



ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАСОС-ГИДРОЦИКЛОННОЙ УСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕГУЛЯТОРА С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ

В.В. Елшин, А.А. Колодин, А.Е. Овсянников

(ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»)

Показано применение регулятора с прогнозирующей моделью для оптимизации работы насос-гидроциклонной установки. Разработана модель объекта управления. Представлены результаты имитационного моделирования работы насос-гидроциклонной установки при различных режимах и настроечных параметрах регулятора.

Ключевые слова: оптимизация, технологический процесс классификации минерального сырья, насос-гидроциклон, регулятор с прогнозирующей моделью, ПИД-регулятор.

Введение

Сегодня наиболее популярным классом систем управления для сложных технологических объектов (нелинейных объектов, объектов со значительным транспортным запаздыванием, объектов с взаимосвязанными регулирующими переменными, объектов с множеством одновременно соблюдаемых ограничений) стала технология управления на основе *прогнозирующей модели* объекта (Model Predictive Control – MPC) [1].

Авторами разработан регулятор на основе прогнозирующей модели для локальных систем регулирования и управления [2, 3].

Алгоритм управления с прогнозирующей моделью.

1. Измерить текущее состояние значений параметров объекта управления $X[t]$, входящих в модель, в момент времени t . Это могут быть значение температуры, уровня, расхода, давления и т. д.

2. Найти последовательность оптимальных управляющих величин $U[t+T_c]$ для горизонта управления T_c через промежутки T_t на всем горизонте прогнозирования T_p . Эта последовательность должна минимизировать целевую функцию. В разработанном регуляторе при поиске последовательности оптимальных управляющих величин используется метод наискорейшего спуска.

3. Применить для управления только первую управляющую величину $U[t+T_t]$, остальные отбросить.

4. Перейти на шаг 1 и повторить процедуру в момент времени $t+T_t$.

Здесь T_p – горизонт прогноза, с; T_c – горизонт управления, с; T_t – время пересчета, через которое будет повторно выполняться алгоритм и осуществляться поиск оптимальных управляющих величин регулятора, с.

T_p , T_c , T_t – являются основными параметрами регулятора. Также существенно повлиять на время выполнения пересчета, точность получаемых результатов, качество

регулирования и оптимизации могут время дискретизации прогнозирующей модели dT и точность нахождения управляющего воздействия $Sprec$.

МРС-регулятор реализуется как программный модуль программируемого логического контроллера (ПЛК), вследствие чего на вычислительную мощность процессора ПЛК ложится большая вычислительная нагрузка. При этом алгоритм должен выполняться в режиме реального времени. Таким образом, у разработанного регулятора имеется серьезное ограничение – это число вызовов программного модуля. Подбор параметров регулятора позволяет снизить объем вычислений и нагрузку на процессор. Так в ПЛК можно применить 20...30 вызовов ПИД-регулятора, а МРС-регуляторов на порядок меньше – не более двух вызовов.

Применим разработанный МРС-регулятор для управления насос-гидроциклонной установкой.

Описание технологического процесса измельчения и классификации минерального сырья

В технологии обогащения полезных ископаемых важное место занимают процессы измельчения и классификации минерального сырья. Задача этих переделов – полное или частичное раскрытие зерен минералов и отбор определенного класса крупности, обеспечивающее успешное протекание последующих обогатительных и гидрометаллургических процессов. Измельчение и классификация являются наиболее затратными технологическими процессами, на их долю приходится до 80 % эксплуатационных затрат [4].

