $k_п = \tau k_и = 0,9 k_и \approx 10$.

Соотношение коэффициентов $k_м$ и $k_в$ равно $\frac{k_м}{k_в} = \tau = T_{0max} = 0,9$ с , откуда следует $k_м = \tau k_в$.Значение коэффициента $k_в$ влияет на второй сомножитель числителя передаточной функции регулятора (6), а именно, будет ли этот сомножитель определять передаточную функцию дифференцирующего звена второго порядка, или передаточную функцию двух дифференцирующих звеньев первого порядка. Для того, чтобы данный сомножитель задавал описание двух дифференцирующих звеньев первого порядка значение $\frac{k_в}{k_и \omega_0} \geq 2$ или $k_в \geq 2 k_и \omega_0 = 6,9$. При выборе значения $k_в$ = 80 значение $k_м$= 72. Таким образом, настроечные параметры регулятора коэффициенты равны $k_и$ = 11 , $k_п$ = 10,$k_в$ = 80 , и $k_м$ = 72.

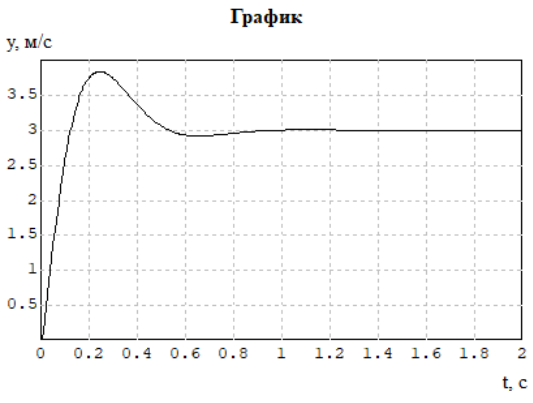

Рисунок 4 - Реакция системы на отработку заданной скорости транспортировки

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.4

Из графика переходной функции (рис. 4) следует, что заданная скорость движения ленты конвейера 3 м/с при использовании обобщенного регулятора с выбранными параметрами отрабатывает задающее воздействие с временем переходного процесса $t_п$ = 0,5 с и перерегулированием σ = 27%, без статической ошибки. Увеличение выбранного значения параметра $k_в$ при сохранении соотношения с параметром $k_м$ приводит к увеличению значения перерегулирования и времени переходного процесса, а следовательно к не выполнению требуемых показателей качество. Уменьшение значения параметра $k_в$ хотя и уменьшает значение перерегулирования, но ухудшает время переходного процесса.

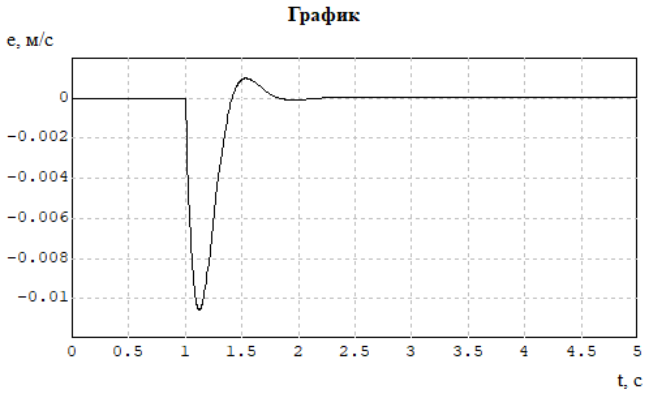

Рисунок 5 - График изменения ошибки e(t) системы с обобщенным регулятором при гармоническом возмущающем воздействии f(t) = 0,6 sin 0,314t

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.5

Использование встроенной модели гармонического воздействия с частотой $ω_0$ = 0,314 $с^{-1}$ в обобщенном регуляторе позволяет получить в установившемся режиме в замкнутой системе нулевую ошибку при отработке гармонического воздействия той же самой частоты. (рис. 5)

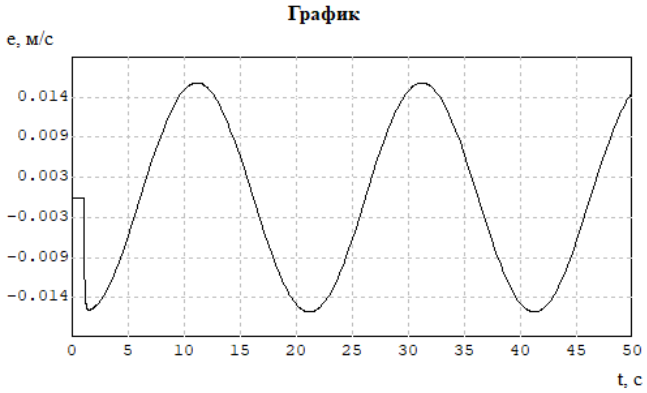

Рисунок 6 - График изменения ошибки e(t) системы ПИ регулятором при гармоническом входном воздействии f(t) = 0,6 sin 0,314t

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.6

При использовании только ПИ регулятора, как следует из рис. 6, амплитуда максимальной ошибки в установившемся режиме при отработке гармонического воздействия с амплитудой равной 0,6 имеет значение 0,016, то есть подавление возмущающего воздействия происходит в 37 раз.

