

Л.Д. Певзнер, С.Е. Бабаков

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ЧЕРПАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА-МЕХЛОПАТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассмотрен алгоритм управления операцией черпания экскаватора-мехлопаты, основанный на применении комбинации программного и нечетко-логического управления приводами подъема и напора. В ходе работы алгоритма выполняется первичная идентификация ситуации стопорения привода подъема. Если стопорение имеет место, задания скоростей приводам подъема и напора выдаются по жесткой программе выхода из стопорения. Если стопорения привода подъема нет, то управление приводами напора и подъема ведется по алгоритму, основанному на применении нечеткой логики.

Ключевые слова: экскаватор, карьерный экскаватор, операция черпания, управление, нечеткая логика.

Введение

Процесс копания является одной из самых важных и в тоже время сложных для автоматизации операций. При управлении данным процессом нужно учитывать достаточно много информации, часть которой недоступна для измерения. Это прежде всего информация о форме разрабатываемого забоя, которую машинист получает зрительно. До недавнего времени ее получение и обработка были крайне затруднительны, однако, с развитием бесконтактных средств измерения расстояния, таких как сканирующие лазерные, ультразвуковые и радарные уровнемеры и дальномеры получение такой информации стало возможным. А рост производительности вычислительных средств сделал возможным быструю обработку этой информации.

Управление процессом копания сложно реализовать путем классического управления по рассогласованию теми или иными параметрами. Это вызвано необходимостью учета их достаточно большого числа и реализации различных стратегий управления в зависимости от значений этих параметров.

Разрешить эти сложности можно путем применения программно-интеллектуального алгоритма управления. Его описанию и посвящена данная статья.

Программно-интеллектуальный алгоритм

Этот алгоритм представляет из себя комбинацию жесткой программы и алгоритма, построенного на основе применения нечеткой логики [3, 4]. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

В этой блок-схеме применены следующие обозначения: $M_{\text{нап}}$, $M_{\text{под}}$ – моменты механизмов напора и подъема; $M_{\text{нап крит}}$, $M_{\text{под крит}}$ – критические значения моментов приводов напора и подъема; $h_{\text{ковша}}$ – текущее значение высоты ковша (его Z-координата в базовой системе); $h_{\text{крит}}$ – критическая высота черпания; $E_{\text{тек}}$ – текущий объем породы в ковше; $E_{\text{пасп}}$ – паспортная вместимость ковша.

Вначале работы алгоритма выполняется оценка текущего наполнения ковша для принятия решения о завершении процедуры черпания. Если ковш не заполнен до конца, определяется, есть ли возможность его даль-

