

Повышение эффективности работы шаровой мельницы путем совместного использования наблюдателя состояний и экстремального регулятора

Д.А. Полеценко¹, М.Д. Боровинских²

¹Старооскольский технологический институт им. А.А.Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС». Россия, г. Старый Оскол

²JSA Group

Аннотация: В статье рассматривается один из подходов к управлению контуром измельчения руды, в частности процесс загрузки мельницы рудой. Для обеспечения максимальной производительности мельница должна загружаться до уровня 47–50%. Для измерения уровня загрузки мельницы существует несколько способов. В статье исследуется перспектива применения экстремального регулятора совместно с наблюдателем состояний в реализации контуров управления загрузкой мельницы. Полученная система управления производит управление загрузкой опираясь на текущую мощность привода мельницы. Особенность данной системы управления в том, что она способна не только управлять мельницей, но и распознавать перегрузку, а также принимать меры для ее дальнейшего предотвращения. При этом нет необходимости в дополнительных подсистемах и алгоритмах. Помимо этого, были разработаны две модели систем управления и проведено сравнение их эффективности. Обозначены преимущества разработанной системы управления с использованием наблюдателя состояний относительно классического экстремального регулятора.

Ключевые слова: шаровая мельница, автоматизация, математическая модель, контур управления, наблюдатель состояния, экстремальный регулятор.

Объектом автоматизации в данной работе является, шаровая мельница с центральной разгрузкой (МШЦУ). Предназначена для измельчения руды размером 0–15 мм до более мелкой фракции.

На рис.1 изображена конструкция шаровой мельницы [1].

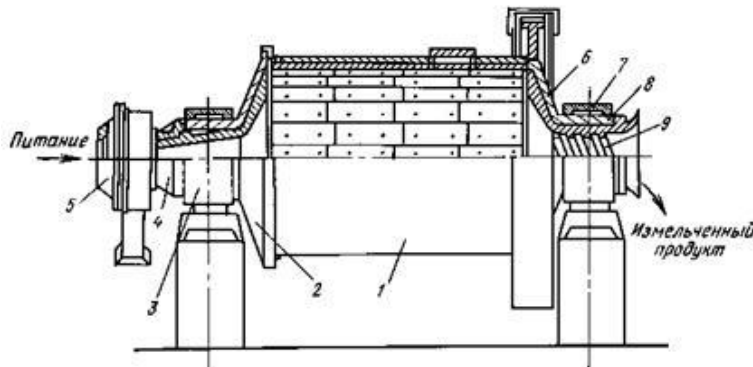


Рис. 1. – Конструкция МШЦУ

Мельница состоит из барабана 1, который внутри выложен футеровкой для защиты от износа измельчаемым материалом и мелющими телами. По бокам к барабану крепятся торцевые крышки 2 и 6, которые так же изнутри защищены футеровкой от износа. К крышкам крепятся загрузочная и разгрузочная цапфы 4 и 8 соответственно. Цапфы полые внутри, поверхность представляет собой спирали 9 которые необходимы для возврата в мельницу мелющих тел и недоизмельченного сырья. Направление витков спирали противоположено направлению вращения барабана. Цапфы опираются на коренные подшипники 3 и 7. Через 5 в мельницу подается питание, измельчаемый продукт и вода. Вода играет роль транспортирующей среды, обеспечивает прохождение измельчаемого сырья через тело мельницы и удаляет измельченный продукт. К разгрузочной цапфе крепится бутара, которая представляет собой конусообразную конструкцию с отверстиями 40 мм. В бутару подается дополнительная вода для управления плотностью слива классификатора. Измельченный продукт попадет в классификатор, где разделяется на слив классификатора и пески. Пески возвращаются обратно в мельницу на домол. В качестве мелющих тел используются стальные шары диаметром 100 мм. В процессе вращения руда разрушается и истирается шарами и друг о друга. Со временем шары истираются и необходимо добавлять новые. Шары попадают в мельницу вместе с рудой чтобы избежать остановок мельницы.

В нормальном режиме эксплуатации уровень загрузки барабана не должен превышать 47 %, по факту мельница заполняется на 5–10% ниже для предотвращения такого негативного явления как перегруз. Степень заполнения измеряется по мощности электропривода. Управление уровнем загрузки производится путем изменения расхода руды в барабан мельницы. Количество загружаемой руды, определяется по весу руды на ленте питателя и скорости движения ленты.

Помимо руды в мельницу поступают пески, которые являются возмущающим воздействием на систему управления. Их расход не измеряется. Пески поступают в мельницу по желобу, установить какие-либо весы в данном случае невозможно, а конструкция классификатора не предусматривает установку конвейера.

В данной работе исследуется процесс управления мельницей. Если анализировать мировой опыт, то можно отметить ряд работ, в которых решается подобная задача.