Важным узлом процесса классификации является насос-гидроциклонная установка, предназначенная для получения продукта заданного гранулометрического состава

Типовая технологическая обвязка данного технологического процесса включает:

- зумпф слива мельницы;

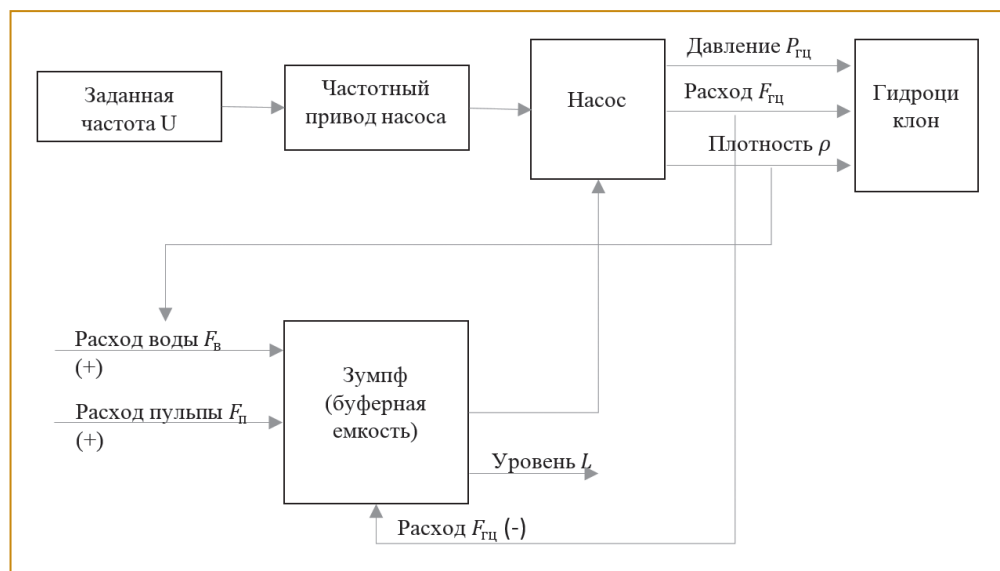


Рис. 1. Структурная схема управления насос-гидроциклонной установкой

- насос подающий питание на гидроциклонирование;
- кластер гидроциклонов;
- трубопровод воды в зумпф для поддержания необходимой плотности пульпы из зумпфа.

Типичное решение по управлению включает:

- измерения расхода и плотности пульпы на линии питания гидроциклона;
- измерение уровня пульпы в зумпфе;
- измерение размера частиц слива классификатора.

Воздействия, которые можно использовать в качестве управляющих:

- скорость (частота) нагнетания насоса подачи питания на гидроциклонирование (поддержание необходимого напора);
- расход воды для поддержания плотности пульпы в зумпфе;
- подключение/отключение секций гидроциклонов для поддержания напора (менее эффективно).

Системы регулирования разгрузки пульпы из зумпфов являются вспомогательными и обеспечивают устойчивость режима классификации путем предотвращения перелива пульпы из зумпфа и его опорожнения. Системы включают датчики уровня пульпы и регулятор числа оборотов привода основного или дополнительного насосов на разгрузке зумпфа. С другой стороны, давление питания кластера гидроциклонов является важным параметром его работы. Таким образом, появляется два параметра, которые взаимно влияют друг на друга: давление питания гидроциклонов и плотность питания. В этом случае возможна ситуация, когда в результате поддержания требуемой плотности и давления нагнетания будет обеспечен перелив зумпфа либо его опустошение.

В работе [5] рассмотрены проблемы проектирования, управления и оптимизации классификационных установок. Показано, что классические алгоритмы управления, такие как ПИД, малоэффективны. Анализ теоретических и экспериментальных исследований [6] показывает, что традиционно используемые режимы

регулирования водного режима при измельчении и классификации имеют определенный технологический смысл только в ограниченных условиях функционирования. Неконтролируемые изменения параметров исходной руды (изменение размеров куска, крепости, шаровой нагрузки) вносят дополнительные возмущения в режимы стабилизации и нарушают их работу.

Таким образом, процесс классификации в насос-гидроциклонной установке имеет ряд особенностей:

- параметры со взаимным влиянием;
- неконтролируемые изменения параметров исходной руды;
- нелинейность процесса.

В [7] показано, что разработанный МРС-регулятор позволяет строить системы управления на объектах, когда модель имеет неопределенности или объект может менять свои свойства.