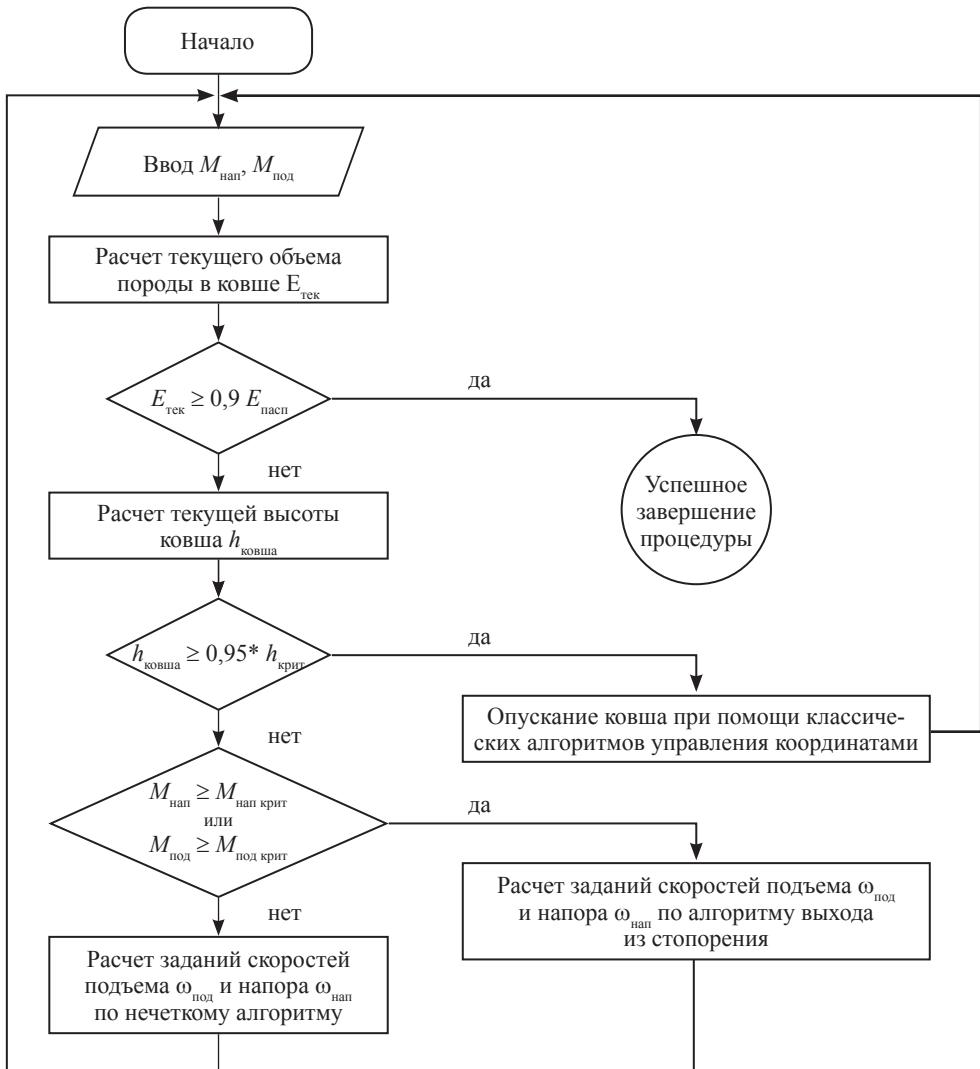


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления процессом копания

нейшего заполнения путем подъема т.е. не достигнута ли критическая высота черпания. Это высота, равная либо высоте забоя, если та меньше максимальной высоты черпания, либо максимальной высоте черпания. Возможна коррекция этой высоты в зависимости от формы забоя и угла уступа в сторону значения, при котором рукоять выше своего горизонтального положения и за счет естественного

движения рукояти происходит отдаление ковша от груди забоя.

Если эта высота еще не достигнута, то производится первичная идентификация превышения моментами приводов напора и подъема своих критических значений, т.е. идентификация ситуации стопорения. Если критическая высота достигнута, а ковш не наполнен, выполняется его автоматическое опускания на высоту, ниже

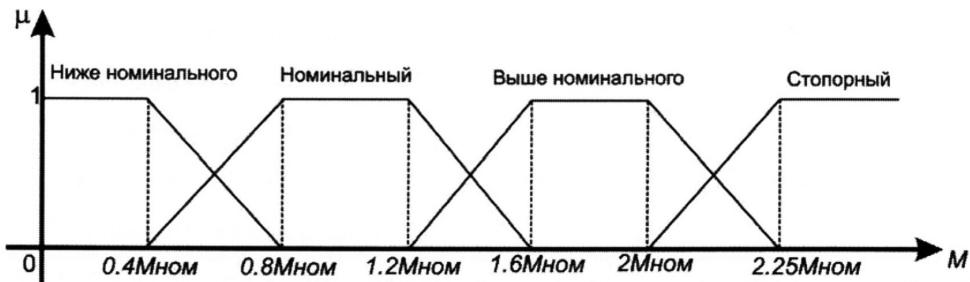


Рис. 2. Теоретические функции принадлежности лингвистической переменной «Нагрузка привода подъема»

горизонтального положения рукояти. Опускание выполняется при помощи системы управления обобщенными координатами экскаватора.

После идентификации стопорения приводов если оно не наблюдается, то вычисление заданий скоростей приводов подъема и напора вычисляется при помощи нечеткого алгоритма. Если один из приводов застопорился или близок к нему, то программа входит в алгоритм выхода из аварийной ситуации стопорения. Рассмотренный алгоритм выполняется в управляющей ЭВМ циклически.

