

МНОГООБЪЕКТНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ

В.В. Назимко, ДонНТУ, Украина

Обоснована архитектура мультиобъектной распределенной системы управления проектом, которая реализуется в динамичном окружении в условиях неопределенности. Система проиллюстрирована на примере проекта угледобычи.

Развитие отечественной угольной промышленности, которая является гарантом энергетической независимости Украины от газа, нефти и ядерного топлива, сдерживается по причине практического отсутствия проектно-ориентированного управления [1]. В настоящее время предпочтение отдается традиционному командному стилю управления угледобычей, что обусловлено рядом объективных и субъективных причин. Почти все запасы отечественного каменного угля залегают на средних и больших глубинах, поэтому угледобыча производится подземным способом. В условиях высокого уровня горного давления и газоносности угольных пластов, а также газонасыщенных песчаников подземная разработка связана с беспрецедентно высоким уровнем риска аварий и травматизма. Кроме того, работа очистных забоев задерживается из-за нестабильности рынка сбыта, непредвиденных остановок лав в многочисленных зонах малоамплитудных нарушений, низкой надежности забойного оборудования и других факторов [2].

Несмотря на такие сложные условия подземной разработки, угольная шахта должна постоянно давать плановое количество угля ежедневно, включая выходные дни и праздники, потому что полная остановка всей угольной шахты создает опасную ситуацию. Таким образом, работа угольной шахты в целом имеет явные признаки операционной деятельности. Вместе тем основной объем угледобычи (около 90-95%) поступает из очистных забоев, работам которых присущи типичные черты проекта. Так все без исключения проекты отработки выемочных столбов или полей являются уникальными, ограниченными во времени и преследуют одну цель, которая заключается в обеспечении стабильного выполнения плановой угледобычи при условии гарантированной безопасности. Для достижения поставленной цели требуется управлять качеством проекта и его расписанием, а это является типичными признаками техники управления проектом [1].

Большинство реальных проектов характеризуется сложным составом процессов и объектов, которые связаны иерархически и содержат элементы децентрализации функций управления. Для надлежащего поддержания качества проекта необходимо стремиться к оптимальному управлению этим проектом. Однако применение централизованных структур управления приводит к резкому снижению его качества из-за большой размерности самой задачи управления. Под размерностью задачи управления понимается число входных и выходных параметров проекта. Например на проект угледобычи оказывают влияние уровень спроса на энергетическом рынке или рынке металлургической продукции, степень нарушенности месторождения, надежность забойного оборудования, системы логистики, вентиляции, комплектация основных и вспомогательных профессий и другие факторы, общее число которых может превышать десятков [2]. Размерность задачи управления проектом увеличивается еще больше с учетом значительного числа выходных параметров, а также случайных факторов, которые порождают неопределенность процесса управления. Так требуемое качество управления, а также рентабельность или хотя бы безубыточность проекта угледобычи обеспечивается только при поддержании проектных значений таких выходных параметров как величина добычи, зольность рядового угля и его себестоимость при условии удовлетворения ограничений проекта по требованиям безопасности, которые для подземной добычи являются весьма жесткими.

Преимущества рационального распределения функций управления между центральными и локальными управляющими подсистемами давно доказаны на примере многих многообъектных систем управления в промышленности, экономике, а также при эксплуатации информационных систем. Необходимость рационального распределения функций управления проектами

обусловлена следующим. С одной стороны централизованная система управления проектом отличается простотой и сводится к планированию деятельности блоков нижнего уровня иерархии, а также распределению ресурсов управления. Однако простота системы централизованного управления компенсируется его сложностью из-за большой размерности задачи управления, то есть из-за большого количества процессов, объектов управления и их входных и выходных параметров. С другой стороны децентрализация управления проектом чревата невыполнением цели проекта из-за потери управляемости проектом в целом.

Под распределенностью системы управления проектом будем понимать как территориальную или пространственную распределенность, так и разграничение функций управления. Поскольку в условиях современной рыночной экономики основные проблемы теории управления связаны с наличием большого числа объектов и процессов, а также распределенностью управления и высокой размерностью, многообъектные распределенные системы управления (МРСУ) выделены в отдельный класс [3]. Многообъектное распределенное управление проектом (МРУП) существенно отличается от МРСУ тем, что при проектировании систем автоматического управления используются четкие критерии оптимальности и сигналы управления, описываемые математическими зависимостями. Управление же проекта осуществляется в основном словесными директивами, командами и распоряжениями. При этом подразумевается, что для достижения оптимального режима функционирования классической управляемой системы времени всегда достаточно.