В работе [2] предлагается управлять мельницей с помощью нейро-нечеткой системы управления, и учитывать при расчете управления минеральный состав измельчаемой руды. Технологический процесс измельчения представляется в виде ячеечной модели, полученной в результате определения роли воды в процессе измельчения и классификации, а также количества шаров. В результате извлекаются данные о массе определенной фракции в ячейках модели, массе определенной фракции на входе в ячейки, времени пребывания фракции в конкретной ячейке, функции разрешения фракции и переходе в другую фракцию, скорость разрушения фракции. Далее для прогнозирования и поиска зависимостей в вышеперечисленных данных применяются адаптивные нейро-нечеткие системы. Одна нейро-нечеткая система используется для прогнозирования параметра разрушения, и вторая для прогнозирования параметра отбора. Для обучения применены данные полученные путем идентификации модели процесса измельчения. По результатам работы, на основе прогнозируемых параметров, определяется возможное качество сырья и определяется количество руды и воды на измельчение и классификацию. Данный метод достаточно сложен т. к. требуется разрабатывать ячеечную модель для конкретного процесса измельчения, далее из модели извлечь данные для обучения нейро-нечетких систем и обеспечивать оптимизацию и адаптацию

всей системы управления. Как правило модели без встроенного механизма адаптации параметров под изменения технологического процесса, довольно быстро теряют в точности. Это обстоятельство незамедлительно негативно скажется на качестве управления мельницей.

В работе [3] предлагается управлять загрузкой мельницы с целью оптимизации затрат на электроэнергию, шары и футеровку. Предлагается загружать мельницу так чтобы футеровка и шары изнашивались медленнее. Так же предлагается модернизировать сам процесс помола, путем ускорения перемешивание воды руды и песков в барабане мельницы. Авторы считают, что вода, руда и пульпа остаются сами по себе какое-то время после загрузки в барабан, если смешивание ускорится, то производительность мельницы возрастет. Предлагается смачивать руду водой до поступления в барабан, для лучшего сцепления с песком, за счет объема воды, подаваемого в барабан мельницы. Кроме того, пески также предлагается дополнительно смачивать для ускорения процесса перемешивания. Реализовано управление с помощью комплекса программ, которые анализируют параметры: крупности руды, ее состава и параметры песков. После обработки данных, программами производится расчет оптимальных заданий на количество добавочной воды, количество руды и соотношение жидкое/твердое. Такая система управления достаточно сложна, и имеет достаточно большое количество переменных. В работе не используются регуляторы в привычном виде. Системы с четкой логикой по своей природе ограничены в плане адаптации.

В работе [1] предлагается также опираться на физико-механические характеристики измельчаемого сырья. В качестве управляющей модели принято использовать систему нечеткой логики. Данные для построения модели были получены путем работы с экспертом. В данной работе было уделено особое внимание методу работы с экспертом, была применена «теория спланированного эксперимента». В качестве входных параметров

рассматриваются: расход руды в мельницу, плотность слива гидроциклона, выход готового класса, загрузка внутреннего объема мельницы, индекс перегрузки. В качестве выходных параметров: количество руды, загружаемой в мельницу, количество воды в мельницу, количество воды в гидроциклон, число оборотов насоса гидроциклона. Так же разработана подсистема анализа перегрузки мельницы. Был произведен эксперимент с перегрузкой мельницы, на основе которого был выявлен критерий качества процесса измельчения. На основе критерия качества разработан метод оптимизации потребления электроэнергии. Разработана подсистема поддержания заданных технологических параметров помола. Разработана подсистема выбора эффективных режимов управления комплексом мельница гидроциклон. Полученная система управления достаточно сложна, требуется как эксперт, так и множественные эксперименты для ее корректной настройки. Система управления не является автономной и состоит из нескольких подсистем, что негативно сказывается на ее надежности.

В работе [4] предлагается использовать интеллектуальную систему управления оптимальными настройками заданий в процессе измельчения. Управление планируется производить с помощью нейронной сети и нечеткого регулятора. Данная система управления совмещает в себе два интеллектуальных подхода к управлению, нейронную сеть, работающую совместно с нечеткой логикой. В работе используется конкурентная нейронная сеть, ее задача классифицировать параметры помола и производить настройку нечеткого регулятора. Борьба с помехами измерения ведется с помощью метода скользящего-среднего. Наличие сразу двух интеллектуальных подходов делают практическое применение данного подхода труднореализуемым в реальных условиях производства. Требуются как эксперт для настройки нечеткой логики, так и эксперименты для получения обучающей выборки.

В работе [5] предлагается использовать нелинейные модели для прогнозирования поведения процесса измельчения руды, и расчета оптимального управляющего воздействия. Полученная система управления подбирает управляющее воздействие основываясь на составе подаваемой руды. Таким образом повышается энергоэффективность и снижается скорость износа футеровки и шаров. Для реализации данного метода требуется очень много статистики, а также экспериментов.