Рассмотрим, как изменяется ошибка в установившемся режиме при отработке гармонических возмущающих воздействий с частотами, отличающимися от номинальной частоты настройки встроенной модели $ω_0$ = 0,314 $с^{-1}$. Увеличение значения частоты гармонического возмущения в три раза f(t) = 0,6 sin 0,942t приводит к значению амплитуды установившейся ошибки e_y = 0,0019 (рис. 7), то есть подавление возмущающего воздействия происходит в 0,6/0,0019 =315 раз.

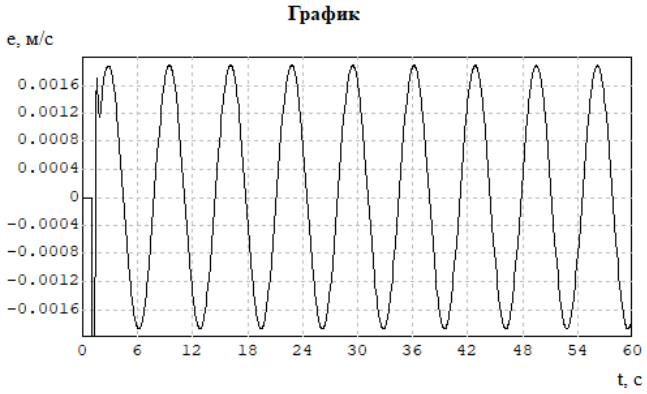

Рисунок 7 - График изменения ошибки e(t) системы с обобщенным регулятором при гармоническом возмущающем воздействии f(t) = 0,6 sin 0,942t

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.143.7

При использовании только ПИ регулятора значению амплитуды установившейся ошибки e_y = 0,035 м/с, то есть подавление возмущающего воздействия происходит в 17 раз.

Уменьшение значения частоты гармонического возмущения в три раза f(t) = 0,6sin0,105t приводит к значению амплитуды установившейся ошибки e_y = 0,0008c^{-1} и подавление в 750 раз. С ПИ регулятором значение амплитуды установившейся ошибки e_y = 0,0055 м/с, подавление возмущающего воздействия происходит в 109 раз. Таким образом можно сделать вывод, что в диапазоне частот ω [0,105, 0,942] амплитуда установившего значения ошибки при отработке возмущающих воздействий f(t) = f_0*sinωt не превосходит значения e_y^* = 0,002 м/с, а подавление возмущения происходит не хуже, чем в 500 раз.

Заключение

Введение в систему управления конвейером алгоритма достижения требуемых показателей по качеству и точности процесса стабилизации скорости конвейера обеспечивает поддержание скорости на необходимом уровне при наличии возмущающих воздействий, таких как перегрузка, недогрузка, растяжение ленты, неоднородность размеров и массы. Полученный алгоритм управления решает задачу стабилизации скорости ленточного конвейера, компенсации возмущающих воздействий и обеспечивает постоянную производительность.

Поддержание постоянства скорости ленты положительно сказывается на работе конвейера и позволяет обеспечивать необходимую производительность при наличии возмущающих воздействий скорости конвейера. Результаты моделирования системы стабилизации скорости ленты конвейера подтверждают сделанные выводы. Результаты статьи могут найти применение для настройки параметров автоматических регуляторов систем управления транспортировкой руды дробильного агрегата, шаровой мельницы с целью повышения производительности на горно-обогатительных комбинатах.

В работе предлагается для подавления возмущающих воздействий гармонического вида, приложенных к выходу системы стабилизации скорости ленточного конвейера, использовать регулятор с встроенной моделью, представляющий объединение ПИ регулятора и дополнительной составляющей с встроенной моделью возмущающего воздействия. Подобный обобщенный регулятор позволяет обеспечить в системе нулевую ошибку в установившемся режиме при отработке гармонического возмущающего воздействия усредненной частоты, модель которой встраивается в регулятор. Показано, что для гармоник с частотами, отличающимися от осредненной частоты, имеет место достаточно хорошее подавление возмущающих воздействий. Для трехкратного изменения значения усредненной частоты подавление возмущения в примере происходит не хуже, чем в 300 раз. Так же с помощью моделирования можно устанавливать диапазон частот, где выполняется заданное ограничение на амплитуду установившегося значения ошибки. На основе типовых методов синтеза регуляторов предложена процедура определения значений настроечных параметров обобщенного регулятора.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Татаренко А.М. Рудный транспорт / А.М. Татаренко, И.П. Максецкий. — М: Недра, 1990
2. Батицкий В.А. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков. — М. Недра, 1991. — 302 с.

3. Ляхомский А.В. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Часть 1. Автоматизированный электропривод механизмов циклического действия / А.В. Ляхомский, В.Н. Фащиленко. — Москва: Горная книга, 2014. — 477 с.

4. Справочное пособие SimInTech. — 2017. — URL: http://simintech.ru/help/rus/ (дата обращения: 21.08.2023)

5. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем: Методические указания к лабораторным работам / Сост. О.К. Мансурова, А.А. Кульчицкий. — СПб, 2019. — 32 с.

