

УДК 537.874

DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-39-54

В. И. Зензеров

ФГБОУ ВО "Донбасский государственный университет юстиции" (Минюста России)
283049, г. Донецк, ул. Лебединского, 9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСМИССИОННЫХ СЕТЯХ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

V. I. Zenzerov

Donbass State University of Justice (Ministry of Justice of the Russian Federation)
283049, Donetsk, Lebedinsky str., 9

MATHEMATICAL MODELING OF HYDROMECHANICAL PROCESSES IN TRANSMISSION NETWORKS OF MINING EQUIPMENT

В статье представлены математические модели процессов передачи давления через трансмиссии механизированных крепей горных выработок. Рассмотрены краевые задачи для систем дифференциальных уравнения и численные алгоритмы их реализации.

Ключевые слова: алгоритм, математическое моделирование, процесс, параметры, гидромеханика.

The article presents mathematical models of pressure transmission processes through transmissions of mechanized supports of mine workings. Boundary value problems for systems of differential equations and numerical algorithms for their implementation are considered.

Key words: algorithm, mathematical modeling, process, parameters, hydromechanics.

Введение

Одной из причин снижения технико-экономических показателей процесса очистной выемки наклонных пластов является потеря устойчивости и нарушение направленности передвижения механизированной крепи в пространственной системе «угольный пласт – механизированная крепь – комбайн – конвейер». Особенно актуален этот вопрос для шахт, дорабатывающих запасы шахтных полей, где применение высокопроизводительных комплексов нового поколения экономически нецелесообразно, а применение существующих комплексов очистного оборудования требует научного обоснования вводимых конструктивных изменений.

Механизированная крепь, как одна из машин очистного комплекса, в значительной мере определяет его надежность управления и безопасность работы. В свою очередь, работа механизированных крепей во многом определяется качеством гидросистем. Как показывает опыт разработки наклонных пластов, именно за счет совершенствования гидросистем удается повысить устойчивость и направленность передвижения секций механизированной крепи.

Актуальность. До настоящего времени не установлены аналитические зависимости, описывающие динамические процессы в гидросистеме механизированной крепи, в особенности при их работе на наклонных пластах, поэтому технические характеристики значительного числа имеющихся в работе выемочных машин не отвечают сформировавшимся горно-геологическим условиям. Это и определяет актуальность настоящей работы. В этой связи обоснование параметров системы устойчивости секций механизированных крепей и их гидросистемы при отработке наклонных угольных пластов в условиях повышения нагрузок на очистительной забой, является актуальной научной и прикладной задачей, имеющей отраслевое значение.

Цель работы - обоснование вычислительных алгоритмов для исследования процессов функционирования гидравлической трансмиссии механизированных креплений подземных выработок.

Основное содержание

Для обоснования направлений совершенствования гидросистем механизированных крепей, обеспечивающих направленное передвижение их секций с сохранением устойчивости на наклонном угольном пласте предлагается математическая модель гидросистемы крепи, суть которой сводится к следующему.

Система передвижения механизированной крепи представляет собой гидромеханическую систему. Так как гидросистема крепи является многосекционной, то работу всей системы можно рассматривать на примере выполнения операций технологического цикла одной секцией крепи. Работа гидропривода описывается двумя типами уравнений:

- дифференциальные уравнения движения элементов системы, составленные по принципу Даламбера;
- уравнения баланса расходов, учитывающие, что жидкость в гидросистеме неразрывна и однородна.

Гидросистема крепи состоит из N отдельных ветвей, моделирующих работу гидроцилиндров, и общих для всех гидроцилиндров участков напорной и сливной магистралей. На основании правила узлов и ветвей [1] составим математическую модель каждого из этих участков.

Движение рабочей жидкости от насоса до гидрораспределителя секции крепи описывается системой трех дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_H \frac{dP_H}{dt} &= q(P_H) - q_H \\ \frac{m_H}{(f_H)^2} \cdot \frac{dq_H}{dt} &= P_H - \xi_H(q_H)^2 - P_1 \\ C_\Sigma \frac{dP_1}{dt} &= q_H - \sum_{i=1}^N q_{1i} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где P_H - давление жидкости в напорной магистрали у насосной станции;

P_1 - давление жидкости на входе гидрораспределителя;

$q(P_H)$ - расходная характеристика насосной станции;

q_H - расход жидкости в напорной гидромагистрали;

q_{1i} - расход жидкости в рукаве высокого давления, соединяющего гидрораспределитель с напорной полостью i -го гидроцилиндра;

C_H - коэффициент упругости напорной гидромагистрали;

$$C_H = C_{mp} + C_{pвд} + C_a, \quad (2)$$

C_{mp} - коэффициент упругости металлического трубопровода;

$C_{pвд}$ - коэффициент упругости рукавов высокого давления;

C_a - коэффициент упругости гидроаккумуляторов;

C_Σ - суммарный коэффициент упругости рукавов высокого давления, соединяющих гидрораспределитель с напорными полостями гидроцилиндров;

ξ_H - коэффициент гидравлического сопротивления напорной гидромагистрали;

m_H - масса жидкости в напорной гидромагистрали;

f_H - площадь сечения напорной гидромагистрали;

N - количество одновременно работающих гидроцилиндров.