В работе [6] предлагается использовать регулятор, работающий по принципу черного ящика, с возможностью прогнозирования. Данные для создания системы управления были получены экспериментальным путем. Система управления анализирует такие параметры как: плотность слива, расход руды, расход воды на питание, расход воды в классификатор, после чего подбирает оптимальные параметры управления. Система управления имеет алгоритм анализа аварийных состояний.

В работе [7] предлагается использовать для управления процессом измельчения руды экспертную систему. В качестве входных переменных берутся: крупность помола, уровень загрузки мельницы, и количество песков. В качестве выходных параметров: задание на количество загружаемой руды, количество подаваемой воды на питание, количество воды для разбавления пульпы. Данные для создания базы данных экспертной системы были получены экспериментальным путем, и путем общения с экспертами. Создание любой экспертной системы это, сложная и дорогая задача, требующая помимо исполнителя наличия эксперта и инженера по знаниям.

В работе [8] предлагается продолжить развивать идеи работ [6] и [7], с разницей в том, что добавляется подсистема наблюдения помех. Система управления должна учитывать множественные внешние возмущения и справляться с ними.

В работе [9] предлагается использовать два вибрационных датчика расположенных напротив друг друга на теле мельницы. Два датчика необходимы для того, чтобы шары, ударяющие область корпуса, где закреплен датчик не вносили возмущения в измерения. При использовании двух датчиков одновременно, ударам шаров подвержен только один, это позволяет исключить влияние положения датчика на получаемый сигнал. В последствии данный сигнал обрабатывается нейронной сетью, которая определяет уровень заполнения мельницы. В дальнейшем данная информация используется для поддержания заданного уровня загрузки мельницы. Для обучения нейронной сети требуется значительное количество экспериментальных данных.

В работе [10] предлагается управлять мельницей с помощью нечеткого регулятора. Архитектура системы управления состоит из: нечеткого контроллера, программируемых логических контроллеров и сервера OPC. В работе представлено проектирование нечеткого регулятора для цементного завода путем определения его структуры с помощью редактора системы нечеткого вывода. Также в работе проиллюстрирована структура реализованной системы управления совместно с разработанной программой ПЛК и ее имитационное моделирование. Создание нечеткого регулятора это, сложная и дорогая задача, требующая помимо исполнителя наличия эксперта и инженера по знаниям.

В данной работе предложено совместное использование экстремального шагового регулятора для оптимизации загрузки мельницы и наблюдателя координат состояния для оценки возврата классификатора.

Для этого мельница была идентифицирована как динамический объект, используя данные реального процесса. Параметры модели искались для структуры апериодического звена второго порядка. Входом модели является количество загружаемой руды, а выходом, мощность привода мельницы.

Прежде всего был найден участок данных отражающий переходный процесс (реакция мощности привода на количество загружаемой руды). Измеренные значения мощности имеют серьезное зашумление, для работы с такими данными их необходимо отфильтровать от высокочастотных колебаний. В качестве фильтра использовалось апериодическое звено первого порядка с постоянной времени 10. Такой фильтр обеспечит достаточную фильтрацию данных. Использование фильтра приводит к запаздыванию сигнала. Для того что бы уменьшить влияние динамики фильтра на точность модели, на выход модели было добавлено звено чистого запаздывания. Схема с моделью представлена на рис.1.

На схеме модели R-количество загружаемой руды, D-чистое запаздывание, P-данные мощности привода, F-фильтр, Model-модель мельницы, S-добавочный сигнал, эмитирующий поступление песков.

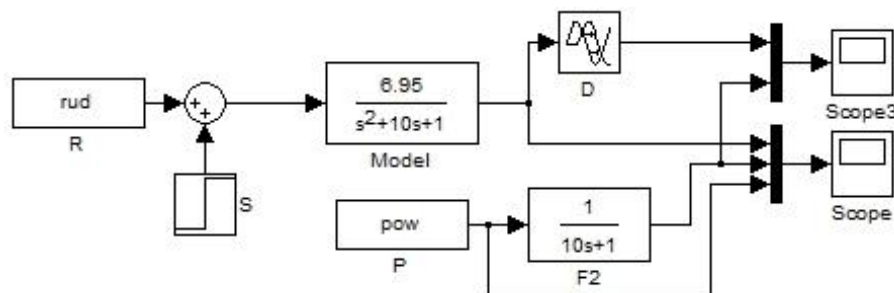


Рис. 2. – Идентификация

В результате идентификации мельницы были найдены следующие параметры модели: коэффициент усиления 6.95, постоянные времени $T1=1$ мин., $T2=10$ мин. Графики соответствия выбранной модели и отфильтрованных данных представлены на рис.3.