Нечеткий алгоритм управления приводами подъема и напора

Нечеткий алгоритм управления приводами в процессе черпания представляет собой комбинацию трех алгоритмов – алгоритма определения рекомендуемой толщины снимаемой стружки, алгоритма управления приводом напора и алгоритма управления приводом подъема. Такое разделение продиктовано большим количеством правил и учитываемых параметров в случае объединения всех алгоритмов в один.

Усилия сопротивления породы копанию пропорциональны толщине снимаемой стружки и коэффициенту сопротивления копанию [5]. Это означает, что для того, чтобы избежать стопорения приводов необходимо

корректировать толщину снимаемой стружки в зависимости от свойств разрабатываемой породы. Для этого используется нечеткий алгоритм определения рекомендуемой толщины стружки в зависимости от текущей степени заглубления ковша и нагрузки привода в данный момент. Степень заглубления определяется при помощи модели забоя в памяти управляющей ЭВМ и рассчитанных координат зубьев кромки ковша по отношению к этому забою.

Алгоритм определения рекомендуемой толщины снимаемой стружки базируется на введении трех лингвистических переменных: «Нагрузка привода подъема», «Заглубление зубьев ковша» и «Толщина стружки».

Для лингвистической переменной «Нагрузка привода подъема» выделены четыре нечетких множества: Меньше номинального, Номинальный, Больше номинального, Стопорный. Функции принадлежности этим множествам лингвистической переменной выбраны кусочно-непрерывного типа.

Для лингвистической переменной «Заглубление зубьев ковша» рассмотрена принадлежность к трем нечетким множествам: «Маленькое», «Среднее», «Большое». Аналогичным образом, для лингвистической переменной «Толщина стружки» аналогичным образом введены три множества: «Маленькая», «Средняя», «Большая».

Соответствующие функции принадлежности

Алгоритм определения толщины стружки реализует набор из двенадцати производственных правил:

П1: Если Нагрузка привода подъема ниже номинальной и Заглубление зубьев ковша маленькое, то Толщина стружки – большая;

П2: Если Нагрузка привода подъема ниже номинальной и Заглубление зубьев ковша среднее, то Толщина стружки – большая;

П3: Если Нагрузка привода подъема ниже номинальной и Заглубление зубьев ковша большое, то Толщина стружки – большая;

П4: Если Нагрузка привода подъема номинальная и Заглубление зубьев ковша маленькое, то Толщина стружки – большая;

П5: Если Нагрузка привода подъема номинальная и Заглубление зубьев ковша среднее, то Толщина стружки – большая;

П6: Если Нагрузка привода подъема номинальная и Заглубление зубьев ковша большое, то Толщина стружки – большая;

П7: Если Нагрузка привода подъема выше номинальной и Заглубление зубьев ковша маленькое, то Толщина стружки – маленькая;

П8: Если Нагрузка привода подъема выше номинальной и Заглубление зубьев ковша среднее, то Толщина стружки – средняя;

П9: Если Нагрузка привода подъема выше номинальной и Заглубление зубьев ковша большое, то Толщина стружки – средняя;

П10: Если Нагрузка привода подъема стопорная и Заглубление зубьев ковша маленькое, то Толщина стружки – маленькая;

П11: Если Нагрузка привода подъема стопорная и Заглубление зубьев ковша среднее, то Толщина стружки – маленькая;

П12: Если Нагрузка привода подъема стопорная и Заглубление зубьев ковша большое, то Толщина стружки – средняя.

Идея управления приводами напора и подъема при копании заключается в стабилизации толщины снимаемой с забоя стружки породы на уровне, рекомендованном алгоритмом определения ее толщины, который описан выше. Основное управление ведется скорость привода напора. В идеале, скорость подъема при этом должна оставаться постоянной и для обеспечения хорошего быстродействия должна быть близка к номинальной. Однако для различных форм забоев и положений рукояти ее приходится в некоторых пределах изменять для повышения качества отработки задания толщины снимаемой стружки.