Математическая модель работы каждого гидроцилиндра состоит из системы шести дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_{1i}}{(f_{PВД i}^H)^2} \cdot \frac{dq_{1i}}{dt} &= P_1 - \xi_{1i}(q_{1i})^2 - P_{2i} \\ C_{2i} \frac{dP_{2i}}{dt} &= q_{1i} - q_{2i} \\ \frac{m_{2i}}{(F_{1i})^2} \cdot \frac{dq_{2i}}{dt} &= P_{2i} - \beta_i R_i(X_{2i}, \dot{X}_{2i}) - \alpha_i P_{3i} \\ \frac{dX_{2i}}{dt} &= \beta_i q_{2i} \\ C_{3i} \frac{dP_{3i}}{dt} &= \alpha_i q_{2i} - q_{4i} \\ \frac{m_{3i}}{(f_{PВД i}^C)^2} \cdot \frac{dq_{4i}}{dt} &= P_{3i} - \xi_{2i}(q_{4i})^2 - P_C \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Где P_{2i} - давление жидкости в напорной полости i -го гидроцилиндра;

P_{3i} - давление жидкости в сливной полости i -го гидроцилиндра;

P_C - давление жидкости в сливной гидромагистрали на выходе из гидрораспределителя;

q_{2i} - расход жидкости в напорную полость i -го гидроцилиндра;

q_{4i} - расход жидкости в рукаве высокого давления, соединяющего сливную полость i -го гидроцилиндра с гидрораспределителем;

C_{2i}, C_{3i} - соответственно коэффициенты упругости напорной и сливной полостей i -го гидроцилиндра;

ξ_{1i}, ξ_{2i} - соответственно коэффициенты гидравлических сопротивлений каналов подключения i -го гидроцилиндра к напорной и сливной гидромагистралям:

$$\xi_{1i} = \xi_{byci}^H + \xi_{PBDi}^H + \xi_{ГЦi}^H, \quad (4)$$

$$\xi_{2i} = \xi_{byci}^c + \xi_{PBDi}^c + \xi_{ГЦi}^c, \quad (5)$$

$\xi_{byci}^H, \xi_{byci}^c$ - коэффициенты гидравлического сопротивления напорного и сливного каналов блока управления;

$\xi_{PBDi}^H, \xi_{PBDi}^c$ - коэффициенты гидравлического сопротивления рукавов, соединяющих напорную и сливную полости i -го гидроцилиндра к гидрораспределителю;

$\xi_{ГЦi}^H, \xi_{ГЦi}^c$ - коэффициенты гидравлического сопротивления входа в напорную и выхода из сливной полостей i -го гидроцилиндра;

m_{1i}, m_{3i} - соответственно массы жидкости в рукавах высокого давления, соединяющих напорную и сливную полости i -го гидроцилиндра с гидрораспределителем;

m_{2i} - масса, перемещаемая i -м гидроцилиндром:

$$m_{2i} = m_{ГЦi}^H + m_{ВНi} + m_{ГЦi}^c, \quad (6)$$

$m_{ГЦi}^H, m_{ГЦi}^c$ - массы жидкости в напорной и сливной полостях i -го гидроцилиндра (сумма этих масс постоянна при перемещении поршня гидроцилиндра);

$m_{ВНi}$ - внешняя масса передвигаемого оборудования;

X_{2i} - величина перемещения поршня i -го гидроцилиндра;

f_{PBDi}^H, f_{PBDi}^c - площади сечений рукавов, соединяющих напорную и сливную полости i -го гидроцилиндра с гидрораспределителем;

$$\alpha_i = \frac{F_{1i}}{F_{2i}}; \quad \beta_i = \frac{1}{F_{1i}}, \quad (7)$$

F_{1i}, F_{2i} - площади напорной и сливной полостей i -го гидроцилиндра;

α_i - коэффициент мультипликации i -го гидроцилиндра;

$R_i(X_{2i}, \dot{X}_{2i})$ - сопротивление перемещению i -го гидроцилиндра, зависящее от самой величины перемещения X_{2i} и от скорости перемещения \dot{X}_{2i} .

Течение жидкости по сливной гидромагистрали от секции крепи в бак гидронасоса описывается системой двух дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} C_c \frac{dP_c}{dt} &= \sum_{i=1}^N q_{4i} - q_c \\ \frac{m_c}{(f_c)^2} \cdot \frac{dq_c}{dt} &= P_c - \xi_c (q_c)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где q_c - расход жидкости в сливной гидромагистрали;

C_c, ξ_c - соответственно коэффициенты упругости и гидравлического сопротивления сливной гидромагистрали;

m_c - масса жидкости в сливной гидромагистрали;

f_c - площадь сечения сливной гидромагистрали.

Системы дифференциальных уравнений (1), (3) и (8) образуют математическую модель гидросистемы механизированной крепи. Количество уравнений n математической модели зависит от количества одновременно работающих N гидроцилиндров при моделировании технологических операций разгрузки, передвижки, распора секции крепи и выдвижки конвейера на забой и определяется по формуле:

$$n = 6N + 5, \quad (9)$$

где n - количество дифференциальных уравнений первого порядка математической модели.

В математическую модель гидросистемы механизированной крепи входят семь групп параметров:

- давление жидкости в характерных точках гидросистемы;
- расход жидкости на отдельных участках гидросистемы;
- коэффициенты упругости элементов гидросистемы;
- коэффициенты гидравлических сопротивлений участков гидросистемы;
- значения массы жидкости, перемещаемой на отдельных участках гидросистемы;
- площади поперечных сечений элементов гидросистемы;
- сопротивления перемещению гидроцилиндров.

Первые две группы параметров образуют вектор начальных значений, а в процессе моделирования - результирующий вектор зависимых переменных. Коэффициенты упругости определяют расход на деформацию элементов гидросистемы и сжимаемость жидкости, заполняющей ее под давлением. Для металлических труб коэффициент упругости рассчитывается по формуле [5]:

$$C_{TP} = \pi \left(\frac{1-x}{8} * \frac{d^3 l_{TP}}{E_{TP} S_{TP}} + \frac{d^2 l_{TP}}{4E_{жс}} \right), \quad (10)$$

где d, l_{TP}, S_{TP} - соответственно диаметр, длина и толщина стенок трубы;

$E_{TP}, E_{жс}$ - объемные модули упругости материала трубы и рабочей жидкости;

x - коэффициент Пуассона.