Графики сравнения нефильТРованной мощности, отфильтрованной мощности, выхода модели без задержки, представлены на рис.4.

После удаления задержки было устранено влияние фильтра на динамику модели. Как можно увидеть на рис.4 выход модели повторяет поведение неотфильтрованной мощности. По графикам можно сделать вывод

что в целом модель описывает данный переходный процесс, в нормальном режиме работы.

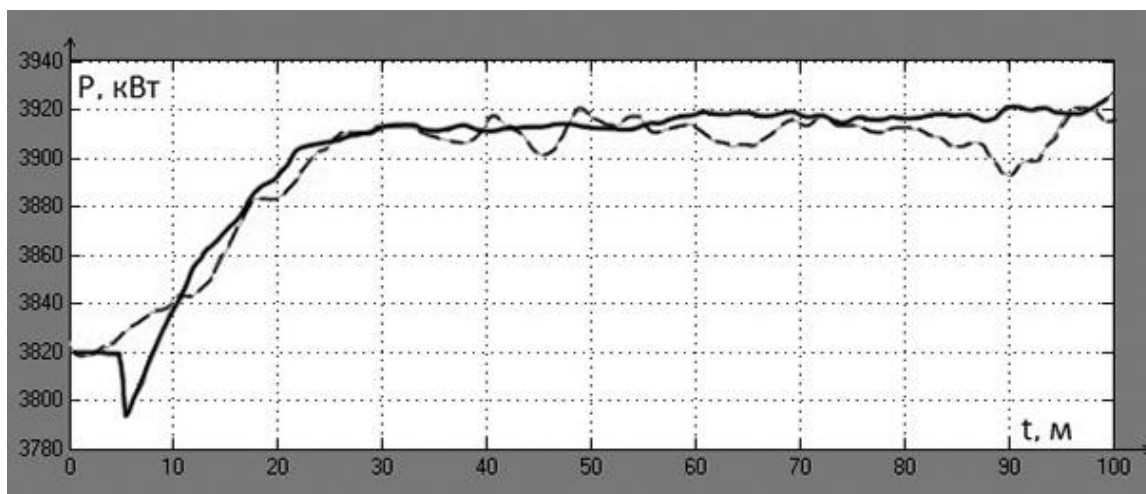


Рис. 3. – Результат идентификации

По мере загрузки руды в мельницу мощность нарастает до предельной. Если продолжить загружать мельницу дальше, то мощность начинает падать, вплоть до возникновения завала. Проблема в том, что, если мельница была загружена до максимально допустимого уровня, падение мощности привода может означать как перегруз, так и недогруз мельницы. Если мощность упала, а в мельницу будут загружать руду, то возможно заполнение мельницы приблизится к оптимальному, но также и возможна ситуация перегруза. Неоднозначность изменения мощности главная проблема данного метода.

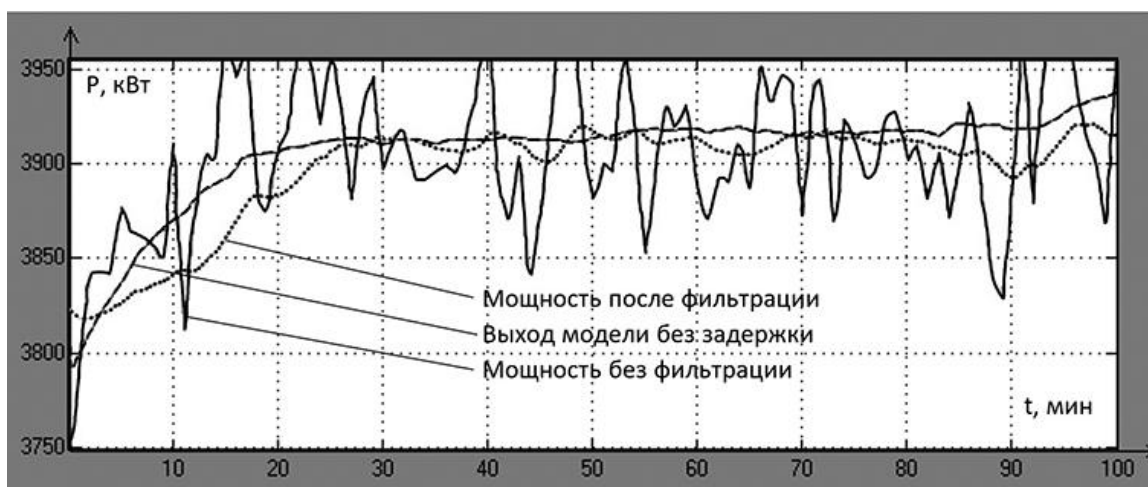


Рис. 4. – Сравнение выходов

Исходя из сказанного выше нам необходимо что бы модель имела экстремальную функцию. Для этого последовательно с полученной выше моделью добавлено звено с функцией (1).

$$P(x) = 3950 - |3950 - y| \quad (1)$$

где y – выход инерционного звена модели; 3950 – максимальная мощность привода мельницы.

