УДК 620.42: 681.52

А.М. Алексеев

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: aleksey.alekseev@gmail.com

РАСЧЁТ БОЛЬШИХ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ НЕЛИНЕЙНОСТИ

A.M. Alekseev

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: aleksey.alekseev@gmail.com

ESTIMATION OF LARGE NETWORK MODELS WITH PARAMETRIC ELEMENTS OF DIFFERENT DEGREE OF NONLINEARITY

Цель. Разработка метода расчёта сетевых моделей вентиляционных систем шахт при решении задач распределения воздуха для принятия управляющих воздействий при проветривании горных выработок.

Методика. Расчёт больших сильно разреженных сетевых моделей вентиляционных систем шахт методом самонастраивающихся обратных операторов. Нелинейную систему строго второго порядка представляют в виде дифференциальных уравнений с элементами, нелинейность которых изменяется от 1 до 2. При этом первоначальные уравнения превращаются в модель многосвязной системы автоматического управления, для которой выполнены исследования.

Результаты. Обоснован выбор метода самонастраивающихся обратных операторов, применённого для расчёта систем алгебраических с различной степенью нелинейности уравнений высокой размерности, описывающие сетевые объекты и, в том числе, шахтные вентиляционные сети. Показано, что предложенный подход позволяет исследовать систему дифференциальных разностных уравнений, интерпретируемую как математическая модель эквивалентной многосвязной системы автоматического регулирования, методами современной теории автоматического управления.

Научная новизна. Научная новизна предложенного в работе метода – использование метода обратных самонастраивающихся операторов в сепаратных контурах сетевых моделей большой степени разрежённости, что позволило значительно увеличить скорость сходимости вычислительных процессов.

Практическая значимость. Разработка метода расчёта сетевых моделей вентиляционных систем шахт позволяет создать программный комплекс для систем управления безопасностью на шахтах и рудниках. Наличие информации, необходимой для объективной оценки ситуации, которая складывается на месте аварии, улучшает вопросы информационного обеспечения для должностных лиц органов управления процессами ликвидации аварий.

Ключевые слова: *большая сетевая модель, вентиляционная система шахты*

Введение. В настоящее время при решении задач естественного распределения воздуха на компьютере наибольшее распространение получили метод Андрияшева [1] и аналогичный ему метод Харди-Кросса. Указанные методы, а также большинство других менее распространённых способов расчёта аналогичных сетевых задач, отличаются двумя основными недостатками:

- низкой сходимостью, характерной для всех чисто итерационных методов;
- постоянной для всех параметрических элементов сети, как правило, квадратичной степенью нелинейности.

Нелинейность зависимости расхода воздуха от депрессии определяется турбулентностью потока воздуха в ограниченном пространстве горной выработки. В настоящее время эта зависимость для всех ветвей модели вентиляционной системы принимается постоянной и соответствует выражению $H = q^{\eta}R,$ где R – аэродинамическое сопротивление горной выработки. На самом же деле показатель турбулентности η в реальных условиях шахт изменяется от 1 до $\cong 2$. Он зависит от скорости потока в горной выработке.

Принятие постоянства показателя турбулентности приводит к неточности моделирования самых разнообразных аэродинамических процессов.

Целью работы является разработка метода расчёта сетевых моделей вентиляционных систем шахт.

Практическое приложение предложенного метода может найти широкое применение, поскольку в настоящее время на шахтах для выработки управляющих воздействий при проветривании горных выработок используют сетевые модели вентиляционных систем.

Изложение основного материала. В математической трактовке задача расчёта сетевых моделей с элементами различной степени нелинейности сводится к решению системы из *n* алгебраических нелинейных уравнений с действительными левыми частями, имеющей в матричной записи вид

$$F(X)=0\,, \tag{1}$$

где совокупность функций (1) представляет собой *n*-мерную вектор-функцию $F = (F_1, F_2, ..., F_n)$, а совокупность аргументов – это *n*-мерный вектор $X = (X_1, X_2, ..., X_n)^T$.

Нужно отметить, что $F(X)$ разреженная матрица, достигающая размеров 2000 × 2000.