Такой резерв времени отсутствует даже для МРСУ, не говоря уже о МРУП. Что касается подземной угледобычи, то она осуществляется в условиях хронической нехватки времени. В связи с этим приходится ограничиться проектированием таких гибких алгоритмов принятия решений при реализации МРСУ и тем более МРУП, которые бы обеспечили максимум эффективности принимаемых решений в рамках допустимого времени [4,5].

Ограничение на время, отводимое для принятия решения, является принципиальным отличием оперативного управления от классического. Отметим, что допустимый лимит времени для принятия решений в многообъектных распределенных технических системах и тем более проектах часто зависит от текущей ситуации и может сильно изменяться в процессе реализации проекта.

$$T_c = f(t, k_1, \dots, k_n) \leq T_0 \quad (1)$$

где T_c – текущий лимит времени, который доступен для принятия оперативного решения задачи управления; $f(t, k_1, \dots, k_n)$ – функция, зависящая от текущего времени t выполнения проекта, а также параметров проекта k_1, \dots, k_n ; T_0 – время, необходимое для принятия оптимального решения.

Теоретические основы построения гибких алгоритмов принятия оперативных решений отсутствуют даже для МРСУ [3]. Для оперативного МРУП (МРОУП) задача построения гибких алгоритмов оперативного принятия решений даже не ставилась, поскольку надо математически корректно формализовать такие понятия как управление сроками, стоимостью, качеством проекта, человеческими ресурсами, коммуникациями, рисками, поставками проекта [1].

Как указано в [3], ключевым моментом при решении подобной проблемы является понятие **сложности** алгоритма управления. При этом необходимо обосновать критерий сложности, выбрать его параметры, стратегию их изменения и установить средства вариации параметров сложности и эффективности алгоритмов. Проект по своей сути является самоорганизующейся системой в отличие от технических систем. Известно, что сложные физические и технические системы склонны создавать так называемые структуры под действием термодинамических потоков энергии, вещества и поля [6]. Эти структуры и являются следствием самоорганизации, например в жидкости возникают так называемые ячейки Бенара при пропускании через нее с определенной интенсивностью теплового потока [6]. При реализации проекта его состояние самоорганизации является естественным и обязательным условием для достижения поставленной перед ним цели. Более того, проект управляется (организуется) интеллектуальной системой, роль которой выполняет его команда, причем наиболее важными и вместе с тем специфическими, характерными только для проекта потоками являются информационные и

финансовые. На основании этого принимаем в качестве критерия сложности алгоритма управления минимизацию производства энтропии [7].

Структуру МРОУП будем строить на основе специальных ориентированных мультиграфов ярусно-параллельной формы (Ξ -структуры [8], рис. 1), а выбор решений для оперативного управления будем осуществлять с помощью оптимизации на этих графах. Сформулируем основные требования к проектированию МРОУП:

- По своему функциональному содержанию система МРОУП должна оставаться строго централизованной в смысле недопустимости отклонения от выполнения своей основной или глобальной цели. Вместе с тем она будет содержать автономные подсистемы локального управления, которые обеспечат его децентрализацию по информационным и управляющим каналам. В частности на верхних уровнях системы управления проектом будут сформированы специальные ограничения на распределяемые ресурсы и задания для исполнения нижними уровнями.

- Каждый уровень МРОУП будет иметь собственное математическое описание, являться уровнем принятия управляющих решений и иметь более высокий приоритет действий по отношению к нижним уровням.

- МРОУП будет строиться на принципе композиционного проектирования, использующего базу данных наборов испытанных и проверенных проектных решений.

- Проектирование системы МРОУП будет осуществляться на основе векторной оптимизации с учетом того, что ее подсистемы могут иметь вообще говоря отличающиеся друг от друга цели и характеризующиеся множеством противоречивых показателей эффективности. В связи с этим будет применяться оптимизация в определенной области или множестве значений, причем по каждому критерию будут назначаться допустимые пределы возможных значений.

- В реальных условиях МРОУП будет осуществляться в условиях неопределенности, когда величина критерия сложности алгоритмов управления и их параметров известна приближенно или определяется не точно. В связи с этим для учета факторов неопределенности будут использованы аппарат теории вероятности и нечетких множеств (фуззи логика [9]).

- МРОУП является выраженной динамической (нестационарной) системой, параметры которой существенно зависят от времени. Поэтому ее проектирование должно базироваться на применении современных систем моделирования, таких например, как MatLab, Simulink, PowerSim, Palisad и др.