Описание математической модели насос-гидроциклонной установки

Применим для управления насос-гидроциклонной установкой МРС-регулятор с прогнозирующими моделями. Структурная схема управления насос-гидроциклонной установкой представлена на рис. 1.

Давление (РГЦ) и расход пульпы в гидроциклоне (FГЦ) зависят от оборотов (частоты U) подающего насоса:

$$\frac{dP_H}{dt} = K_H U \quad (1)$$

Насос создает давление, необходимое для создания напора в трубопроводе при транспортировке пульпы в гидроциклонную установку, равное сумме давления нагнетания насоса, давления столба жидкости зумпфа и противодавления столба жидкости в трубопроводе до гидроциклона:

$$P_{ГЦ} = P_H^2 + P_3 - P_h, \quad (2)$$

$$P_3 = \rho g L. \quad (3)$$

Если давление нагнетания меньше давления на гидроциклоне, то расход пульпы из зумпфа отсутствует:

$$F_{ГЦ} = \begin{cases} 0, & P_H - P_{ГЦ} < 0 \\ K_{ГЦ} \sqrt{P_H - P_{ГЦ}}, & \end{cases} \quad (4)$$

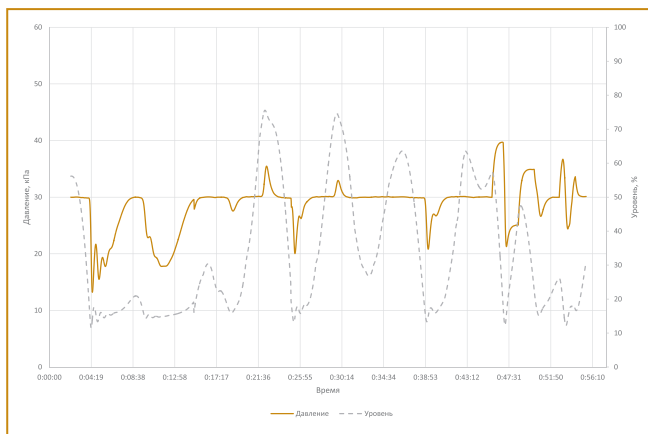


Рис. 2. Регулирование давления в гидроциклоне при ограничении уровня в зумпфе

Коэффициент нагнетания имеет нелинейную зависимость от уровня в зумпфе, так как падение уровня ниже критического значения может привести к ситуации, в которой насос вместе с жидкостью будет засасывать воздух, что и выражено в этой зависимости (значения эмпирические):

$$K_H = \begin{cases} 0,0002, & L < 10 \\ 0,2, & L \geq 10 \end{cases} \quad (5)$$

Уровень в зумпфе зависит от площади сечения, от поступающих и исходящих потоков:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{F_{\Pi} + F_B + F_{\Gamma\Gamma}}{S}, \quad (6)$$

где $F_{\Gamma\Gamma}$ — расход пульпы из зумпфа в гидроциклон, м³/ч; F_{Π} — расход пульпы в зумпф, м³/ч; F_B — расход воды в зумпф, м³/ч; P_H — давление нагнетания насоса, кПа; $P_{\Gamma\Gamma}$ — давление на гидроциклоне, кПа; P_3 — давление столба жидкости зумпфа, кПа; P_h — противодействие столба жидкости в трубопроводе до гидроциклона, высота подъема, кПа; ρ — плотность пульпы, кг/м³; L — уровень пульпы в зумпфе, %; $K_{\Gamma\Gamma}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий физические свойства трубопровода до гидроциклона, U — частота работы насоса, Гц; K_H — коэффициент пропорциональности, характеризующий работу насоса.

Определим критерий оптимальности работы установки (целевую функцию):

$$J = \sum (P_{\text{зад}} - P_{\Gamma\Gamma})^2 + e^{(L - L_{\text{ВП}})} + e^{(L_{\text{НП}} - L)}, \quad (7)$$

где $P_{\text{зад}}$ — заданное давление на гидроциклоне, кПа; $L_{\text{НП}}$ — заданное значение нижнего предела уровня в зумпфе, %; $L_{\text{ВП}}$ — заданное значение верхнего предела уровня в зумпфе, %.