Поскольку в общем случае система (1) не имеет аналитического решения, то задача приближённого решения сводится к установлению такой совокупности значений $X^* = (X_1^*, X_2^*, ..., X_n^*)^T$, при которой максимальная невязка будет меньше допустимой по технологическим условиям погрешности расчёта $\max(\varepsilon) \le \varepsilon_0 (i = \overline{1, n})$.

Каждая из функций системы (1) представляет собой алгебраическую сумму токов I_i, выраженных для любой из η_i ветвей через её активное сопротивление R_i и потерю напряжения ΔU_i. Токи I_i инцидентны j-му узлу

$$I_i = sign(\Delta U_i)[\mathrm{mod}(\Delta U_i) \times (R_i)^{-1}]^{1/2} . \tag{2}$$

При линейной зависимости I_i от ΔU_i (2) примет следующий вид

$$I_i = sign(\Delta U_i)[\mathrm{mod}(\Delta U_i) \times (R_i)^{-1}] . \tag{3}$$

При произвольной степени нелинейности выражение (2) будет видоизменяться в зависимости от турбулентности воздушного потока.

В случае ветви с источником напряжения, ток I_b определяют, исходя из характеристик последнего $U_b = \varphi(I_b)$ с учётом коэффициентов, характеризующих его внутреннее сопротивление. В случае, когда в ветви должен поддерживаться постоянный, заданный расход, величина I_i задается как константа $I_i = I_{i3}$.

Суть предложенного подхода заключается в том, что система (1) после несложных преобразований превращается в систему дифференциальных разностных уравнений, интерпретируемую как математическая модель эквивалентной многосвязной системы автоматического регулирования, исследуемая в дальнейшем методами современной теории автоматического управления.

Согласно такому подходу, каждому узловому напряжению (кроме нулевого) исходной сети, содержащей $N = n + 1$ узлов и M ветвей, соответствует сепаратный контур автоматического регулирования. В линеаризованном виде он состоит из дискретной и линейной частей. Дискретная часть содержит синхронно и синфазно управляемые ключи – импульсные элементы и фиксаторы нулевого порядка (по одному в каждом сепаратном контуре).

Непрерывная часть системы состоит из интегральных регуляторов с коэффициентом усиления K_i (по одному в каждом сепаратном контуре), из взаимосвязей между регуляторами, описываемых квадратной невырожденной матрицей W_p, и из неинерционного нелинейного многосвязного объекта, описываемого левой частью системы (1) и представляемого после линеаризации матрицей взаимосвязей W_0 в многомерном объекте.

На вход каждого i-го сепаратного контура подаётся i-я невязка ε_i, а разница между заданными значениями невязки ε_{i0} и ε_i подаётся на вход регулятора каждого сепаратного контура.

Поскольку в начале процесса регулирования (в реальном времени это соответствует началу расчёта сети, т. е. первому такту вычислительного процесса) начальные условия, задаваемые вектором X, в общем случае далеки от истинного решения X^* системы (1). В этом случае в системе, за счёт отрицательной связи ε_i и несогласованности $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \varepsilon_i$, начинается дискретный переходный процесс, направленный на доведение $\Delta\varepsilon_i$ до нуля. В терминах *Z*-преобразования дискретная часть каждого сепаратного контура и последовательно соединённый с ней интегральный регулятор описываются передаточной функцией $W_p(z) = K_i(z-1)^{-1}$, а матрица W_0 – якобианом многомерного объекта

$$\begin{matrix} \dfrac{\partial F_1}{\partial X_1}; \dfrac{\partial F_1}{\partial X_2}; ...; \dfrac{\partial F_1}{\partial X_n}; \\ \dfrac{\partial F_2}{\partial X_1}; \dfrac{\partial F_2}{\partial X_2}; ...; \dfrac{\partial F_2}{\partial X_n}; \\ \dfrac{\partial F_n}{\partial X_1}; \dfrac{\partial F_n}{\partial X_2}; ...; \dfrac{\partial F_n}{\partial X_n}. \end{matrix} \tag{4}$$

Используя методы обобщения функций, получаем, с учётом (2), для диагональных и недиагональных элементов матрицы (3) при квадратичной нелинейности соответственно

$$\frac{\partial F_i}{\partial X_i} = -0{,}5 \sum [\mathrm{mod}(\Delta U_i) R_k]^{-0{,}5};$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial X_k} = 0{,}5 [\mathrm{mod}(\Delta U_i) R_k]^{0{,}5}, i \ne k.$$

В дальнейшем будет также использоваться нормированная матрица взаимосвязей в многомерном объекте

$$\begin{matrix} \beta_{11}; \beta_{12}; ...; \beta_{1,n}; \\ \beta_{21}; \beta_{22}; ...; \beta_{2n}; \\ \beta_{n1}; \beta_{n2}; ...; \beta_{nn}, \end{matrix} \tag{5}$$

где $(\beta_{ik} = \dfrac{\partial F_i}{\partial X_k} / \dfrac{\partial F_i}{\partial X_i})$.