На рис. 1 показана ярусно-параллельная структура МРОУП. Символами $0,1 - 0,m_0$ обозначены объекты управления; в проекте угледобычи такие объекты представлены финансовыми счетами предприятия, складами (материалов, оборудования, запасных частей), исполнителями проекта (командой), расписанием проекта, коммуникациями, проектными рисками.

Символы $1,1 - 1,m_1$ обозначают датчики информации для локальных регуляторов и наблюдающие устройства. Наиболее типичными датчиками информации являются датчики концентрации метана, температуры, уровней заполнения бункеров, положения комбайна в лаве, отпора секции механизированной крепи и т.д. Подобные датчики выдают как правило непрерывные сигналы, или дискретные высокой частотой. Роль наблюдающих устройств выполняют дежурные слесари, горные мастера, ИТР, инспекторы. Наблюдатели сообщают информацию в виде дискретных порций (отчетов, докладов, письменных и устных рапортов) несколько раз в смену а то и один раз в сутки. Таким образом очевидно, что МРОУП является в большей степени дискретной системой.

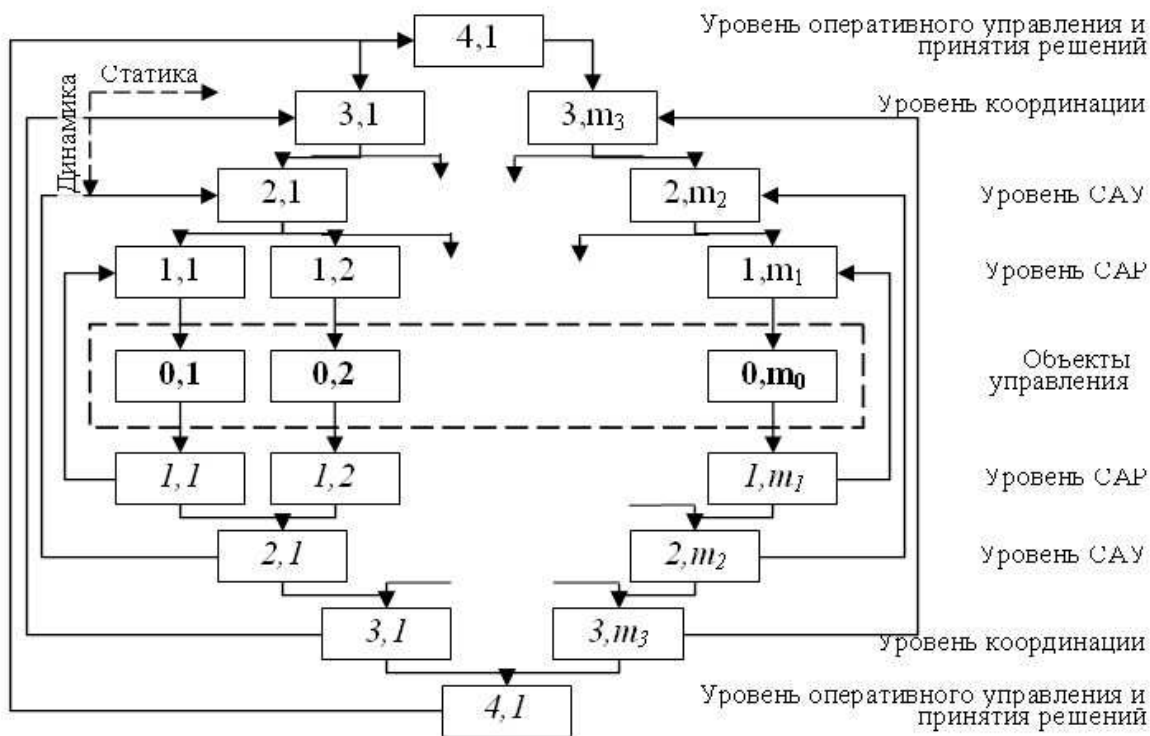


Рис. 1. E-структура иерархической системы управления проектом

Символами 1,1 – 1,m₁ указаны локальные регуляторы (без датчиков) и наблюдающие устройства. В проекте угледобычи лишь небольшое число локальных регуляторов соответствует аппаратным единицам, например системы защиты от короткого замыкания, или от превышения концентрации метана выше допустимого уровня. В большинстве случаев в роли локальных регуляторов выступают горные мастера, инспекторы и другие линейные руководители нижнего уровня. Указанные регуляторы реализуют выбранные законы управления. Например, если концентрация метана на выемочном участке превысила 1%, регулятор отключает напряжение. Законы управления, согласно которым горные мастера выдают управляющие распоряжения гораздо разнообразнее и имеют весьма большое число возможных реализаций, о чем будет сказано позже.