Целевая функция — сумма квадрата разности заданного давления и рассчитанного давления на гидроциклоне, экспоненциальных функций в степени разницы уровня для верхнего и нижнего предела. Минимизация целевой функции дает оптимальное решение данной задачи.

В качестве регулятора плотности используется импульсный ПИ-регулятор. Плотность регулируется изменением расхода воды в зумпфе через регулирующий орган. Для уменьшения плотности пульпы подача воды увеличивается, для увеличения — уменьшается. В модели данный расход принимается как некая функция от времени и является возмущающим фактором.

Регулятором давления и уровня будет выступать разработанный MPC-регулятор с прогнозирующей моделью.

Результаты моделирования

Имитационное моделирование рассматриваемого технологического процесса проводилось в среде разработки TraceMode 6. Время пересчета узла монитора реального времени было установлено на 0,2 с.

Графики регулирования давления в гидроциклоне при ограничении уровня в зумпфе показаны на рис. 2.

В качестве возмущающего фактора выступает поток пульпы в зумпф. Параметры целевой функции J : значение нижнего предела уровня в зумпфе $L_{\text{НП}} = 20\%$, верхнего $L_{\text{ВП}} = 70\%$, заданное давление на гидроциклоне $P_{\text{зад}} = 30$ кПа. Параметры регулятора: $T_p = 20$ с; $T_c = 2$ с; $T_i = 1$ с. Прогнозирующая модель, используемая в регуляторе, имеет время дискретизации $dT = 0,1$ с. Управляющее воздействие определяется с точностью до 0,05 Гц.

Из рис. 3 видно, что при достижении ограничений по верхнему или нижнему уровню регулятор за счет сниже-