Управление толщиной снимаемой стружки ведется по рассогласованию и возможны ситуации, когда ошибка большая и регулятор вырабатывает большое управление привод разгоняется и из-за естественного движения ковша на подъем оказывается слишком заглубленным. Регулятор снова исправляет эту ошибку, но из-за большого времени реверсирования точность отработки задания становится очень низкой, а качество переходных процессов становится неудовлетворительным.

Чтобы избегать этих явлений была введена лингвистическая переменная – «Высота зубьев ковша» (их Z-координата в базовой системе). Для этой переменной были выделены три диапазона (нечетких множеств) – «Ниже рабочей», «Рабочая», «Выше рабочей», отвечающие различным областям забоя, в которых ковш может находиться. В зависимости от того, к какому из множеств принадлежит координата ковша в данный момент, стратегии управления несколько различаются.

Нижняя область или множество «Ниже рабочей», область, в которой рукоять незначительно отходит от своего вертикального положения и если она в этой области очень сильно выдвинута, то при ее приближении к горизонтальному положению ковш окажется очень сильно заглубленным, что нежелательно. В этой области ошибка отработки толщины тоже велика, как уже говорилось выше. Когда ковш находится в ней, приоритет управления отдается не уменьшению ошибки, а плавному, медленному движению. Регулятор в этой области отслеживает только, чтобы степень заглубления ковша не была очень велика. Границами области условно является диапазон высот от 0 м до 10–20% от высоты, при которой рукоять горизонтальна.

В рабочей области (множество «Рабочая»), которая расположена выше предыдущей и ограничена высотой, при которой рукоять находится в горизонтальном положении. Данная область – самая благоприятная для процесса копания. Копание в ней можно вести при максимальных скоростях подъема. Приоритет отдается стратегии стабилизации толщины стружки на заданном уровне, т.е. управление ведется по рассогласованию толщины стружки.

Третья область – область выше рабочей (множество «Выше рабочей»). Это область от горизонтального положения рукояти до максимальной высоты черпания экскаватора. Область менее благоприятная для черпания, чем предыдущая. Здесь приоритет тоже отдается стабилизации толщины стружки на заданном уровне, но в данной области большую роль играет управление скоростью подъема, которая должна быть здесь по возможности максимально уменьшена.

Алгоритм управления приводом напора использует четыре лингви-

стические переменные: «Ошибка отработки задания», «Степень заглубления ковша», «Высота зубьев ковша» и «Скорость привода напора».

Для лингвистической переменной «Ошибка отработки задания» введено пять множеств: «Большая отрицательная», «Маленькая отрицательная», «Нулевая», «Маленькая положительная», «Большая положительная». При надлежность лингвистической переменной «Степень заглубления ковша» введена для четырех множеств: «Большая отрицательная», «Маленькая отрицательная», «Маленькая положительная», «Большая положительная».

Для лингвистической переменной «Скорость привода напора» введено пять множеств: «Большая отрицательная», «Маленькая отрицательная», «Нулевая», «Маленькая положительная», «Большая положительная». Опыт модельных исследований показал, что в правилах в основном, целесообразно использовать только три: «Большая положительная», «Нулевая», «Большая отрицательная». Это вызвано большой инерционностью приводов и систем управления.

Перечень продукционных правил, на которых основывается данный алгоритм управления, приведен ниже.

П1: Если Степень заглубления ковша большая положительная и Высота зубьев ковша ниже рабочей, то Скорость привода напора большая отрицательная;

П2: Если Степень заглубления ковша маленькая положительная и Высота зубьев ковша ниже рабочей, то Скорость привода напора большая отрицательная;

П3: Если Степень заглубления ковша маленькая отрицательная и Высота зубьев ковша ниже рабочей, то Скорость привода напора большая положительная;

П4: Если Степень заглубления ковша большая отрицательная и Высота

зубьев ковша ниже рабочей, то Скорость привода напора большая положительная;

П5: Если Ошибка отработки задания большая отрицательная и Высота зубьев ковша рабочая, то Скорость привода напора большая отрицательная;

П6: Если Ошибка отработки задания малая отрицательная и Высота зубьев ковша рабочая, то Скорость привода напора большая отрицательная;

П7: Если Ошибка отработки задания нулевая и Высота зубьев ковша рабочая, то Скорость привода напора нулевая;