На основании полученных зависимостей установлены следующие специфические особенности математического описания объекта:

- все диагональные элементы матриц (5) $\beta_{ii} = 1$, а её недиагональные элементы отрицательны

$$\beta_{ik} = -[1 + \sum_{\substack{l \neq j \\ l, j \in \eta i}}^{n} (\frac{\mathrm{mod}(U_i - U_k)R_j}{\mathrm{mod}(U_i - U_l)R_i})^{-0,5}]; \qquad (6)$$

- сумма модулей всех элементов строк равна единице. Это утверждение не распространяется на два узла (две строки в матрице (4)), инцидентные узлу, общему для всех источников ЭДС;

- поскольку $\frac{\partial F_i}{\partial X_k} = \frac{\partial F_k}{\partial X_i}$, то матрица (4) является симметричной, а в силу вышеупомянутых особенностей и ввиду устойчивости объекта в установившемся состоянии она является также и положительно-определённой.

Нормированная матрица (4) является структурно-симметричной, но не является симметричной, т. к. её диагональные элементы не равны между собой.

Согласно (5), чем меньше отношение сопротивления одной из ветвей, например j-й, инцидентной узлам i и k, к сопротивлению других ветвей, инцидентных одному из этих узлов, тем ближе модуль соответствующего недиагонального элемента β_{ik} к 1. По указанной причине параметр

$$\alpha_{jl} = R_j / R_l \qquad (7)$$

косвенно характеризует сходимость процесса решения, или, в терминах ТАР, запас устойчивости многосвязной системы автоматического регулирования.

На основании описанной выше структуры дискретной системы динамика переходных процессов в ней описывается следующей зависимостью

$$zX(z) = -KW_pW_0X(z). \qquad (8)$$

Синтез эффективного управления в многомерной многосвязной системе автоматического регулирования (8) вызывает в данном случае затруднения из-за чрезвычайно высокого её порядка (число узлов в рассматриваемых схемах может доходить до 1000 и более). Однако условный характер системы позволяет применить редко используемые в подобных случаях, но хорошо изученные в ТАР методы инвариантности, обеспечивающие в многосвязных системах полную автономность по входам. В физических системах высокой размерности эффективность этого подхода ограничивается невозможностью достаточно точного воспроизведения компенсационных условий инвариантности, что, в свою очередь, обусловливает возможную неустойчивость систем. В данном же случае рассматривается фиктивная многосвязная система, точное соблюдение условий инвариантности в которой обусловливается, во-первых, исключительно высокой разрешающей способностью современных ЭВМ и, во-вторых, отсутствием „паразитных“ отклонений характеристик объекта от расчётных значений.

Это позволяет для расчёта системы (1) применить метод обратных операторов [2]. С этой целью принимаем в (8) матрицу $W_p = [W_0]^{-1}$, благодаря чему многосвязная система регулирования распадается на n, не взаимосвязанных, дискретных, замкнутых, сепаратных контуров первого порядка. Как известно, в таких контурах, в зависимости от значения K, могут существовать пять видов переходных процессов:

1. При K =1 переходный процесс завершается за один цикл регулирования (оптимальный процесс с конечной длительностью).
2. При K <1 переходный процесс носит апериодический затянутый, но затухающий характер.
3. При 1< K <2 переходный процесс носит колебательный затухающий характер.
4. При K =2 получаем незатухающие автоколебания.
5. При K >2 получаем расходящиеся автоколебания.

На каждом шаге регулирования система компенсирует лишь главную линейную часть рассогласования, получающуюся при линеаризации $F(X)$. Поэтому, для обеспечения желаемого качества переходного процесса отработки ε_i (или желаемой скорости сходимости процесса расчёта на компьютере), необходимо на каждом шаге регулирования изменять соответствующим образом значение K. Оно, согласно приведенному выше условию п.3, должно быть меньше 2.