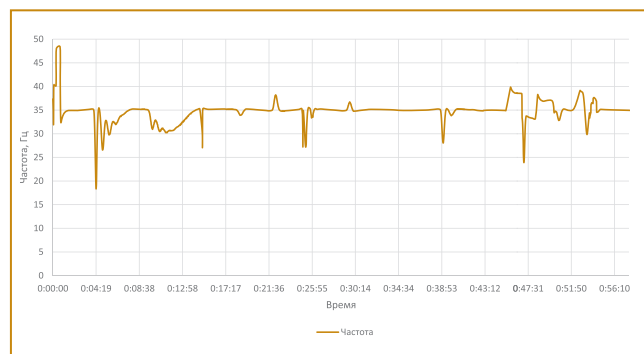


Рис. 3. Частота работы насоса при регулировании давления в гидроциклоне

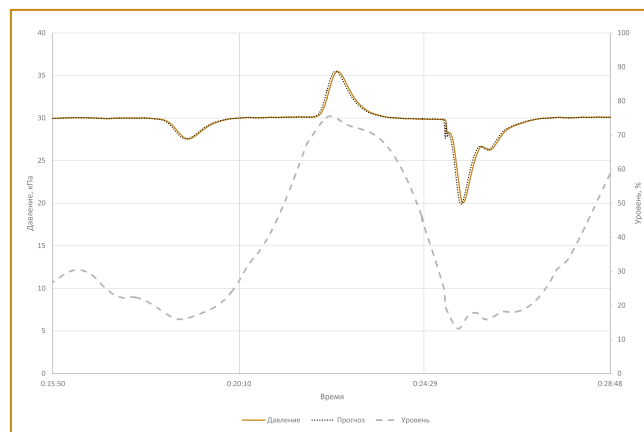


Рис. 4. Регулирование давления в гидроциклоне с прогнозными значениями давления

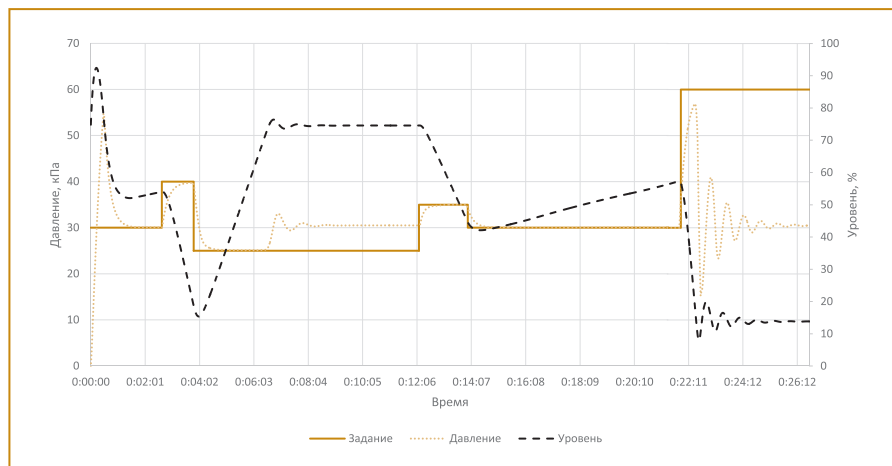


Рис. 5. Переходные процессы при изменении задания давления на гидроциклоне

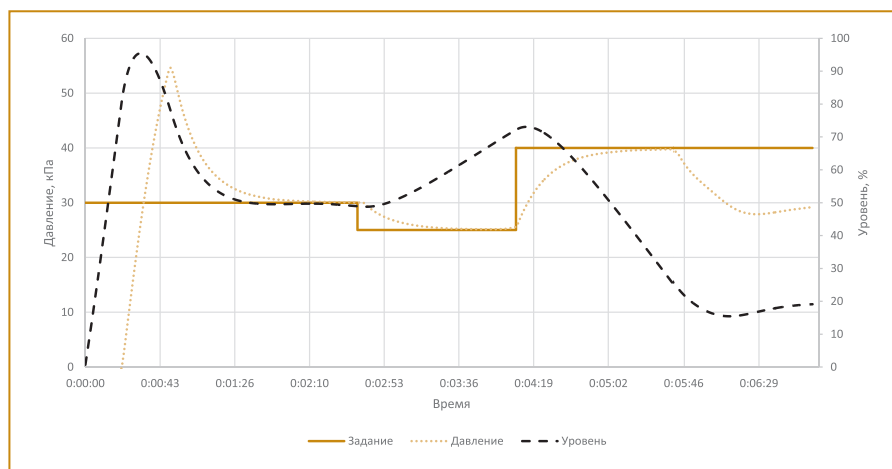
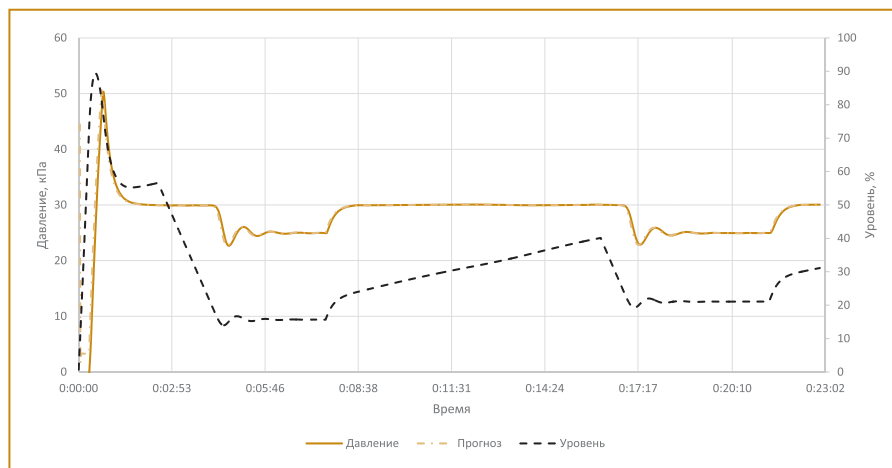
Рис. 6. Переходные процессы при настройках $T_r = 40$ с; $T_c = 3$ с; $T_t = 1$ с

Рис. 7. Работа регулятора в условиях пропадания сигнала о расходе воды

компенсирует эти изменения за счет увеличения или снижения давления. В период с 31 по 38 мин наблюдается режим поддержания давления.