Символы 2,1 – 2,m₂ представляют собой локальные оптимизаторы, которые обеспечивают эффективность управляющих решений на локальном уровне. Функции таковых выполняют начальники участков, диспетчеры. Символы 2,1 – 2,m₂ отвечают за информационные подсистемы для локальных оптимизаторов, которые воспринимают информацию от датчиков и наблюдателей и перерабатывают ее в необходимую форму.

Символы 3,1 – 3,m₃ являются координирующими оптимизаторами, которые обеспечивают эффективность управляющих решений на высоком уровне, а 3,1 – 3,m₃ представляют собой информационные системы для координаторов. В роли координаторов выступают главный инженер, директор, главный экономист, бухгалтер, инвестор и другие управляющие проектом угледобычи высокого уровня.

На высшем уровне иерархии находится орган оперативного управления (4,1) и принятия решений, в роли которого выступают технические советы, совещания, планерки и другие коллективные совещания, которые проводят практически ежедневно, а в чрезвычайных ситуациях этот орган работает до момента стабилизации ситуации или ликвидации аварии. Оперативные управленческие решения принимаются на основе информационной подсистемы 4,1, которая накапливает всю информацию в том или ином виде. Указанная подсистема базируется прежде всего на электронной базе данных, а также бумажных текущих и архивных докумен-

тах, чертежах, схемах, образцах, актах испытаний и проверки. Аппаратно система строится на основе диспетчерских пультов, дисплейных устройств, вычислительной техники отдела АСУ, программного обеспечения, справочно-поисковых систем, средствах связи, Интернета и т.п.

Уже на этом этапе проектирования системы МРОУП видно, насколько сильно она отличается от МРСУ. Законы и правила принятия решений в МРОУП гораздо сложнее формализовать. Несомненным преимуществом Ξ -структур является то, что они органично решают комплекс задач проектирования систем управления: как построение динамических контуров управления с учетом времени протекания процессов внутри проекта, так и статический анализ на любом из уровней иерархии информационной или управляющей части системы.

Рассмотрим функциональные задачи для каждого звена классической структуры управления (централизованного) и Ξ -структуры. Как уже отмечено выше, управление проекта осуществляется в основном дискретными сигналами, число которых является в реальности конечным, несмотря на их большое разнообразие. Поэтому все указанные сигналы принадлежат к определенным конечным множествам. Так $U_{j,i} = \{u_{j,i}\}$ обозначает множество управляющих и координирующих сигналов звена вышестоящего уровня. Например множество оперативных управляющих сигналов, которые выдаются в результате превышения допустимой концентрации метана на исходящей из лавы состоит из таких элементов: «остановить лаву», «уменьшить нагрузку на очистной забой», «увеличить подачу свежего воздуха в лаву», «повысить уровень вакуума в дегазационной системе», «соорудить вентиляционные окна в охранном сооружении на вентиляционном штреке» и т.п. Обозначим множество сигналов обратной связи от подчиненных звеньев как $Y_{j,i} = \{y_{j,i}\}$. Таковыми могут быть загоревшаяся лампочка на пульте диспетчера, сигнализирующая остановку конвейера, доклад горного мастера об отключении напряжения питания очистного комбайна и т.д. Практически любое звено системы оперативного управления подвержено возмущениям, как правило случайным, множество которых обозначим через $H_{j,i} = \{h_{j,i}\}$. Типичными возмущениями являются остановки конвейера из-за порыва ленты, непредвиденное появление малоамплитудного нарушения в очистном или подготовительном забое, выход из строя секции механизированной крепи, поломка резца на шнеке очистного комбайна из-за твердого включения сидерита в угольном пласте. Множество выходных сигналов i -го звена, которые передаются подчиненным звеньям $(j-1)$ -го уровня обозначим как $X_{j,i} = \{x_{j,i}\}$.