Общий вид полученной модели:

$$\begin{cases} \frac{d^2y}{dt^2} + 10 \frac{dy}{dt} + 1 = 6,95 * x(t) \\ P(y) = 3950 - |3950 - y(t)| \end{cases}$$

Данная функция линейна, в то время как реальная кривая мощности привода не линейна. Функция (1) не повторяет реальное поведение мощности привода мельницы при перегрузке. Она лишь моделирует падение мощности привода при перегрузке, этого достаточно чтобы оценить, как разработанная система управления будет реагировать на перегрузку.

Системы экстремального регулирования предназначены для поиска оптимальных значений управляющих воздействий, т. е. таких значений, которые обеспечивают экстремум некоторого критерия Q оптимальности процесса. Системы экстремального регулирования, которые предназначены для оптимизации объекта по одному входному каналу, называются одноканальными. Такие СЭР получили наибольшее распространение.

При оптимизации объектов, обладающих значительной инерционностью и чистым запаздыванием, целесообразно применение шаговых экстремальных систем, которые воздействуют на управляемый вход объекта через дискретные промежутки времени [11-12].

В нашем случае применена шаговая экстремальная система. Шаговая ЭС ведет поиск экстремума шагами, наращивая или уменьшая управляющее воздействие. Рассмотрим характер поиска экстремума в шаговой ЭС. Допустим, что начальное состояние объекта характеризуется точкой M_1 на статической зависимости $y=f(x)$ (рис.5). Предположим, что экстремальный

регулятор включается в работу в момент времени t_1 и исполнительный механизм делает шаг Δx на увеличение сигнала входа объекта.

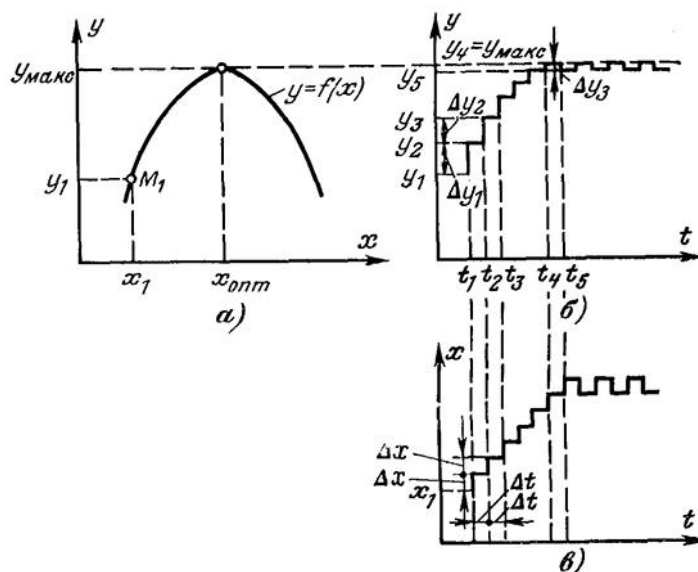


Рис. 5. – Поиск в дискретной САО: а) — характеристика объекта; б) — изменение выхода; в) — изменение входа

Сигнал на выходе объекта y при этом также увеличивается. Через время Δt (в момент времени t_2) исполнительный механизм производит шаг в ту же сторону, так как $\Delta y_1 = y_2 - y_1 > 0$. В момент t_3 исполнительный механизм производит еще один шаг на Δx в ту же сторону, так как $\Delta y_2 = y_3 - y_2$ больше нуля, и т. д. В момент времени t_5 приращение выходного сигнала объекта $\Delta y_3 = y_5 - y_4$, станет меньше нуля, тогда следующий шаг Δx исполнительный механизм сделает в сторону уменьшения сигнала входа объекта x и т. д. Ширина шага выбирается так что бы перед тем, как подать новый шаг система отреагировала на предыдущий. Высота выбирается исходя из требований к переходному процессу.

Для разработки наблюдателя состояний модель объекта была описана в пространстве состояний. Наблюдатель состояния это, система способная по движению модели в пространстве состояний, восстановить значения векторов, отражающих состояния объекта. Наблюдатель состояния оценивает движения объекта по его входным и выходным данным. Для разработки

наблюдателя состояния необходимо представить полученную модель в пространстве состояний. Для этого запишем её дифференциальное уравнение.

$$1 + 10z' + z = 6,95v \quad (2)$$

Далее были выбраны координаты состояния: положение модели (текущая мощность), скорость изменения мощности, возмущение (количество загружаемых песков).

$$\begin{cases} x_1' = x_2 \\ x_2' = -x_1 - 10x_2 + 6,95x_3 + 6,95u \\ x_3' = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где x_1 – координата положения модели; x_2 – координата скорости модели; x_3 – координата возмущения, действующего на модель.