На рис. 4 показан увеличенный фрагмент графика регулирования давления в гидроциклоне с нанесенными данными расчетного значения прогноза давления. Прогнозные значения незначительно отличаются от реальных моделируемых значений.

Влияние изменения заданного давления на работу установки показано на рис. 5. Значение задания давления на гидроциклоне изменялось в диапазоне 25...60 кПа. При достижении ограничений по верхнему или нижнему пределу уровня регулятор изменял давление до оптимальных значений в соответствии с целевой функцией. Таким образом избегался как перелив, так и опустошение зумпфа.

Переходные процессы при различных настройках параметров

С целью исследования качества переходных процессов проводились испытания при различных параметрах регулятора:

1) $T_r = 40$ с, $T_c = 2$ с, $T_t = 1$ с — при повышении времени прогнозирования переходные процессы растягиваются во времени, имеют более плавные переходы;

2) $T_r = 20$ с, $T_c = 3$ с, $T_t = 1$ с — при увеличении времени управления без увеличения времени прогнозирования реакция системы более отзывчивая, но при этом возникают колебательные процессы вследствие недостаточности времени прогнозирования;

3) $T_r = 40$ с, $T_c = 3$ с, $T_t = 1$ с (рис. 6) — при одновременном увеличении времени управления и прогнозирования (рис. 6) наблюдаются отзывчивость и уменьшенная

колебательность. Эти наборы параметров имеют лучшие переходные характеристики;

4) $T_r = 10$ с, $T_c = 3$ с, $T_t = 1$ с — в случае уменьшения времени прогнозирования наблюдаются достаточно большие флуктуации при переходных процессах. Очевидно, что этого времени недостаточно для корректной работы по поиску оптимального управления;

ния или увеличения давления компенсирует эти изменения. В частности, в период с 4 мин до 20 мин наблюдается низкое значение уровня в зумпфе до 19 %. Регулятор снижает давление на гидроциклоне, тем самым не позволяя опуститься уровню еще ниже, до критически низкого уровня. В период с 20 по 31 мин наблюдается как возрастание, так и падение уровня в зумпфе, где регулятор

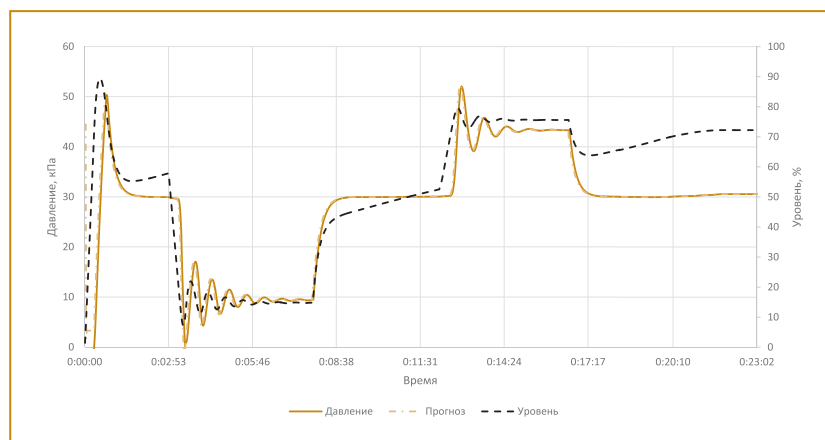


Рис. 8. Работа регулятора в условиях резкого прекращения и резкого повышения подачи воды

5) $T_p = 20$ с, $T_c = 2$ с, $T_t = 2$ с — в случае увеличения времени переходные процессы становятся более инерционными, появляются задержки в реакции и небольшая колебательность.