В процессе функционирования системы оперативного управления проектом входные сигналы отображаются в виде выходных. Поэтому функционирование звеньев системы МРОУП будем пояснять с привлечением математического аппарата отображений, поскольку нельзя выразить преобразование вышеперечисленных множеств входных сигналов в множество выходных сигналов простой математической функцией. Таким образом функционирование звена централизованной системы управления можно выразить следующим отображением $S_{j,i}$:

$$S_{j,i}: U_{j,i} \times Y_{j,i} \times H_{j,i} \rightarrow X_{j,i} \quad (2)$$

Звено j,i с входящими и исходящими сигналами показано на рис. 2А. Индексами $j+1,\beta$ обозначены сигналы обратной связи $y_{j+1,\beta}$, которые передаются данным звеном к звену вышестоящего уровня. Эти сигналы не включены в отображение (2), поскольку они производятся другой функциональной задачей, заключающейся в информационной обработке сигналов. При управлении угледобычей часто функции определенных членов системы управления сводятся к простой ретрансляции сигналов, то есть $y_{j+1,\beta} = u_{j,i}$. Более того, в процессе ретрансляции сигналы могут умышленно или случайно искажаться. Так бывает при передаче объема добытого угля или проходки, которые завышаются вышестоящими управлениями в надежде, что к концу суток приписанный объем наверстают. Вместе с тем получаемая информация должна надлежащим образом преобразовываться для того, чтобы обеспечить эффективное качество управления проектом. Указанный недостаток централизованной структуры управления устранен в системе управления, базирующейся на Ξ -структуре (рис. 2В).

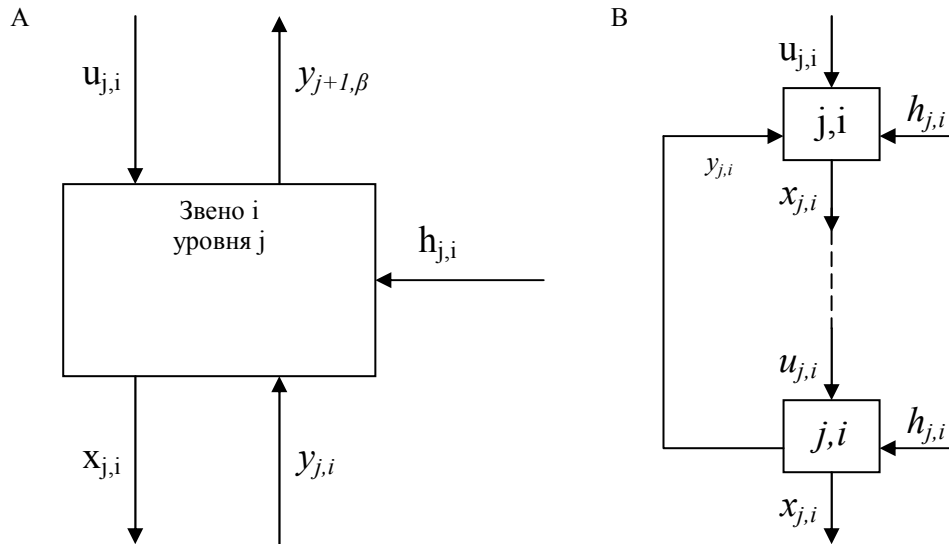


Рис. 2. Звено в централизованной структуре (А) и в даймонд-структуре (В)

В указанной структуре отображение для звена самого верхнего иерархического уровня принимает такой вид:

$$S_{n,1}: Y_{n,1} \times H_{n,1} \rightarrow X_{n,1} \quad (3)$$

Для управляемого объекта система отображений будет иметь такую запись:

$$S_{0,i}: X_{1,1} \times H_{0,i} \rightarrow X_{0,i} \quad (4)$$

Таким образом одно звено j,i в системе централизованного управления заменяется парой управляющего j,i и информационного j,i в системе Ξ -структуры. Точно так же одно отображение $S_{j,i}$ в системе централизованного управления заменим двумя отображениями в Ξ -структуре:

$$S_{j,i}: U_{j,i} \times Y_{j,i} \times H_{j,i} \rightarrow X_{j,i} \quad (5)$$

$$S_{j,i}: U_{j,i} \times H_{j,i} \rightarrow X_{j,i} \quad (6)$$

При этом множество возмущающих воздействий разделяется на два множества: $H_{j,i} = \{h_{j,i}\}$, которое отражает возмущения, влияющие на выработку управляющих сигналов $x_{j,i}$ и множество $H_{j,i} = \{h_{j,i}\}$, содержащее возмущения, оказывающие влияние на оценки достигнутых состояний или результатов $x_{j,i} = y_{j,i}$. Положительный эффект от такого разделения состоит в удобстве проектирования системы оперативного управления, поскольку отвечает физическому смыслу процессов управления.