Модель объекта в матричной форме.

$$\begin{cases} x' = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}, \quad (4)$$

где $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$; $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & -10 & 6,95 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 6,95 \\ 0 \end{bmatrix}$; $C = [1 \ 0 \ 0]$

Для того что бы ускорить процесс оценки координат состояния наблюдателем, необходимо рассчитать матрицу коррекции движения наблюдателя. Рассмотрим матрицу (5):

$$A - KC - \lambda I, \quad (5)$$

где $K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}$ – коэффициенты коррекции движения наблюдателя; λ –

переменная; $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – единичная диагональная матрица.

Переменная λ подбирается таким образом, чтобы изменять диапазон возможных значений k . Чем выше величина k , тем быстрее наблюдатель оценивает координаты состояния, и тем выше влияние высокочастотных помех на работу системы. Мощность привода, как правило, имеет высокочастотный шум с большой амплитудой поэтому большие значения k для нашей системы не подойдут. Исходя из выше сказанного примем значение переменной $\lambda_i = -0,5$.

В результате получаем:

$$k_1 = 1; k_2 = 1; k_3 = 0,48$$

На основании полученных зависимостей была построена система управления, представленная на рис. 6

Здесь *extr* – экстремальный регулятор; *O2* – ограничение сигнала управления в диапазоне 0–100%; *IM2* – аperiodическое звено, описывающее питатель; *Model1* – динамическая часть модели объекта; *Fcn2* – экстремальная часть модели объекта; *p2* – шум, моделирующий колебания мощности привода мельницы; *NBL* – наблюдатель координат состояния в виде подсистемы. На схеме так же введены возмущающие воздействия, эмитирующие подачу песков и изменение свойств руды, выраженных в эквивалентном изменении расхода руды.

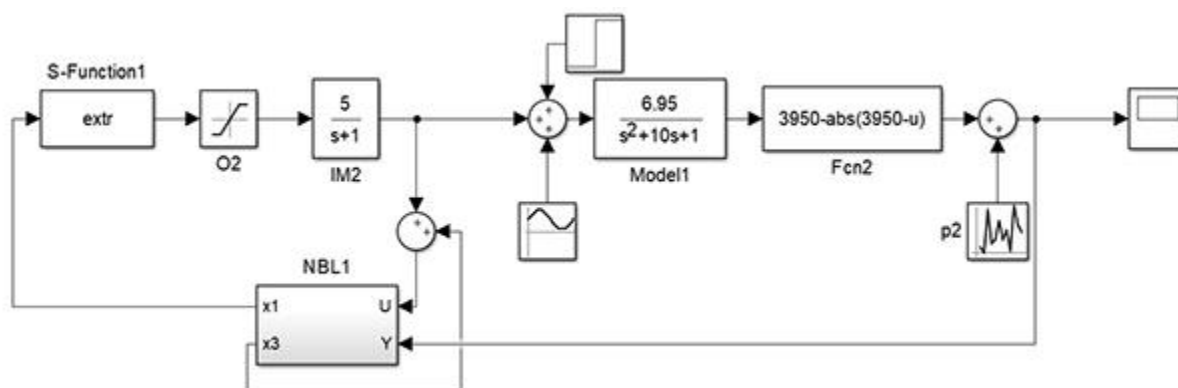


Рис.6. – Система управления с наблюдателем и состоянием и экстремальным регулятором

Наблюдатель координат состояния имеет два входа: Y – текущее значение мощности привода, U – количество подаваемого питания. Два выхода x_1 – оценка текущего значения мощности привода, x_3 – оценка возмущения действующего на контур управления. Так же наблюдатель состояния оценивает и скорость изменения мощности, но в данной работе эта переменная не используется. Переменная x_3 суммируется с количеством загружаемой руды, таким образом определяется общее количество питания в мельницу включая пески и руду.

В результате моделирования был получен следующий график переходного процесса (рис. 7)

Как видно из графика переходный процесс занял около 18 минут. Экстремальный регулятор не имеет задания и старается удерживать значение мощности привода максимальным. На графике присутствуют колебания, вызванные падением мощности в результате недогрузки и перегрузки. На 160 минуте на систему воздействует ступенчатое возмущение, мощность мельницы падает в результате перегрузки, но регулятор возвращает систему в нормальный режим работы. Данный регулятор способен распознавать перегрузку мельницы без использования дополнительных подсистем.

С целью сравнительного анализа эффективности системы управления с наблюдателем состояния совместно с экстремальным регулятором, используя полученную ранее модель объекта, построили контур управления загрузкой с экстремальным регулятором без наблюдателя.

В результате моделирования контура получен график переходного процесса (рис. 8)

Сплошной линией показан переходный процесс контура с наблюдателем состояния совместно с экстремальным регулятором. Пунктирной линией контур управления без наблюдателя состояния.