Во всех случаях наблюдается устойчивая работа регулятора.

Проверка системы управления на робастность

В реальных процессах возможны ситуации, когда сигнал с датчика может внезапно пропасть вследствие неисправности или внезапного отключения питания. Если информация с такого устройства участвует в контуре регулирования или управления, то это может отрицательно сказаться на работе установки, вплоть до ее неуправляемости в автоматическом режиме. Рассмотрим ситуацию, при которой расходомер воды выходит из строя. На рис. 7 в момент времени 2 мин 27 с расход воды был вручную снижен с $280 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $220 \text{ м}^3/\text{ч}$, сигнал с датчика не прерывался. Система управления отработала и установила безопасный низкий уровень в зумпфе, снизив давление на гидроциклон. В момент времени 7 мин 30 с. расход был восстановлен до $280 \text{ м}^3/\text{ч}$. В момент времени 12 мин был принудительно отключен сигнал с расходомера. А в момент времени 16 мин 30 с был вручную снижен расход с $280 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $220 \text{ м}^3/\text{ч}$. Система отработала такое изменение, выставив уровень чуть выше предыдущего, когда сигнал не обрывался. В момент времени 21 мин 30 с расход был восстановлен.

Следующее исследование направлено на выявление стабильности работы регулятора в случае резкого изменения (прекращение или повышение) подачи воды в зумпф, которое может произойти в любой момент в технологическом процессе (рис. 8). В момент времени 2 мин 53 с происходит резкое падение расхода воды с 280 до $0 \text{ м}^3/\text{ч}$. Система управления со сложностями, но выводит объект в управляемую и стабильную

область работы. В момент времени 8 мин расход восстанавливается до $280 \text{ м}^3/\text{ч}$. В 12 мин 10 с расхода воды увеличивается до $400 \text{ м}^3/\text{ч}$. В момент времени 16 мин 30 с расход восстанавливается до $280 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Выводы

Рассмотрено применение МРС-регулятора для управления насос-гидроциклонной установкой. Применение регулятора позволило осуществить протекание технологического процесса в оптимальном режиме. Такой способ управления обладает достаточной степенью управляемости и робастности даже в условиях отсутствия некоторой информации о процессе. Разработанный регулятор на основе прогнозирующей модели в ряде случаев может быть использован вместо ПИД регуляторов.

Сложность в повсеместном применении МРС-регуляторов заключается в необходимости разрабатывать индивидуальную математическую модель технологического процесса. Кроме того, производство должно быть оснащено высокопроизводительными ПЛК.

Список литературы

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC — усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 56-62.
2. Колодин А.А., Елишин В.В. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: технические науки. 2021. Т. 29. № 1. С. 36-45.
3. Колодин А. А. Управление на основе прогнозирующей модели в системах локального регулирования // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 11. С. 521-527.
4. Литвинова Н. М., Ятлукова Н. Г., Александрова Т. Н., Гурман М. А., Крестьяникова Н. С. К вопросу о влиянии крупности измельчения на процесс выщелачивания упорных золото-содержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12.
5. W. Stange, M. H. Moys, A. L. Hinde. The use of dynamic simulation in the development of control systems for backfill plants // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 91, No. 12, Dec 1991. pp. 413-422.
6. I.K. Craig, D.G. Hulbert, G. Metzner, and S.P. Moultt. Optimized multivariable control of an industrial run-of-mine milling circuit // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 92, No. 6, Jun 1992. pp. 169-176.
7. B. Muller and P.L. de Vaal. Development of a model predictive for a milling circuit // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 100, No. 7, Nov/Dec 2000. pp. 449-453

Елишин Виктор Владимирович — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Автоматизация и управление»,
Колодин Алексей Александрович — старший преподаватель,
Овсюков Александр Евгеньевич — старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».
 E-mail: dean_zvf@istu.edu, kolodin@istu.edu, ovsyukov@istu.edu