Анализ формулы (10) показывает, что коэффициент упругости зависит от внутреннего объема трубы. Так как гидроцилиндры конструктивно выполнены из труб, то формулой (10) можно пользоваться для определения коэффициентов упругости полостей гидроцилиндров. Однако, при перемещении поршня гидроцилиндра объем напорной и сливной полостей изменяется. Следовательно, в процессе моделирования величины коэффициентов упругости полостей гидроцилиндров будут изменяться в зависимости от величины перемещения поршня X_{2i} и их необходимо рассчитывать по формулам:

– для напорной полости i -го гидроцилиндра:

$$C_{2i} = (H_{oi} + X_{2i}) \left(\frac{1-\chi}{2} \cdot \frac{F_{1i} D_i}{E_{TP} S_{\Pi i}^H} + \frac{F_{1i}}{E_{Ж}} \right), \quad (11)$$

где H_{oi} - начальное расстояние от торца до поршня i -го гидроцилиндра;

$D_i, S_{\Pi i}^H$ - диаметр и толщина стенок напорной полости i -го гидроцилиндра.

$$C_{3i} = (H_{max i} - X_{2i}) \left(\frac{1-\chi}{2} \cdot \frac{F_{2i} d_i}{E_{TP} S_{\Pi i}^C} + \frac{F_{2i}}{E_{Ж}} \right), \quad (12)$$

– для сливной полости i -го гидроцилиндра:

где $H_{max i}$ - величина хода поршня i -го гидроцилиндра;

$d_i, S_{\Pi i}^C$ - диаметр и толщина стенок сливной полости i -го гидроцилиндра.

Коэффициент упругости для рукавов высокого давления рассчитывается по формуле [50]:

$$C_{РВД} = \frac{V_{РВД}}{E_{np}}, \quad (13)$$

где E_{np} – приведенный модуль упругости, учитывающий сжимаемость жидкости и деформацию рукавов;

$V_{РВД}$ – объем рукавов высокого давления.

В качестве демпфирующего устройства на насосной станции устанавливаются гидроаккумуляторы. Коэффициент упругости гидроаккумулятора равен:

$$C_a = m_a \frac{Q_a P_a^{\frac{1}{1+\nu}}}{\nu P_H^{\frac{1}{\nu}}}, \quad (14)$$

где m_a – число аккумуляторов, установленных в гидросистеме;

Q_a – объем газовой камеры при давлении зарядки;

P_a – давление зарядки гидроаккумулятора;

ν – показатель политропы ($\nu = 1,3 \div 1,4$).

Все элементы и узлы гидросистемы, по которым протекает жидкость, характеризуются гидравлическими сопротивлениями как местными (в заделках и ответвлениях, в сужениях, расширениях и поворотах потока), так и линейными, зависящими от протяженности каналов. Экспериментально доказано существование двух режимов установившегося движения жидкости. При малых скоростях жидкости ее частицы движутся параллельно друг другу и оси канала, не перемешиваясь. Такой режим назван ламинарным. При больших скоростях движения жидкости ее частицы движутся в направлении потока по хаотичной траектории и перемешиваются между собой. Такой режим течения жидкости назван турбулентным. Для расчетов гидросистем механизированных крепей установлено, что, на основании определения числа Рейнольдса и сравнения его с критическим, режим течения жидкости является турбулентным. Так как поток жидкости проходит по трубопроводам и каналам разного сечения, то при определении коэффициента гидравлического сопротивления участка гидросистемы, все коэффициенты различных местных сопротивлений приводятся к выбранной площади поперечного сечения участка по формуле:

$$\xi_i = \xi'_i \frac{\rho}{2f_i^2}, \quad (15)$$

где ξ_i - безразмерный коэффициент местного гидравлического сопротивления, который определяется на основании экспериментальных и справочных данных для конкретного характера местного сопротивления;

ρ - плотность рабочей жидкости;

f_i - площадь поперечного сечения, по которому рассчитывается коэффициент гидравлического сопротивления.

Линейные потери давления в канале определяются по справочным данным [5], [26], [44], либо аналитически по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta p_n = \lambda \frac{L_K}{d_K} * \frac{\rho}{2 f_K^2} q^2, \tag{16}$$

где λ - коэффициент сопротивления;

L_K, d_K, f_K - соответственно длина, диаметр и площадь поперечного сечения канала;

q - расход жидкости в канале.

Моделирование работы гидросистемы секций механизированной крепи заключается в моделировании совместной работы N гидроцилиндров, количество которых зависит как от конструкции и технологии работы комплекса, так и от моделируемой технологической операции.

Предположим, что мы моделируем работу секции крепи, имеющей $n_{гс}$ гидростоек, $n_{конс.}$ гидроцилиндров управляемой консоли, $n_{гд}$ гидродомкратов для передвижения секции и $n_{гп}$ гидропатронов системы устойчивости. Тогда общее количество гидроцилиндров N равно:

$$N = n_{гс} + n_{конс.} + n_{гд} + n_{гп}. \tag{17}$$

Присвоим гидроцилиндрам следующие номера: с 1 по n_1 - гидростойки; с n_1+1 по n_2 - гидроцилиндры консолей; с n_2+1 по n_3 - гидродомкраты и с n_3+1 по N - гидропатроны.

Получим выражение для определения сопротивления перемещению гидродомкратов секции крепи:

$$R_j = \frac{1}{n_{\ddot{a}\ddot{a}}} \left\{ \left[G \cos \alpha + \sum_{i=n_2+1}^{n_3} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) \eta * \frac{\sin \beta}{\cos(\beta_{\ddot{o}} - \gamma_{\ddot{A}})} \right] f_n + \left[\sum_{i=1}^{n_1} (P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} [(P_{2i} F_{1i} - P_{3i} F_{2i}) K_{\ddot{m}\ddot{m}i}] - G_{\ddot{a}\ddot{a}\ddot{o}\ddot{o}} \right] (f_n + f_{KP}) + \left[G_{кон} (\sin \alpha - \cos \alpha f_n) * \frac{l_Q(l_A + l_B)}{l_A^2 + l_B^2} (1 + \frac{L_R}{L_b}) - 0.5 P_p \frac{l_b}{L_b} + \sum_{i=n_3+1}^N P_{2i} F_{1i} K_{ci} \right] * f_{TP} \right\} + R_{\ddot{o}\ddot{i}\ddot{e}}. \tag{18}$$

где $K_{конci}$ - коэффициент связи усилия в гидроцилиндре и реакции управляемой консоли на кровлю пласта;

$R_{унл.}$ - сила трения в уплотнениях поршня и штока;

j - номер гидродомкрата передвижки: $j=n_2+1 \div n_3$;

$G_{верх.}$ - вес верхняка и других перемещаемых в процессе разгрузки элементов конструкции секции крепи.