Введение такой автоматической подстройки и обусловило название метода самонастраивающихся обратных операторов. Так как на каждом шаге регулирования изменяются и параметры многосвязной системы, то целесообразно ориентироваться по алгоритму [2]

$$K_i(s+1) = K_i(s) - \gamma_i(s) \times \frac{\partial I(s)}{\partial K_i(s)},$$

где $\gamma_i(s)$ – значение настроечного параметра на s-м шаге; $\frac{\partial I(s)}{\partial K_i(s)}$ – градиент изменения критерия качества при соответствующем изменении коэффициента K_i усиления i-го сепаратного контура. Критерий качества I целесообразно принять в виде функции $I = f[\theta_3 - \vartheta_{(s)}]$, где θ_3 – заданная желаемая скорость сходимости процесса; $\theta_{(s)}$ – параметр, характеризующий фактическую скорость сходимости на s-м такте. Так, например, можно принять

$$\theta(s) = \frac{\max[\varepsilon_i(s)]}{\max[\varepsilon_i(s-1)]}, i = \overline{1,n}.$$

Для обеспечения условий инвариантности необходимо на каждом s-м шаге регулирования рассчитывать обратную матрицу $[W_0]^{-1}$ либо, что значительно эффективнее, находить искомые значения $X(s)$, например, из решения линейной системы алгебраических уравнений

$$W_0(s-1)X(s) = -KF(X(s)), \tag{9}$$

где $X(s)=U(s)-U(s-1)$ – искомая разность узловых напряжений по каждому узлу на s-м и $s-1$-м тактах.

Для решения системы (9) могут быть использованы либо точные методы, основанные на гауссовом исключении, либо приближённые итерационные методы. Не останавливаясь на первом направлении, детально описанном в специальной литературе, рассмотрим возможность применения ТАР во втором случае. Прежде всего, отметим чрезвычайно высокий порядок исследуемой системы линейных алгебраических уравнений типа (9), которую запишем в форме

$$\beta X = B, \tag{10}$$

где $B=(B_1,B_2,...,B_n)^T$ – вектор-столбец, описывающий неувязки в исходной системе и соответствующий правой части в (9).

Сложность синтеза быстродействующего управления многосвязной однотипной САР, эквивалентной в динамическом смысле алгебраической системе (9), очевидна и обуславливается как её высокой размерностью, так и разнообразием и переменным характером взаимосвязей (элементов матрицы β), изменяющихся не только при переходе от одного объекта к другому, но и в процессе эксплуатации каждого объекта. Существенное упрощение задачи основано на идее минимизации сложности математической модели сетевого объекта путём сведения многомерной исходной системы к эквивалентной в динамическом смысле. Эта модель состоит из двух одинаковых, наиболее характерных сепаратных контуров с одинаковыми коэффициентами взаимосвязи β_{ij}. Такая модель минимальной сложности описывает основные динамические свойства исходного объекта тем большей степени, чем больше для данной сети значения $\max(\alpha_{ij})$ в (7). С другой стороны, с ростом $\max(\alpha_{ij})$ существенно ухудшается и динамика системы, что подтверждает целесообразность исследования динамики всей системы по минимально сложной модели. Известно [5], что итерационный процесс решения (10) сходится при любом начальном приближении при условии, что спектр λ_m матрицы β < 1. С другой стороны, можно доказать, что спектр якобиана модели минимальной сложности равен его максимальному по модулю недиагональному элементу $\lambda_m=[\beta_m]$.

С учётом изложенного выше, линейная модель эквивалентной многосвязной системы автоматического регулирования, соответствующая по форме минимально-сложной модели исходной алгебраической системе (10), описывается в терминах Z-преобразования следующим образом

$$\begin{aligned} zX_1(z) &= AX_1(z)+B[B_1(z)+[\beta_m]X_2(z)]; \\ zX_2(z) &= AX_2(z)+B[B_2(z)+(z)^r[\beta_m]X_1(z), \end{aligned} \tag{11}$$

где $A=(1-K-K_F)/(1-K_F)$; $B=K/(1-K_F)$; r – целое вещественное число; K,K_F – соответственно, коэффициент усиления сепаратного контура и коэффициент воздействия по производной (первой разности).