П8: Если Ошибка отработки задания малая положительная и Высота зубьев ковша рабочая, то Скорость привода напора большая положительная;

П9: Если Ошибка отработки задания большая положительная и Высота зубьев ковша рабочая, то Скорость привода напора большая положительная;

П10: Если Ошибка отработки задания большая положительная и Высота зубьев ковша выше рабочей, то Скорость привода напора большая положительная;

П11: Если Ошибка отработки задания маленькая положительная и Высота зубьев ковша выше рабочей, то Скорость привода напора большая положительная;

П12: Если Ошибка отработки задания маленькая отрицательная и Высота зубьев ковша выше рабочей, то Скорость привода напора маленькая положительная;

П13: Если Ошибка отработки задания нулевая и Высота зубьев ковша выше рабочей, то Скорость привода напора нулевая;

П14: Если Ошибка отработки задания большая отрицательная и Высота зубьев ковша выше рабочей, то Скорость привода напора маленькая отрицательная.

Идея управления приводом подъема заключается, как уже говорилось,

в коррекции его скорости с целью избегать стопорения. Как и для привода напора, при управлении играет роль лингвистическая переменная «Высота зубьев ковша», имеющая такие же функции принадлежности. На разных множествах реализуется разная стратегия. Она во многом аналогична описанной для привода напора. Однако, чтобы контролировать процесс стопорения была введена лингвистическая переменная «Частота вращения привода подъема». Для нее введены функции принадлежности трем множествам: «Стопорная», «Ниже nominalной», «Номинальная».

В качестве выходной величины регулятора используется на абсолютное значение задания скорости привода, а величина ее процентного изменения от текущего состояния (дельта). Т.е. задание ЭДС генератору подъема имеет вид:

$$U_k = U_{k-1} + \Delta \frac{U_{k-1}}{100}, \quad (1)$$

где k – номер шага.

Для лингвистической переменной, соответствующей данной выходной величине, введено пять множеств: «Большое отрицательное», «Маленькое отрицательное», «Нулевое», «Маленькое положительное», «Большое положительное».

Для исследовательских испытаний предложенных алгоритмов была построена модель, приведенная на рис. 3.

Эта модель состоит из пяти блоков – «Fuzzyjn», «Sopr», «Motors», «Massa», «Excavator» и «Kinem». Блок «Fuzzyjn» реализует разработанные нечеткие алгоритмы управления, «Sopr» реализует моменты сопротивления движению ковша в забое, «Motors» реализует модели главных приводов экскаватора и развиваемых ими обобщенных моментов, «Excavator» реализует системы уравнений динамики,