Сопротивление перемещению гидростоек при их разгрузке равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{унл.} - (G_{верх.} - R_{KP} - R_n) \frac{1}{n_{гс}}, \tag{19}$$

где $R_{кр}R_n$ – реакции кровли и почвы, действующие до момента отрыва верхняка от кровли.

При распоре гидростоек сопротивление перемещению равно:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{упл.} + G_{верх.} \quad (20)$$

После контакта верхняка с кровлей происходит повышение усилия поддержания кровли до усилия начального распора. Тогда:

$$R_{j=1 \div n_1} = R_{упл.} + G_{верх.} + R_{КР} + R_n \quad 1)$$

Фронтальное выдвигание конвейера включает в себя большое количество одновременно работающих гидродомкратов. Сопротивление перемещению одного гидродомкрата равно:

$$R_{j=n_2+1 \div n_3} = R_{\delta\ddot{e}} + G_{\hat{e}\ddot{u}} \cdot \cos \alpha f_n \quad (23)$$

Полученная математическая модель (1), (3) и (8) позволяет решать задачи как прямых гидравлических расчетов, при которых известно потокораспределение в системе и требуется определить рациональные значения конструктивных параметров гидравлических элементов, так и обратных – известны конструктивные и технологические параметры механизированной крепи, а необходимо промоделировать динамические процессы в гидросистеме и определить время выполнения различных операций. Исследование статических и динамических характеристик отдельных гидроэлементов и гидросистем в целом позволит выявить факторы, оказывающие решающее влияние на режим работы крепи, и обосновать допущения, которые могут быть приняты в инженерных расчетах. Результатом исследований являются также модели гидроэлементов механизированной крепи, которые в различных сочетаниях и перестановках используются для расчета на ПЭВМ вариантов гидросистем крепей и станут математической базой для разработки систем автоматизированного проектирования (САПР) и систем управления гидроприводом механизированных крепей автоматизированных комплексов, обеспечивающих высокую производительность и эффективное поддержание боковых пород в различных горногеологических условиях эксплуатации.

Результаты моделирования

Специфичность гидропривода механизированных крепей определяет особенности и сложности математического описания процессов, протекающих в его гидроэлементах. Системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (1), (3) и (8) образуют математическую модель гидросистемы механизированных крепей. На основании формулы (9) определяется суммарное количество уравнений, входящих в эти системы, которое зависит от числа моделируемых одновременно работающих гидроцилиндров. Для примера, при расчете гидросистемы четырехстоечной секции крепи типа МТ во время выполнения операции передвижения с одновременной разгрузкой необходимо моделирование одновременной работы шести гидроцилиндров, что соответствует решению системы сорока одного дифференциального нелинейного уравнения. Число уравнений может изменяться в процессе моделирования в результате разного времени начала и окончания выполнения работы различными гидроцилиндрами.

Перечисленные выше особенности расчетов показывают необходимость разработки алгоритмов и программ на ПЭВМ, позволяющих подучить необходимый объем данных о динамике работы проектируемой гидросистемы, что дает возможность автоматизировать процесс проектирования и сократить объем и трудоемкость экспериментальных и доводочных работ по крепи в целом.

На рис. 1 приведен предложенный укрупненный алгоритм математического моделирования динамики работы гидросистем механизированных крепей.

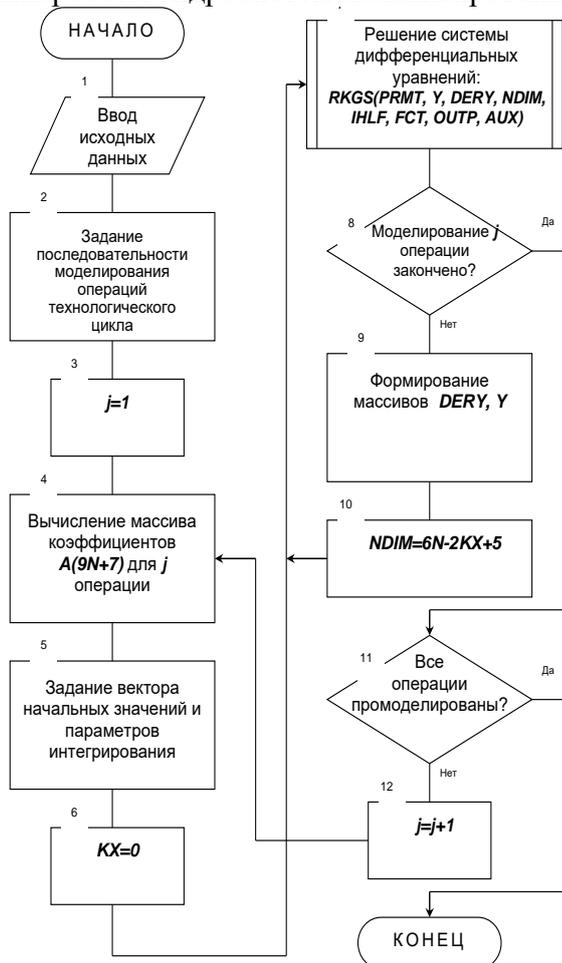


Рисунок 1 - Блок-схема алгоритма моделирования гидросистемы крепей

Алгоритм позволяет моделировать как выполнение отдельной технологической операции, так и последовательности операций, заданных пользователем. Так как работа гидросистемы сводится к попеременной подаче давления либо в шокуюю, либо в поршневую полости определенного количества гидроцилиндров, то подготовка моделирования сводится к заданию исходных данных (конструктивных параметров гидроцилиндров и элементов гидросистемы, коэффициентов упругости и гидравлических сопротивлений участков гидросистемы и сопротивления перемещению каждого гидроцилиндра) и заданию последовательности подключения полостей гидроцилиндров к напорной и сливной гидромагистралям (блоки 1 и 2 рис. 1). Здесь же вводится и количество одновременно работающих гидроцилиндров при выполнении j-й операции. В блоках 3 и 12 определяется номер текущей операции, в зависимости от которого в блоке 4 вычисляются коэффициенты при производных от расходов жидкости и давлений в гидросистеме для систем дифференциальных уравнений (1), (3) и (8) и формируется массив коэффициентов A_{ij} . До начала решения

системы дифференциальных уравнений задается вектор начальных значений и параметров интегрирования (блок 5) и обнуляется счетчик количества закончивших работу гидроцилиндров в j -й операции (блок 6).