Таким образом заменим отображение $S_{0,i}$ для верхнего уровня иерархии следующими двумя отображениями:

$$S_{j,i}: U_{n,1} \times Y_{n,i} \times H_{n,1} \rightarrow X_{n,1} \quad (7)$$

$$S_{j,i}: U_{n,i} \times H_{n,i} \rightarrow X_{n,i} \quad (8)$$

Отображение (7) определяет процесс принятия оперативных решений на основе информации о достигнутых результатах $u_{n,i}$, а также имеющихся ресурсах $u_{n,1} \in U_{n,1}$ и возмущениях $h_{n,1} \in H_{n,1}$, где знак \in обозначает «принадлежит к множеству». Отображение (8) моделирует функционирование системы подготовки и представления информации для принятия решений на верхнем уровне.

Как отмечалось выше, система МРОУП функционирует в условиях неопределенности, которая носит как параметрический, так и структурный характер. Проект угледобычи может быть описан нестационарной динамической стохастической моделью, которая функционирует в условиях неопределенности (рис. 3), что подтверждается анализом динамики работы длинного очистного забоя. Так добыча из лавы завит от времени t и при этом существуют выраженные переходные процессы, возникающие при пуске лавы в работу, ее остановке и

задержках работы из-за случайных причин. На рис. 3 переходные процессы, обусловленные пуском и остановкой лавы обозначены на фрагменте (а) интервалами 1 и 3.

Как стационарный процесс работа очистного забоя может характеризоваться только на отдельных этапах, на рис. 3 это видно на интервале от 40 суток до 270 суток. Но нестационарный характер добычи угля, который наиболее выражен на графике рис. 4, отмечается и в таких случаях

Стохастический характер угледобычи обусловлен случайными отклонениями добычи от ее планового (на рис. 3) или среднего (на рис. 4) уровней под влиянием случайных воздействий $H_{j,i}$. При этом гистограммы разброса величины угледобычи согласуются с нормальным законом распределения, а коэффициент вариации изменяется в пределах от 15% (рис. 3,б) до 45% (рис. 4,б) и более.

Очевидно, что в таких условиях алгоритмизация отображений, о которых говорилось выше, должна осуществляться на основе применения методов теории вероятности и математической статистики. В частности эффективным инструментом проектирования и анализа систем управления проектом зарекомендовало себя стохастическое моделирование [2,4]. Вместе с тем инструментария математической статистики недостаточно для того, чтобы формализовать на математическом уровне систему МРОУП. Дело в том, что в реальности оперативное управление проектами часто связано с манипулированием нечеткими понятиями. Особенно ярко это отражается в проектах угледобычи. Так состояние кровли горных выработок характеризуют как «устойчивое», «неустойчивое», «средней устойчивости», а ее обрушаемость как «легко обрушаемая», «среднеобрушаемая», «труднообрушаемая». Для оценки состояния выработки используют такие понятия, как «устойчивое», «неустойчивое». Более того, эти нечеткие (качественные) понятия заложены в отраслевые нормативные документы, утвержденные на самом высоком государственном уровне и предназначенными для обязательного использования для проектирования и эксплуатации угольных шахт.