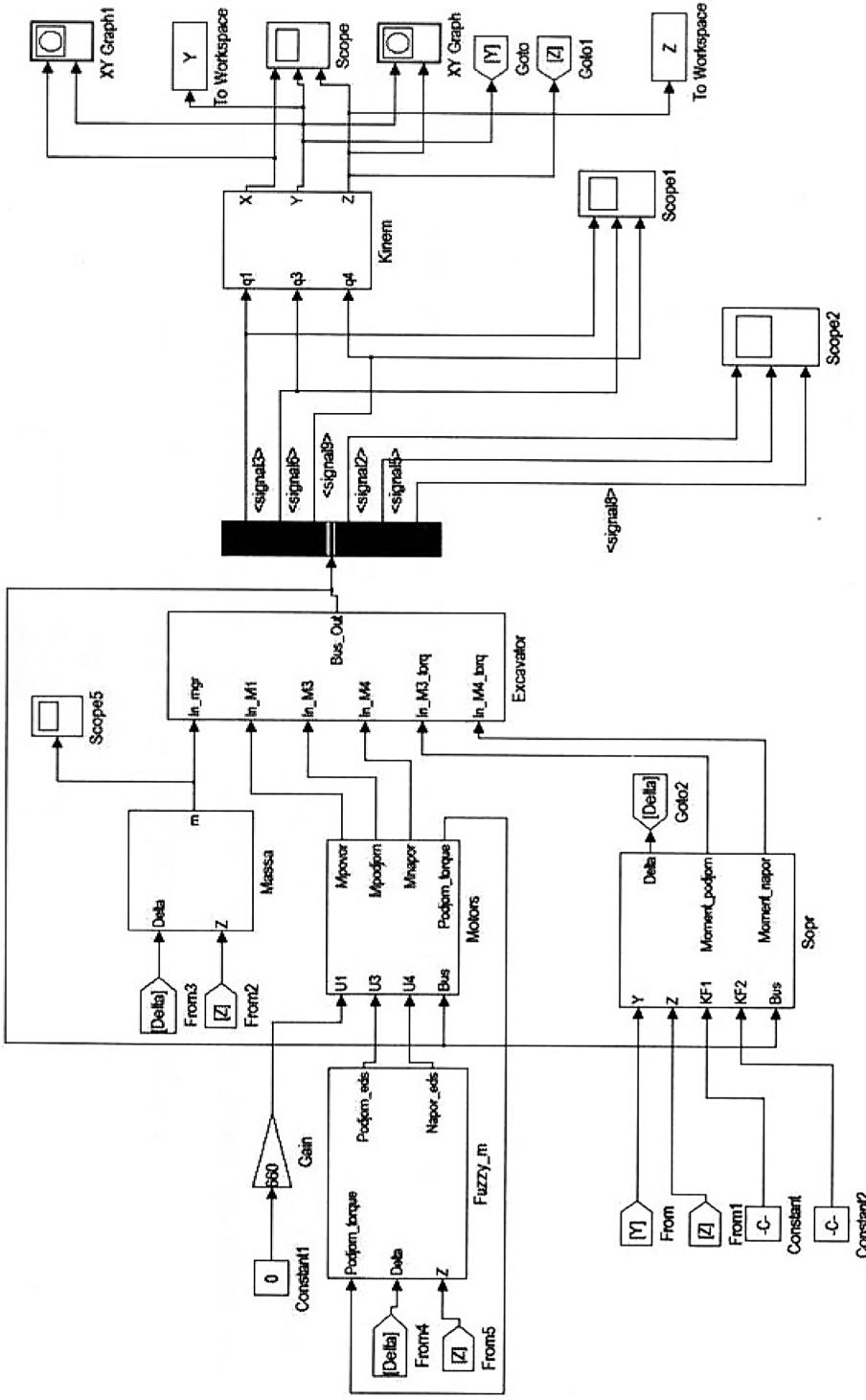


Рис. 3. Модель для исследования нечетких алгоритмов управления процессом копания

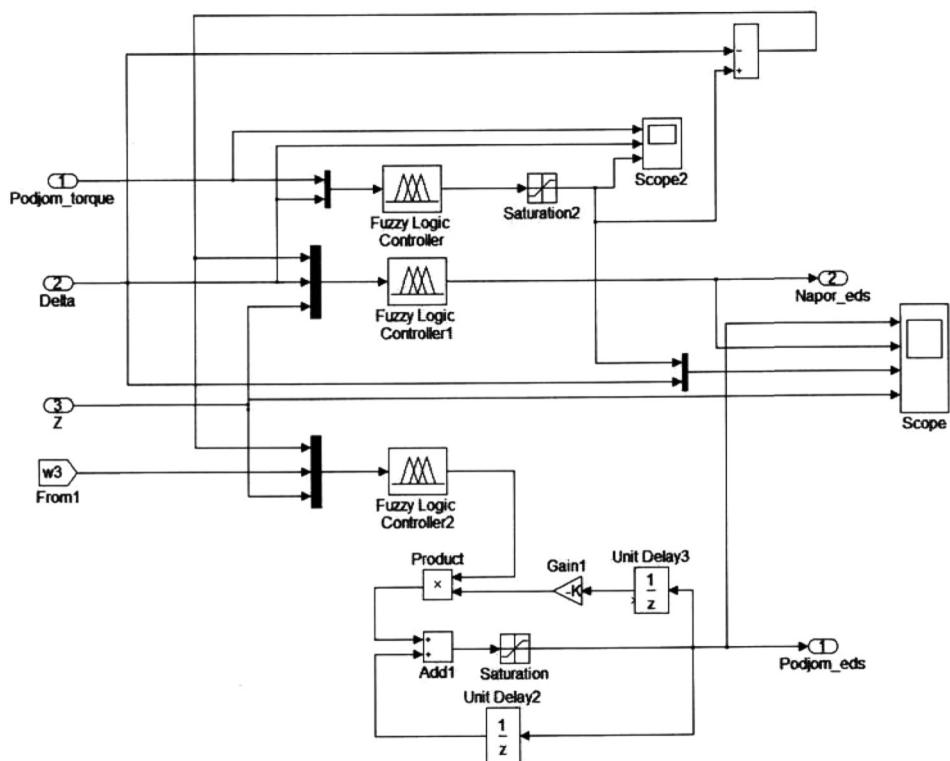


Рис. 4. Модельный блок «Fuzzyjn», структура Выполнено моделирование работы алгоритмов для различных углов уступа забоя и различных крепостей породы. Высота забоя – $n = 15$ м, $y_0 = 11$ м

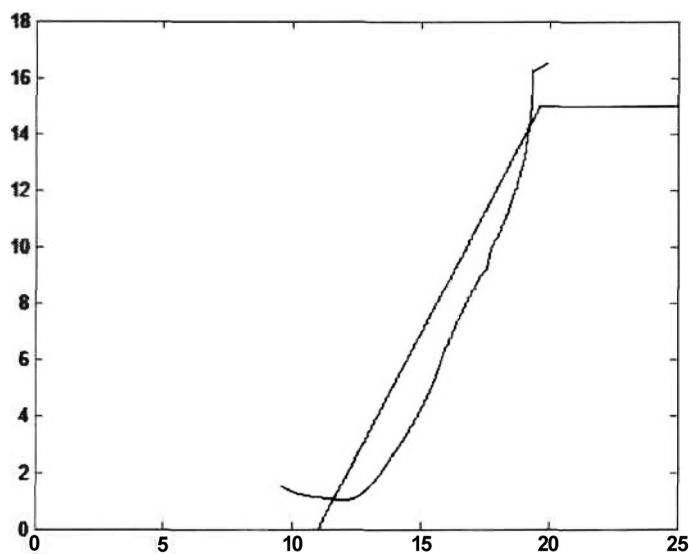


Рис. 5. Траектория движения ковша и обрабатываемый забой

описанные в [1, 2], «Kinem» – вычисляет координаты кромки ковша экскаватора в базовой системе координат. Структура блока «Fuzzyjn» приведена на рис. 4

Для угла уступа – 60° и сопротивление копанию – $0,075 \cdot 10$ Па, что соответствует довольно плотным породам II – категории результаты приведены на рис. 5 и 6.

Из приведенных графиков видно, что черпание заканчивается не ниже уровня горизонтального положения рукояти (для ЭКГ-15 этот уровень составляет около 10 м) и оценка времени наполнения ковша меньше трети времени паспортного цикла экскавации (28 с). Из этих соображений можно сделать вывод о работоспособности предложенных алгоритмов.

Заключение

В статье предложены новые алгоритмы управления операцией черпания карьерного экскаватора-мехлопаты. Эти алгоритмы базируются на совместном использовании нечетких регуляторов и программного управления. Представлены результаты мо-