Блок 8 проверяет окончание моделирования j -й операции. В случае если не все гидроцилиндры закончили работу (величина перемещения какого-либо гидроцилиндра меньше заданной), то моделирование операции продолжается после восстановления входного вектора весовых коэффициентов погрешности и вектора начальных условий, исключая параметры, относящиеся к закончившим работу гидроцилиндрам (блок 9), а также после вычисления нового количества дифференциальных уравнений, оставшихся в системе (блок 10).

Моделирование прекращается, если расчеты выполнены для всей заданной последовательности операций технологического цикла (блок 11).

В качестве контрольного примера было выполнено моделирование операции перемещения секции крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек (параллельная работа трех гидроцилиндров).

Исходные данные:

- количество гидроцилиндров – 3;
- давление жидкости в напорной гидромагистрале – 20 МПа;
- величина перемещения секции крепи – 0,68 м;
- максимальный расход рабочей жидкости – $1,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- площади напорной и сливной полостей гидроцилиндров:
 - гидростойки: напорная – $0,13 \text{ м}^2$; сливная – $0,05 \text{ м}^2$;
 - гидродомкрат: напорная – $0,08 \text{ м}^2$; сливная – $0,03 \text{ м}^2$.

Результаты моделирования перемещения секции крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования перемещения секции крепи 1М88Н с одновременной разгрузкой гидростоек

Значение времени, с	Перемещение ГС1, ГС2, м	Перемещение секции крепи, м	Давление в напорной гидромагистрале, МПа	Расход жидкости в напорной гидромагистрале, $\times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	Давление в поршневой полости гидростоек, Мпа	Давление в штоковой полости гидростоек, Мпа	Давление в штоковой полости гидродомкрата, Мпа	Давление в поршневой полости гидродомкрата, Мпа
0	0,000	0,00	20,0	0	20,0	0,0	0,0	0,0
1	0,001	0,00	19,5	0,85	3,2	19,4	18,6	7,2
2	0,005	0,00	17,3	0,21	3,0	17,1	17,2	2,5
3	0,010	0,05	17,1	0,32	3,1	16,9	17,1	2,9
4	0,012	0,10	16,5	0,37	3,1	16,4	16,5	3,1
5	0,014	0,17	16,8	0,41	3,5	16,5	16,7	3,4
6	0,017	0,26	17,2	0,45	3,7	16,8	17,1	3,8
7	0,020	0,39	17,9	0,48	3,9	17,1	17,7	4,2
8	0,021	0,49	18,1	0,48	4,1	17,3	18,0	4,9
9	0,025	0,55	18,1	0,48	4,5	17,6	18,1	5,0
10	0,025	0,62	18,2	0,48	4,5	18,1	18,1	5,0
11	0,025	0,68	18,5	0,01	4,5	18,2	18,4	5,1

Графики изменения параметров секции крепи 1М88Н, построенные по результатам моделирования, приведены на рис. (2) –(6).

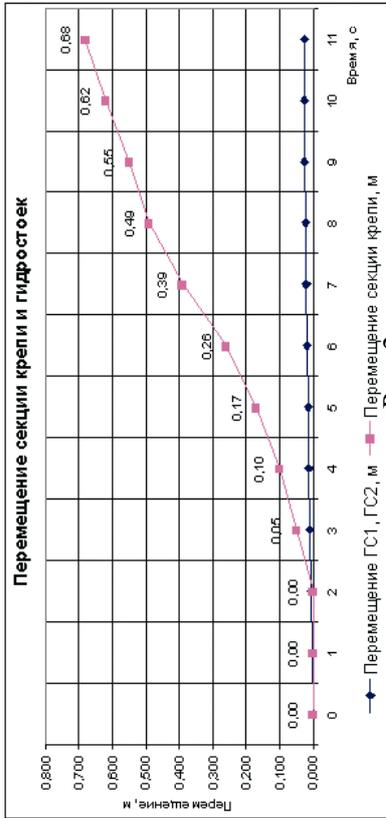
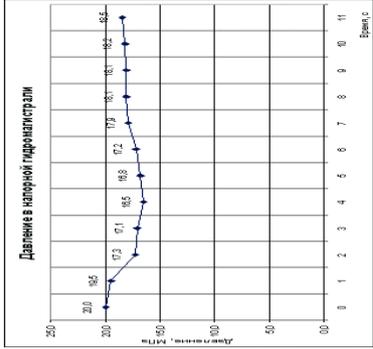