Для возможности сопоставления различных вариантов управления рассмотрим сначала случай, когда $K_F=0$ и $r=0$ в (11), что соответствует методу одновременных смещений (метод Якоби). При этом корни (11) следующие

$$z_{1,2} = -1+K(1\pm[\beta_m]). \tag{12}$$

Применяя условия устойчивости $[z_i]<1(i=1,2)$, находим для максимально допустимого значения коэффициента усиления системы

$$K_m < 2/(1+[\beta_m]). \tag{13}$$

Если учесть в (10), что $K_F=0$ и $r=0$, то получим так называемый в вычислительной математике процесс последовательных смещений (процесс Зейделя) с корнями

$$z_{1,2} = 0{,}5[K^2\beta_m^2-2k+1\pm[\beta_m](K^2\beta_m^2-4K+4)^{1/2}]. \tag{14}$$

Для оптимального значения $K=K_0$ при кратных корнях из (14)

$$K_0 = \frac{2}{\beta_m^2}[1-(1-\beta_m^2)^{1/2}], \tag{15}$$

из условий устойчивости

$$K_{0\max} < 2/\beta_m^2. \tag{16}$$

Поскольку в обоих случаях (процессы Якоби и Зейделя) получены, как видно из (12), (14) и (15), апериодические процессы, то для сравнительного анализа рассматриваемых систем целесообразно ввести в виде критерия качества переходного процесса сумму дискретных рассогласований первого и второго контуров модели минимальной сложности, имеющую для обеих сравниваемых систем общий вид

$$S = (B1+B2)[K(1-[\beta_m])]^{-1}. \tag{17}$$

Из (13) видно, что у системы Якоби K должно быть тем меньше, чем больше $[\beta_m]$. При очень „плохом“ объекте $(|\beta_m|\to 1)$ K не должен превышать 1.

Этому соответствует $S_{\min} = S_{k=1}$. В случае же системы Зейделя, как видно из (16), значение $K_{0\max}$ стремится к 2, при ($|\beta_m| \to 1$), следовательно, для него критерий S почти в два раза меньше и переходный процесс, соответственно, короче. По указанной причине далее процесс Якоби рассматриваться не будет. Из (17) видно, что при установлении на каждом внешнем такте управления (в нелинейной системе) оптимального значения K_0 согласно (14), т.е. с учётом конкретных значений $\beta = \beta_m$ и входных воздействий $B1$ и $B2$, переходный процесс в системе при таком эффективном управлении в $0{,}5\beta_m^2[1-(1-\beta_m^2)^{1/2}]^{-1}$ раз короче, чем при нерегулируемом значении $K = 1$, соответствующем обычной системе Зейделя. Для наглядности ниже приведены в табл. 1 сравнительные данные, полученные на моделях минимальной сложности численным моделированием (счёт прекращался при доведении рассогласования до 0,1 $B1$).

Таблица 1

Сравнительные данные численного моделирования

Коэффициент взаимосвязи β_m	-0,9	-0,99	-0,999
Число циклов до завершения процессов $K = K_0$	9	25	90
$(B1 = B2 = 1) K = 1$	18	150	1450

Введение первой разности в закон управления не влияет на критерий S, подсчитанный по формулам (11) с учётом значения K_0 ($K_F = 0$), т. к. в окончательное выражение S параметр K_F не входит.

Дальнейшее повышение быстродействия управления оказалось возможным благодаря выявлению ранее неизвестных свойств переходных процессов. В системе, обусловленной не минимальными фазовыми свойствами, проявляется неоднозначная реакция объекта на коэффициент усиления. Не минимальные фазовые свойства исследовались графоаналитическим методом ввиду нестационарности рассматриваемой дискретной системы и сложности аналитического исследования. Анализ, выполненный численным моделированием, показал эффективность следующего „ускоряющего“ алгоритма. Сначала процесс при значениях $K = K_0$ протекает апериодически до момента достижения максимума суммы: $\Delta X(s) = |\Delta X_1(s)| + |\Delta X_2(s)|$. Начиная с этого цикла, коэффициент усиления уменьшается на каждом последующем итерационном цикле по рекуррентной формуле

$$K(s) = mK(s-1), \tag{18}$$

где оптимальное значение $m = 0{,}5$ установлено экспериментально. Процесс снижения $\Delta X(s)$ при этом завершается, практически, за два-три цикла.