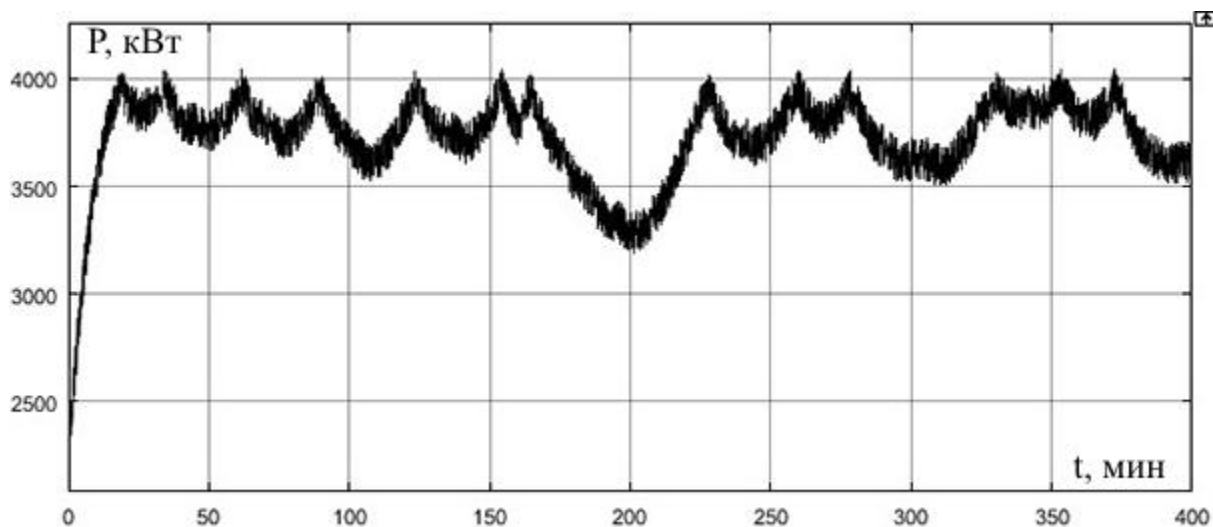


Рис.7. – Переходный процесс

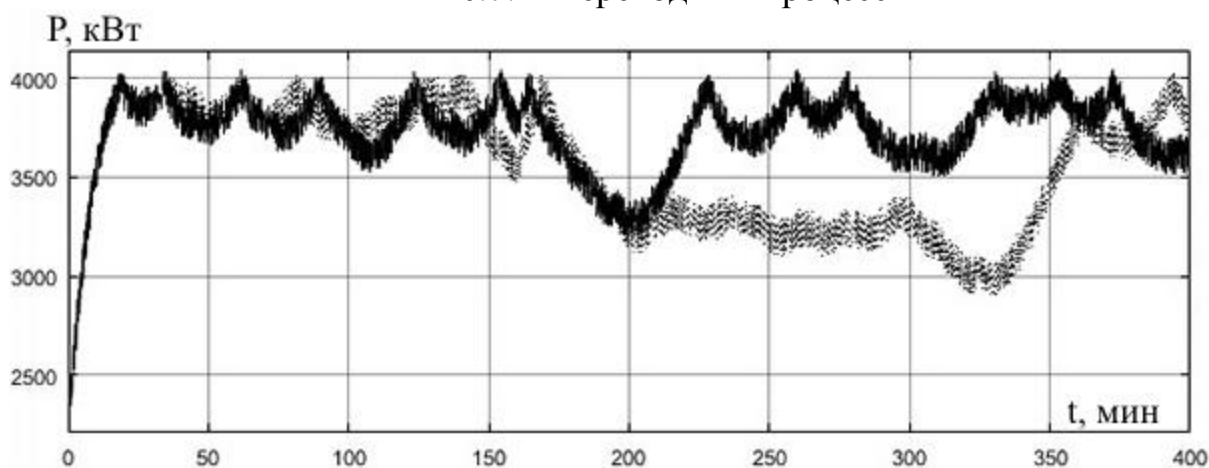


Рис. 8. – Переходный процесс

Как видно из графика переходный процесс занял около 18 минут, контур с наблюдателем состояния более стабилен, а также намного эффективней справляется с возмущением. Система управления с наблюдателем справилась с возмущением примерно за 70 минут, у системы без наблюдателя это заняло более 150 минут.

Вывод: экстремальный шаговый регулятор распознает перегрузку и обеспечивает максимальную производительность, но в плане компенсации возмущений уступает классическим подходам к управлению (ПИД регулирование). В дальнейшем планируется повысить качество управления за счет уменьшения амплитуды колебаний, как в установившемся режиме, так и при подавлении возмущений.