Рис. 2

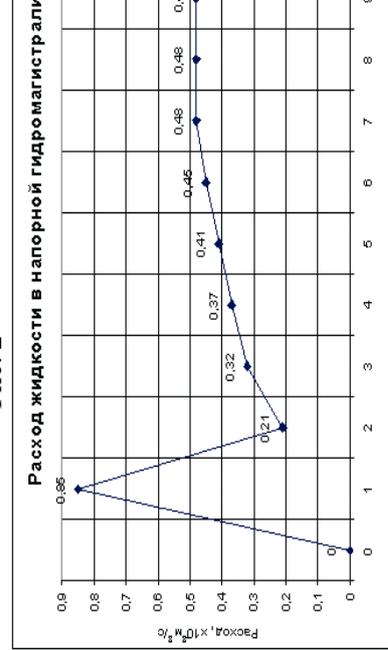


Рис. 3

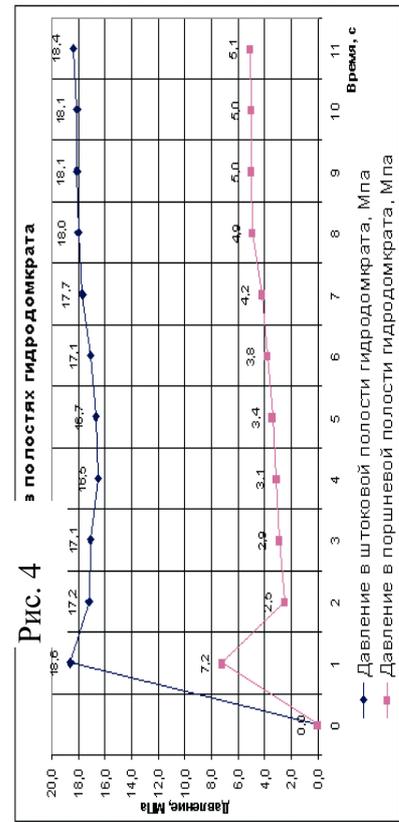


Рис. 4

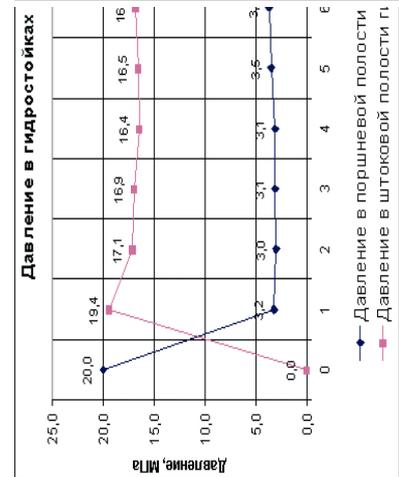


Рис. 5

Рис. 6

Выводы

Разработана математическая модель гидросистемы секций механизированных крепей, применяемая для исследования динамических процессов в гидроприводе и его быстрodeйствия при совместной работе N гидроцилиндров.

Получены математические выражения для определения сопротивления R_j перемещению гидроцилиндров секции крепи при выполнении операций технологического цикла.

Разработан алгоритм моделирования динамики работы гидросистемы секции механизированных крепей, позволяющий задавать последовательность моделирования операций технологического цикла, на каждой операции имитировать совместную работу определенного количества взаимосвязанных гидроцилиндров, а также автоматически осуществлять пошаговый контроль величины перемещения каждого из них.

Математическая модель, предложенные автором алгоритмы и результаты математического моделирования динамики гидросистемы секции механизированной крепи при выполнении операций технологического цикла положены в основу создания системы автоматизированного проектирования гидросистем механизированных крепей (САПГМК).

Список литературы

1. Зензеров В.И. Исследование динамических процессов в гидросистеме механизированной крепи. Материалы международной конференции „Форум горняков-2006”. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – с.73-80с.
2. Технология подземной разработки и процесси горных работ в очистных забоях крутых и крутонаклонных угольных пластов: учеб. пособие для вузов / Под ред. С.С.Гребенкина // Гребенкин С.С., Булат А.Ф., Бондаренко В.И., Волошин О.И., Доронин О.Д., Ильин А.И., Керкез С.Д., Касьян Н.Н., Перепелица В.Г., Пашенко В.Л., Сапицкий К.Ф., Теросипов В.М., Ширин Л.Н., Ярембаш И.Ф.. – Донецк: „Регион”, 2000. -506с.
3. Гуляев К.В., Гуляев В.Г. Особенности кинематических и эксплуатационных характеристик щитовой механизированной крепи КМ500. – Известия Донецкого горного института, вып. 1. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – с.128-134.
4. Гребенкин С.С., Стеблин В.В., Шипунова И.В., Шлюпкин Н.Н. Создание новой техники для механизации очистных работ при разработке крутых угольных пластов. - Известия Донецкого горного института, вып.2. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – с.73-78.
5. Горбатов П.А., Петрушкин Г.В., Лысенко Н.М. Горные машины и оборудование: Учебное пособие для вузов. – В 2-х томах. –Донецк: РВД ДонНТУ, 2003. – т.1, 295с. – т.2, 201с.
6. Горные машины для подземной добычи угля: Уч. пособие для вузов, изд. 2-е, перераб. и доп./ Под общ. ред. П.А. Горбатова// Горбатов П.А., Петрушкин Г.В., Лысенко Н.М., Павленко С.В., Косарев В.В. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669с.
7. Зензеров В. И. Математическое моделирование динамических процессов в гидросистеме механизированной крепи / В. Н. Павлыш, В. И. Зензеров. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – С. 87-91. – (Изв. Донецкого горного ин-та; вып. 1).
8. Зензеров В. И. Исследование параметров гидросистемы механизированной крепи методом математического моделирования / В. И. Зензеров, В. Н. Павлыш. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – С. 130-138. – (Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. научн. тр; вып. 32).
9. Горные машины и комплексы для подземной добычи угля: Монография / [С.С. Гребенкин, А.В. Агафонов, В.В. Косарев и др.]; под общ. ред. С.С. Гребенкина. – Донецк: ВИК, 2006. – 353с.
10. Математическое моделирование и расчет параметров систем угольных шахт и забойного оборудования: Монография / [С.С. Гребенкин, В.Н. Павлыш, А.В. Агафонов, В.В. Косарев, В.В. Радченко, В.Д. Рябичев, В.П. Глебов, В.И. Зензеров, А.И. Егурнов]. – Донецк: ВИК, 2007. – 263 с.

11. Математические модели и методы расчета параметров процессов подземных горных работ и добычного оборудования: Монография [С.С. Гребенкин, В.Д. Рябичев, В.Н. Павлыш, П.Н. Должиков, В.И. Зензеров]. – Донецк: ВИК, 2007. – 385 с.
12. В. Н. Павлыш, Е. В. Перинская. Математическое моделирование процессов функционирования специализированных аппаратов конвективного типа / В. Н. Павлыш, Е. В. Перинская. // Проблемы искусственного интеллекта – Донецк 2015 0(1) – С. 89-101.
13. Е. В. Перинская. Применение метода вычислительного эксперимента к исследованию параметров конвективных процессов // Проблемы искусственного интеллекта – Донецк 2021 3(22) – С. 57-65.
14. В. Н. Павлыш, С. А. Зори, Е. И. Бурлаева. Задача классификации информации при формировании баз данных в компьютерных обучающих системах процессов // Проблемы искусственного интеллекта – Донецк 2018 4(11) – С. 71-81.
15. В. Н. Павлыш, С. В. Сторожев. Математическое моделирование в задачах устойчивости на основе теории нечетко-множественного анализа. // Проблемы искусственного интеллекта – Донецк 2021 2(21) – С. 44-51.