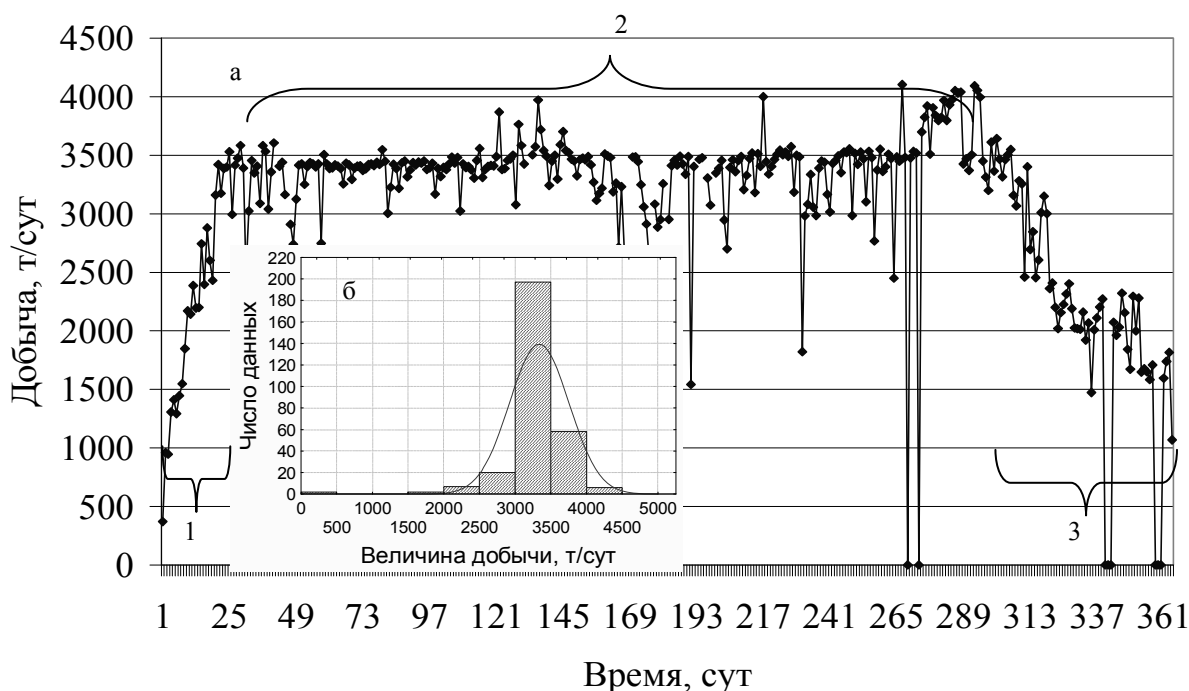


Рис. 3. Динамика изменения добычи (а) из 16 западной лавы и ее гистограмма (б)

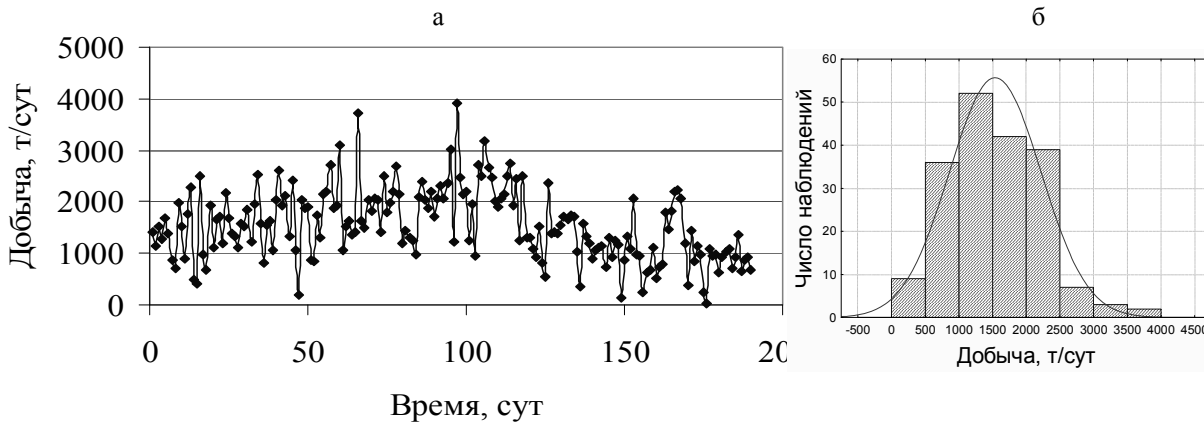


Рис.4. Диаграмма (а) и гистограмма (б) добычи из очистного забоя, работающего неустойчиво

Темпы подвигания очистных или подготовительных забоев описывают терминами «низкие», «средние», «высокие». Такие же понятия используют для характеристики уровня проектных рисков угледобычи или опасности подземной угледобычи.

В связи с этим для математической формализации отображений (5-8) в данной работе предложено использовать методы нечетких множеств [9]. Указанные методы идеально подходят для составления правил и законов оперативного управления проектом угледобычи.

На рис. 5 показано распределение функций принадлежности для критерия устойчивости

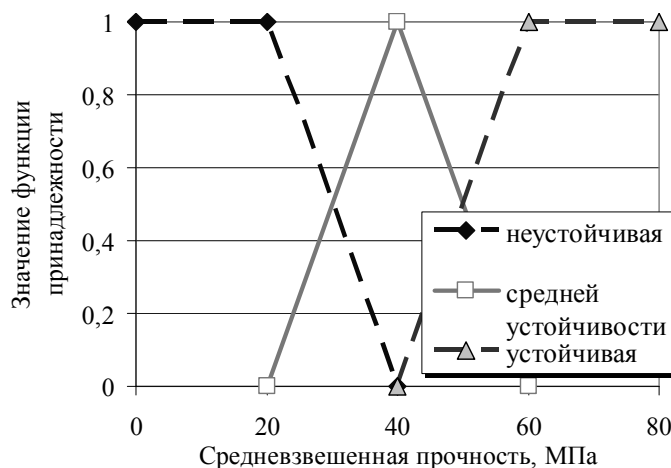


Рис. 5. Функция принадлежности для критерия «устойчивость кровли»

непосредственной кровли очистного забоя. Такие функции строятся на основании экспертных оценок, а также применения метода аналогов [1], который наиболее подходит для проектов угледобычи [2] и дает самые надежные результаты.