Литература

1. Дамба-Очир Дорждамба. Система управления технологическим процессом измельчения сырья в субкритических режимах с применением интеллектуальных алгоритмов на базе нечеткой логики // Московский государственный институт стали и сплавов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2004. – С. 143
2. Туз А.А. Управление технологическим процессом измельчения в шаровой мельнице в цикле подготовки питания флотации на основе нечетко-определенных импульсных моделей // Информационно-библиотечный центр РХТУ им. Менделеева и сайт. URL: diss.muctr.ru/author/202/.
3. Кондратец В. А., Мацуй А. Н. Підвищення продуктивності кульових млинів за рахунок адаптивного керування завантаженням рудою і розрідженням пульпи // Electrotechnic and Computer Systems. – 2017. – №. 24 (100). – С. 131-142.
4. Zhou P., Chai T., Wang H. Intelligent optimal-setting control for grinding circuits of mineral processing process // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2009. – Т. 6. – №. 4. – С. 730-743.
5. Coetzee L.C., Craig I.K., Kerrigan E.C. Robust nonlinear model predictive control of a run-of-mine ore milling circuit // IEEE Transactions on control systems technology. – 2009. – Т. 18. – №. 1. – С. 222-229.
6. Chen X.S., Zhai J.Y., Li S.H., & Li Q. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit // Minerals Engineering. – 2007. – Т. 20. – №. 11. – С. 1099-1108.
7. Chen X.S., Li S.H., Zhai J.Y., & Li Q. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit // Expert systems with Applications. – 2009. – Т. 36. – №. 1. – С. 716-723.

8. Yang J., Li S., Chen X., & Li Q. Disturbance rejection of ball mill grinding circuits using DOB and MPC // Powder Technology. – 2010. – Т. 198. – №. 2. – С. 219-228.

9. Gugel K., Palacios G., Ramirez J., & Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing (DSP) technology // Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. – IEEE, 2003. – С. 311-318.

10. Costea C.R., Silaghi H.M., Zmaranda D., & Silaghi M.A. Control system architecture for a cement mill based on fuzzy logic // International Journal of Computers Communications & Control. – 2015. – Т. 10. – №. 2. – С. 165-173.

11. Кривонос В. А., Тараненко М. Е. Управление процессом измельчения руды на основе регулятора состояния с наблюдателем Луенбергера // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т. 4. – №. 8. – С. 132-135.

12. Еременко И. Ф., Кривонос В. А. Система управления с наблюдателем координат состояния и неопределенного возмущения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №. 7. – С. 10-13.

References

1. Damba-Ochir Dorzhdamba. Sistema upravleniya tekhnologicheskim protsessom izmel'cheniya syr'ya v subkriticheskikh rezhimakh s primeneniym intellektual'nykh algoritmov na baze nechetkoy logiki [Control system for the technological process of grinding raw materials in subcritical modes using intelligent algorithms based on fuzzy logic]. Moskovskiy gosudarstvennyy institut stali i splavov. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. 2004. 143 p.

2. Tuz A.A. Upravleniye tekhnologicheskim protsessom izmel'cheniya v sharovoy mel'nitse v tsikle podgotovki pitaniya flotatsii na osnove nechetko-opredelennykh impul'snykh modeley [Control of the technological process of

grinding in a ball mill in the flotation feed preparation cycle based on fuzzy-defined impulse models]. Информационно-библиотечный центр РКХТУ им. Менделеева и сайт. URL: diss.muotr.ru/author/202/.

3. Kondratets' V. O., Matsuy A. M., *Electrotechnic and Computer Systems*. 2017. no. 24 (100). pp. 131-142.

4. Zhou P., Chai T., Wang H. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2009. V. 6. no. 4. pp. 730-743.

5. Coetzee L.C., Craig I.K., Kerrigan E.C. *IEEE Transactions on control systems technology*. 2009. V. 18. no. 1. pp. 222-229.

6. Chen X.S., Zhai J.Y., Li S.H., & Li Q. *Minerals Engineering*. 2007. V. 20. no. 11. pp. 1099-1108.

7. Chen X.S., Li S.H., Zhai J.Y., & Li Q. *Expert systems with Applications*. 2009. V. 36. no. 1. pp. 716-723.

8. Yang J., Li S., Chen X., & Li Q. *Powder Technology*. 2010. V. 198. no. 2. pp. 219-228.

9. Gugel K., Palacios G., Ramirez J., & Parra M. *Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. IEEE, 2003*. pp. 311-318.

10. Costea C.R., Silaghi H.M., Zmaranda D., & Silaghi M.A. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2015. V. 10. no. 2. pp. 165-173.

11. Krivonosov V.A., Taranenko M.E. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. V. 4. no. 8. pp. 132-135.

12. Yeremenko I.F., Krivonosov V.A. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*. 2005. no. 7. pp. 10-13.