References

1. Zenzerov V.I. The study of dynamic processes in the hydraulic system of mechanized support. Materials of the international conference "Forum of Miners-2006". – Dnepropetrovsk: NSU, 2006. – pp.73-80s..
2. Technology of underground mining and mining processes in the bottom faces of steep and steeply inclined coal seams: textbook. handbook for universities / Edited by S.S.Grebenkin // Grebenkin S.S., Bulat A.F., Bondarenko V.I., Voloshin O.I., Doronin O.D., Ilyin A.I., Kerkez S.D., Kasyan N.N., Perepelitsa V.G., Pashchenko V.L., Sapitsky K.F., Terosipov V.M., Shirin L.N., Yarembash I.F.. – Donetsk: "Region", 2000. -506s.
3. Gulyaev K.V., Gulyaev V.G. Features of kinematic and operational characteristics of the KM500 shield mechanized support. – Izvestiya Donetsk Mining Institute, issue 1. – Donetsk: DonNTU, 2005. – pp.128-134.
4. Grebenkin S.S., Steblin V.V., Shipunova I.V., Shlyapkin N.N. Creation of new equipment for mechanization of treatment works in the development of steep coal seams. - Proceedings of the Donetsk Mining Institute, issue 2. – Donetsk: DonNTU, 2005. – pp.73-78.
5. Gorbatov P.A., Petrushkin G.V., Lysenko N.M. Mining machines and equipment: A textbook for universities. – In 2 volumes. –Donetsk: RVD DonNTU, 2003. – vol.1, 295s. – vol.2, 201s.
6. Mining machines for underground coal mining: Textbook for universities, 2nd edition, reprint. and additional / Under the general editorship of P.A. Gorbatov// Gorbatov P.A., Petrushkin G.V., Lysenko N.M., Pavlenko S.V., Kosarev V.V. – Donetsk: Nord Computer, 2006. – 669s.
7. Zenzerov V. I. Mathematical modeling of dynamic processes in a hydraulic system of mechanized support / V. N. Pavlysh, V. I. Zenzerov. – Donetsk: DonNTU, 2006. – pp. 87-91. – (Izv. Donetsk Mining Institute; issue 1).
8. Zenzerov V. I. Investigation of parameters of the hydraulic system of mechanized support by the method of mathematical modeling / V. I. Zenzerov, V. N. Pavlysh. – Donetsk: DonNTU, 2006. – pp. 130-138. – (Progressive technologies and systems of mechanical engineering. International Scientific Collection. tr; issue 32).
9. Mining machines and complexes for underground coal mining: Monograph / [S.S. Grebenkin, A.V. Agafonov, V.V. Kosarev, etc.]; under the general editorship of S.S. Grebenkin. Donetsk: VIC, 2006. – 353s.
10. Mathematical modeling and calculation of parameters of coal mine systems and downhole equipment: Monograph / [S.S. Grebenkin, V.N. Pavlysh, A.V. Agafonov, V.V. Kosarev, V.V. Radchenko, V.D. Ryabichev, V.P. Glebov, V.I. Zenzerov, A.I. Egunov]. – Donetsk: VIC, 2007. – 263 p.
11. Mathematical models and methods for calculating the parameters of underground mining processes and mining equipment: Monograph / [S.S. Grebenkin, V.D. Ryabichev, V.N. Pavlysh, P.N. Dolzhikov, V.I. Zenzerov]. – Donetsk: VIC, 2007. – 385 p.
12. V. N. Pavlysh, E. V. Perinskaya. Mathematical modeling of the processes of functioning of specialized convective type apparatuses / V. N. Pavlysh, E. V. Perinskaya. // Problems of artificial intelligence – Donetsk 2015 0(1) – pp. 89-101.
13. E. V. Perinskaya. Application of the computational experiment method to the study of parameters of convective processes // Problems of artificial intelligence – Donetsk 2021 3(22) – pp. 57-65.
14. V. N. Pavlysh, S. A. Zori, E. I. Burlaeva. The task of classifying information in the formation of databases in computer learning systems of processes // Problems of artificial intelligence – Donetsk 2018 4(11) – pp. 71-81.
15. V. N. Pavlysh, S. V. Storozhev. Mathematical modeling in stability problems based on the theory of fuzzy multiple analysis. // Problems of artificial intelligence – Donetsk 2021 2(21) – pp. 44-51

RESUME

V. I. Zenzerov

Mathematical Modeling Of Hydromechanical Processes In Transmission Networks Of Mining Equipment

Mechanized support, as one of the machines of the cleaning complex, largely determines its reliability of management and safety of operation. In turn, the operation of mechanized supports is largely determined by the quality of hydraulic systems. As the experience of the development of inclined layers shows, it is due to the improvement of hydraulic systems that it is possible to increase the stability and direction of movement of sections of mechanized support.

To date, analytical dependencies describing dynamic processes in the hydraulic system of mechanized supports have not been established, especially when they work on inclined formations, therefore, the technical characteristics of a significant number of excavating machines in operation do not meet the formed mining and geological conditions. This determines the relevance of this work.

In this regard, the substantiation of the parameters of the stability system of sections of mechanized supports and their hydraulic system when working off inclined coal seams in conditions of increased loads on the cleaning face is an urgent scientific and applied task of industry importance. The purpose of the work is to substantiate computational algorithms for studying the processes of functioning of the hydraulic transmission of mechanized fasteners of underground workings.