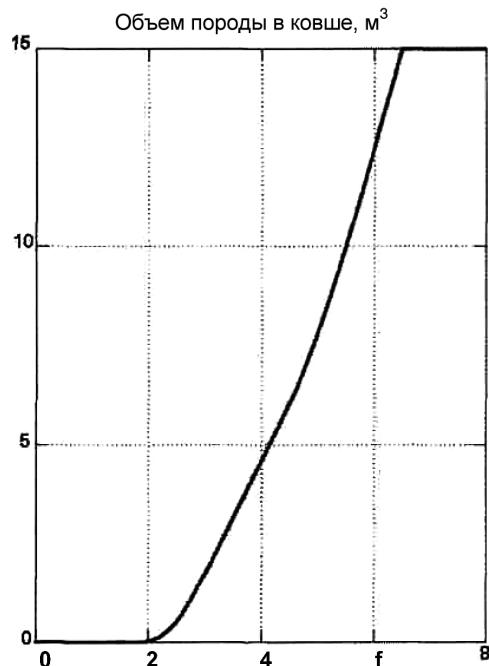


Рис. 6. Оценка объема породы в ковше

делирования, подтверждающие их работоспособность. Предложенные алгоритмы могут быть использованы при построении АСУТП экскаватора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаков С.Е. Математическое моделирование динамики карьерного экскаватора на основе метода Белоусова // Вопросы радиоэлектроники. – 2012. – апрель, вып. 2. – С. 112–118.
2. Певзнер Л.Д., Бабаков С.Е. Моделирование и управление операцией транспортирования экскаватора – мехлопаты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 8. – Деп. рук.
3. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2009. – 320 с.
4. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007. – 288 с.
5. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: (горное машиностроение). Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ, 2007. – 680 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Певзнер Леонид Давидович – доктор технических наук, профессор, Бабаков С.Е. – аспирант, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

CONTROL ALGORITHM OF QUARRY POWER SHOVEL DIGGING OPERATION BASED ON FUZZY LOGIC

Pevzner L.D., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Babakov S.E., Graduate Student,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», e-mail: ud@msmu.ru.

In this article is given the automatic control algorithm of quarry power shovel digging operation, based on a combination of programmed and fuzzy logic control by pressuring and lifting motors. Primary identification of situation then lifting motor is stopping is making during the algorithm work. If situation then lifting motor is stopping takes place, tasks of speeds to lifting and pressuring motors is given according to the rigid program of an exit from stopping. If situation then lifting motor is stopping isn't present, control of pressuring and lifting motors conducted on the algorithm based on fuzzy logic.

Key words: excavator, quarry power-shovels, digging operation, control, fuzzy logic.

REFERENCES

1. Babakov S.E. Voprosy radioelektroniki. 2012. April, issue 2, pp. 112–118.
2. Pevzner L.D., Babakov S.E. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2012, no 8, deposited manuscript.
3. Yarushkina N.G. Osnovy teorii nechetkikh i gibriddenykh sistem (Основы теории нечетких и гибридных систем), Moscow, Finansy i statistika, 2009, 320 p.
4. Shtovba S.D. Proektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB (Проектирование нечетких систем средствами MATLAB), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2007, 288 p.
5. Poderni R.Yu. Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov: (gornoje mashinostroenie). Uchebnik dlya vuzov. 6-e izd. (Механическое оборудование карьеров: (горное машиностроение). Textbook for high schools. 6th edition), Moscow, Izd-vo MGGU, 2007, 680 p.



О Т Д Е Л Н Ы Е С Т А Т Ъ Й ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (ПРЕПРИНТ)

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ФАСОННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАНКОВ С ЧПУ

Тайров Илья Евгеньевич – аспирант, МГТУ «СТАНКИН»;

Лескин Сергей Алексеевич – главный специалист технологического отдела

НФ ОАО «НПО «Прибор», e-mail: il.tairov@gmail.com.

Описаны принципы построения технологических процессов механической обработки деталей, относящихся к прессовому инструменту с твердостью свыше 45 HRC. В основе создания новых технологических процессов лежит применение многофункционального оборудования с ЧПУ, которое отвечает требованиям по жесткости системы станок – приспособление – инструмент – деталь и способно осуществлять токарную обработку деталей, прошедших термическую обработку, режущим инструментом с пластинками из кубического нитрида бора.

Ключевые слова: ЧПУ, точение, пресс инструмент, закалка, твердость.

OPTIMIZATION TECHNOLOGY OF SHAPED SURFACES USING CNC EQUIPMENT

Tairov I.E., Graduate Student, MSTU «STANKIN»;

Lesquin S.A., Chief Specialist, of Technical Department NF JSC «NPO «Device»,
e.mail: il.tairov@gmail.com.

This article describes the principles of the process of machining of details relating to the pressing tools with hardness over 45 HRC. At the heart of the creation of new processes is the use of multi-function CNC equipment, which meets the requirements for the system stiffness machine – tool – tool – item and is capable of turning parts, heat treated, the cutting tool with the plates of cubic boron nitride.

Key words: CNC, turning, press tools, hardening, hardness.