6. Мансурова О.К. Анализ свойств динамических систем / О.К. Мансурова, С.В. Быстров, В.В.Григорьев [и др.] // Приборостроение. — 2019. — Т. 62. — №10. — С. 886-892.

7. Мансурова О.К. Оценка областей экспоненциальной устойчивости нелинейных динамических систем / О.К. Мансурова, В.В. Григорьев, С.В. Быстров [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2020. — Т. 21. — № 3. — С. 131-135.

8. Мансурова О.К. Адаптивная настройка распределенных регуляторов / О.К. Мансурова, В.В. Григорьев, С.В. Быстров [и др.] // Приборостроение. — 2019. — Т. 62. — № 9. — С. 814-824.

9. Бойков В.И. Исследование динамических характеристик электромеханических систем / В.И. Бойков, А.Б. Бушуев, С.В. Быстров [и др.] // Методические указания. — СПб.: ИТМО, 2022 с.

10. Уонэм У.М. Линейные многомерные системы управления: Геометр. подход / У.М. Уонэм; пер. с англ. Э.Л. Наппельбаума. — Москва: Наука, 1980. — 375 с.

11. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. — Наука, 1975. — 768 с.

12. Герехов В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Герехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Герехова. — М.: Академия, 2005. — 304 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tatarenko A.M. Rudnyj transport [Ore Transport] / A.M. Tatarenko, I.P. Makseckij. — M: Nedra, 1990 [in Russian]

2. Batickij V.A. Avtomatizacija proizvodstvennyh processov i ASU TP v gornoj promyshlennosti [Automation of Production Processes and Process Control Systems in the Mining Industry] / V.A. Batickij, V.I. Kuroedov, A.A. Ryzhkov. — M. Nedra, 1991. — 302 p. [in Russian]

3. Ljahomskij A.V. Avtomatizirovannyj jelektroprivod mashin i ustanovok gornogo proizvodstva. Chast' 1. Avtomatizirovannyj jelektroprivod mehanizmov ciklicheskogo dejstvija [Automated Electric Drive of Machines and Installations of Mining Production. Part 1. Automated Electric Drive of Cyclic Action Mechanisms] / A.V. Ljahomskij, V.N. Fashhilenko. — Moscow: Mining Book, 2014. — 477 p. [in Russian]

4. Spravochnoe posobie SimInTech [SimInTech Reference Manual]. — 2017. — URL: http://simintech.ru/help/rus/ (accessed: 21.08.2023) [in Russian]

5. Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Analiz linejnyh sistem: Metodicheskie ukazanija k laboratornym rabotam [Theory of Automatic Control. Analysis of Linear Systems: Guidelines for Laboratory Work] / Comp. by O.K. Mansurova, A.A. Kul'chickij. — SPb, 2019. — 32 p. [in Russian]

6. Mansurova O.K. Analiz svojstv dinamicheskih sistem [An Analysis of Dynamic Systems Properties] / O.K. Mansurova, S.V. Bystrov, V.V.Grigor'ev [et al.] // Priborostroenie [Instrument Engineering]. — 2019. — Vol. 62. — №10. — P. 886-892. [on Russian]

7. Mansurova O.K. Ocenka oblastej jeksponencial'noj ustojchivosti nelinejnyh dinamicheskih sistem [An Estimation of Exponential Stability Regions of Nonlinear Dynamic Systems] / O.K. Mansurova, V.V. Grigor'ev, S.V. Bystrov [et al.] // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie [Mechatronics, Automation, Control]. — 2020. — Vol. 21. — № 3. — P. 131-135. [in Russian]

8. Mansurova O.K. Adaptivnaja nastrojka raspredelennyh reguljatorov [Adaptive Tuning of Distributed Regulators] / O.K. Mansurova, V.V. Grigor'ev, S.V. Bystrov [et al.] // Priborostroenie [Instrument Engineering]. — 2019. — Vol. 62. — № 9. — P. 814-824. [in Russian]

9. Bojkov V.I. Issledovanie dinamicheskih harakteristik jelektromehanicheskih sistem [A Study of Dynamic Characteristics of Electromechanical Systems] / V.I. Bojkov, A.B. Bushuev, S.V. Bystrov [et al.] // Metodicheskie ukazanija [Methodical Notes]. — SPb.: ITMO, 2022 p. [in Russian]

10. Wanham W.M. Linejnye mnogomernye sistemy upravlenija: Geometr. podhod [Linear Multidimensional Control Systems: A Geometric Approach] / W.M. Wanham; transl. from Engl. by E.L. Nappelbaum. — Moscow: Nauka, 1980. — 375 p. [in Russian]

11. Besekerskij V.A. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija [Theory of Automatic Control Systems] / V.A. Besekerskij, E.P. Popov. — Nauka, 1975. — 768 p. [in Russian]

12. Gerehov V.M. Sistemy upravlenija jelektroprivodov [Control Systems of Electric Drives] / V.M. Gerekhov, O.I. Osipov; ed. by V.M. Gerekhov. — M.: Akademija, 2005. — 304 p. [in Russian]