The movement system of the mechanized support is a hydromechanical system. Since the hydraulic system of the support is multi-sectional, the operation of the entire system can be considered by the example of performing the operations of the technological cycle with one section of the support. The operation of the hydraulic drive is described by two types of equations: • differential equations of motion of the system elements, compiled according to the D'Alembert principle; • flow balance equations that take into account that the fluid in the hydraulic system is continuous and homogeneous. The hydraulic support system consists of N separate branches that simulate the operation of hydraulic cylinders, and sections of pressure and drain lines common to all hydraulic cylinders. Based on the rule of nodes and branches [1], we will make a mathematical model of each of these sections.

Systems of nonlinear differential equations of the first order form a mathematical model of the hydraulic system of mechanized supports. The total number of equations included in these systems is determined, which depends on the number of simulated simultaneously operating hydraulic cylinders. For example, when calculating the hydraulic system of the four-column section of the MT type support during the operation of movement with simultaneous unloading, it is necessary to simulate the simultaneous operation of six hydraulic cylinders, which corresponds to the solution of a system of forty-one differential nonlinear equations. The number of equations may change during the simulation process as a result of different start and end times of work performed by different hydraulic cylinders. The above calculation features show the need to develop algorithms and programs on a PC that allow you to learn the necessary amount of data on the dynamics of the projected hydraulic system, which makes it possible to automate the design process and reduce

A mathematical model of the hydraulic system of sections of mechanized supports has been developed, which is used to study dynamic processes in a hydraulic drive and its performance when N hydraulic cylinders work together. An algorithm has been developed for modeling the dynamics of the hydraulic system of the section of mechanized supports,

which allows you to set the sequence of modeling the operations of the technological cycle, simulate the joint operation of a certain number of interconnected hydraulic cylinders at each operation, as well as automatically perform step-by-step control of the displacement of each of them. The mathematical model, the algorithms proposed by the author and the results of mathematical modeling of the dynamics of the hydraulic system of the mechanized support section when performing the operations of the technological cycle are the basis for the creation of a computer-aided design system for hydraulic systems of mechanized supports (SAPGMC)

РЕЗЮМЕ

В. И. Зензеров

Математическое моделирование гидромеханических процессов в трансмиссионных сетях горного оборудования

Механизированная крепь, как одна из машин очистного комплекса, в значительной мере определяет его надежность управления и безопасность работы. В свою очередь, работа механизированных крепей во многом определяется качеством гидросистем. Как показывает опыт разработки наклонных пластов, именно за счет совершенствования гидросистем удается повысить устойчивость и направленность передвижения секций механизированной крепи.

До настоящего времени не установлены аналитические зависимости, описывающие динамические процессы в гидросистеме механизированной крепи, в особенности при их работе на наклонных пластах, поэтому технические характеристики значительного числа имеющихся в работе выемочных машин не отвечают сформировавшимся горно-геологическим условиям. Это и определяет актуальность настоящей работы.

В этой связи обоснование параметров системы устойчивости секций механизированных крепей и их гидросистемы при отработке наклонных угольных пластов в условиях повышения нагрузок на очистительную забой, является актуальной научной и прикладной задачей, имеющей отраслевое значение.

Цель работы - обоснование вычислительных алгоритмов для исследования процессов функционирования гидравлической трансмиссии механизированных креплений подземных выработок.

Система передвижения механизированной крепи представляет собой гидромеханическую систему. Так как гидросистема крепи является многосекционной, то работу всей системы можно рассматривать на примере выполнения операций технологического цикла одной секцией крепи. Работа гидропривода описывается двумя типами уравнений:

- дифференциальные уравнения движения элементов системы, составленные по принципу Даламбера;
- уравнения баланса расходов, учитывающие, что жидкость в гидросистеме неразрывна и однородна.

Гидросистема крепи состоит из N отдельных ветвей, моделирующих работу гидроцилиндров, и общих для всех гидроцилиндров участков напорной и сливной магистралей. На основании правила узлов и ветвей [1] составим математическую модель каждого из этих участков.

Системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка образуют математическую модель гидросистемы механизированных крепей. Определяется суммарное количество уравнений, входящих в эти системы, которое зависит от

числа моделируемых одновременно работающих гидроцилиндров. Для примера, при расчете гидросистемы четырехстоечной секции крепи типа МТ во время выполнения операции передвижения с одновременной разгрузкой необходимо моделирование одновременной работы шести гидроцилиндров, что соответствует решению системы сорока одного дифференциального нелинейного уравнения. Число уравнений может изменяться в процессе моделирования в результате разного времени начала и окончания выполнения работы различными гидроцилиндрами.

Перечисленные выше особенности расчетов показывают необходимость разработки алгоритмов и программ на ПЭВМ, позволяющих подучить необходимый объем данных о динамике работы проектируемой гидросистемы, что дает возможность автоматизировать процесс проектирования и сократить объем и трудоемкость экспериментальных и доводочных работ по крепи в целом.

Приведен предложенный укрупненный алгоритм математического моделирования динамики работы гидросистем механизированных крепей.

Разработана математическая модель гидросистемы секций механизированных крепей, применяемая для исследования динамических процессов в гидроприводе и его быстродействия при совместной работе N гидроцилиндров.

Разработан алгоритм моделирования динамики работы гидросистемы секции механизированных крепей, позволяющий задавать последовательность моделирования операций технологического цикла, на каждой операции имитировать совместную работу определенного количества взаимосвязанных гидроцилиндров, а также автоматически осуществлять пошаговый контроль величины перемещения каждого из них.

Математическая модель, предложенные автором алгоритмы и результаты математического моделирования динамики гидросистемы секции механизированной крепи при выполнении операций технологического цикла положены в основу создания системы автоматизированного проектирования гидросистем механизированных крепей (САПГМК).

Зензеров Владимир Иванович - к.т.н., доцент ФГБОУ ВО ДГУЮ Минюста России, кафедра управления проектами и аудиторской деятельности, 283049, г. Донецк, ул. Лебединского, 9, тел +7(949) 334-91-79, mp_vik56@mail.ru
Область научных интересов: математическое моделирование сложных систем.

Статья поступила в редакцию 31.10.2024.