Принятие оперативных решений по управлению проектом угледобычи осуществляем на основе правил, которые формулируются экспертами или определяются методом аналогов. При получении сигнала от наблюдателя нижнего уровня системы оперативного управления (например участкового геолога) о том, что прочность непосредственной кровли действующего очистного забоя упала и находится в диапазоне 10-20МПа, система оперативного управле-

ния использует информационный ресурс, в котором заложены проверенные законы и правила реагирования на данный сигнал и определяет несколько альтернатив управляющего сигнала. Для демонстрации покажем два возможных варианта такого сигнала совместно с правилами, на основании которых эти сигналы генерируются.

1) «Если кровля неустойчивая и скорость подвигания лавы малая и механизированный комплекс изношен, тогда использовать передовое упрочнение кровли металлополимерными анкерами длиной не менее 2м»;

2) «Если кровля неустойчивая и скорость подвигания лавы средняя и механизированный комплекс находится в удовлетворительном состоянии, тогда увеличить скорость подвигания очистного забоя до среднего уровня»;

3)...

В данном примере система должна иметь еще набор функций принадлежности для определения величины скорости подвигания очистного забоя и степени изношенности механизированного комплекса. Чем больше таких правил будет использовано, тем больше выбор для подсистемы оптимизации сигнала управления. Разумеется при выборе альтернативных вариантов управляющего действия необходимо учитывать проектные ограничения, которые занесены в информационные базы данных.

Оптимизация управляющего сигнала в данном случае понимается как выбор наиболее эффективного решения по заранее заданному векторному критерию. Векторный критерий оптимальности или мера эффективности оперативного управления должен базироваться на энтропийном показателе [2,7] и иметь следующий вид:

$$J(\theta) = \sum (r(t) - y(t))^2 + \rho(u(t-1))^2 \quad (9)$$

где θ – вектор настраиваемых параметров проекта (например величина добычи, зольность рядового угля, его себестоимость); $r(t)$ – входной сигнал, в качестве которого используют фактическое текущее значение регулируемой величины; $y(t)$ – выход системы МРОУП (ожидаемое значение выходной величины); $\rho(u(t-1)) \geq 0$ – функция штрафа.

При этом выбор наиболее эффективного управляющего сигнала осуществляется с помощью оптимального нейросетевого регулятора, который находит решение, близкое к оптимальному в рамках допустимого времени и заданных проектных ограничений [10]. Одним из главных преимуществ регулятора, основанного на искусственной нейронной сети является его высокая степень помехозащищенности от воздействий случайных факторов, которые создают неопределенность в процессе управления.

Дальнейшими исследованиями планируется уточнить архитектуру оптимальных нейросетевых регуляторов и осуществить их промышленную проверку.

Список литературы

1. Руководство к своду знаний по управлению проектами. Четвертое издание (Руководство РМВОК®)/ Американский национальный стандарт ANSI/PMI 99-001-2004.- 388с.
2. Назимко В.В., Захарова Л.Н. Исследование чувствительности программы развития горных работ и ее рисков в условиях угольной шахты / Радіоелектронні і комп'ютерні системи (Інформаційні технології в управлінні підприємствами, програмами та проектами), 2012, №1(53).-С.157-164.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.5: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.-616 с.
4. Yao L.. A Novel Multi-object Trade-Off Mechanism Model Based on Process Management in Software Project//Proc. Third International Conference on Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Volume: 4. Pp: 659 – 663.
5. Плотников В.Н., Зверев В.Ю. Оптимизация оперативно-организационного управления. – М.: Машинотроение, 1980.-254 с.
6. Заславский Г. М., Сагдеев Р. З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. — М.: Наука, 1988. — 368 с.
7. Foundation of Synergetics II. Complex Patterns. — Berlin: Springer, 1995. — P. 210.
8. Brandstädt, A.; Le, V. B.; and Spinrad, J. P. Graph Classes: A Survey. Philadelphia, PA: SIAM, p. 18, 1987.
9. Cignoli, R. L. O.; D'Ottaviano, I. M. L.; and Mundici, D. Algebraic Foundations of Many-Valued Reasoning. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 2000.
10. Bertsekas, D.P., Tsitsiklis, J.N. (1996). Neuro-dynamic programming. Athena Scientific. p. 512.