Ниже приведены результаты численного расчёта моделей минимальной сложности при различных β_m и $B1 = B2 = 1$. Было установлено, что введение замедляющей первой разности с коэффициентом $K_F = -0{,}5$, не влияет, как было показано ранее, на сумму дискретных значений. Существенно влияет это на сам характер процесса, особенно при больших значениях β_m, т. е. в условиях „плохих“ систем. С целью обеспечения сравнимости, процессы, управляемые согласно (18), заканчиваются, когда $K(s) < 0{,}1K_0$, а оптимальный процесс (первая строка таблицы) заканчивается при достижении того же значения $\Delta X(s)$, что и соответствующий процесс в строке *2* при данном β_m. В строках *2* и *3* в числителе указано общее число итерационных циклов, а в знаменателе – отношение $\Delta X(s)_{\max} / \Delta X(s)_{\min}$.

Таблица 2

Результаты численного расчёта модели минимальной сложности

Процесс	Коэффициент взаимосвязи β_m				
	-0,9	-0,99	-0,999	-0,9999	-0,99999
Естественный оптимальный процесс с $K = K_0$	9	25	77	213	1570
Процесс с быстрым „спуском“ по формуле (17) при $m = 0{,}5$	$\frac{18}{11{,}8}$	$\frac{20}{17}$	$\frac{28}{26{,}3}$	$\frac{52}{67{,}3}$	$\frac{129}{201}$
То же, с замедляющей первой разностью ($K_F = -0{,}5$)	$\frac{18}{1{,}63}$	$\frac{18}{4{,}58}$	$\frac{18}{16}$	$\frac{18}{58}$	$\frac{18}{192}$

Как видно из табл. 2, введение „замедляющей“ первой производной (первой разности) и быстрого спуска, основанного на не минимальных фазовых свойствах объекта, тем эффективнее, чем больше (по модулю) значение $\beta_{\max}$, т. е., чем ниже запас устойчивости эквивалентной многосвязной системы автоматического регулирования или, чем хуже сходимость исходной системы.

Результаты исследований рассмотренного в данной работе метода самонастраивающихся обратных операторов, применённого для расчёта систем алгебраических с различной степенью нелинейности уравнений высокой размерности, описывающие сетевые объекты и, в том числе, шахтные вентиляционные сети, включены в состав программного комплекса систем управления безопасностью на шахтах и рудниках.

Выводы: По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Учёт различной степени нелинейности параметров сетевых моделей сложных систем управления позволил увеличить точность расчётов.

2. Применение метода обратных самонастраивающихся операторов в сепаратных контурах сетевых моделей большой степени разряжённости позволило значительно увеличить скорость сходимости вычислительных процессов.

Список литературы / References

1. Пучков Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт / Л.А. Пучков, Л.А. Бахвалов – М.: Недра, 1992. – 399 с.

Puchkov, L.V. and Bakhvalov, L.A. (1992), *Metody i algoritmy avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniiyem ugolnykh shakht* [Methods and Algorithms of Automatic Control by Ventilation of Coal Mines], Nedra, Moscow, Russia.

2. Мельник В.П. Метод синтезу пристроїв керування за допомогою методу обернених операторів / В.П. Мельник // Пожежна безпека: теорія та практика. – 2008. – № 2. – С. 38–41.

Melnik, V.P. (2008), "A method of synthesis of control units by means of method of reverse operators", *Pozhezhna bezpeka: teorija i praktyka*, no. 2, pp. 38–41.

3. Амосов А.А. Вычислительные методы для инженеров / Амосов А.А. , Дубинский Ю.А. , Копченова Н.В. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. –596 с.

Amosov, A.A., Dubinski, Yu.A. and Kopchenova, N.V. (2003), Vychislitelnye metody dlya inzhenerov [Computational Methods For Engineers], MEI, Moscow, Russia.

Мета. Розробка методу розрахунку мережевих моделей вентиляційних систем шахт при рішенні завдань розподілу повітря для прийняття управлінських дій при провітрюванні гірничих виробок.

Методика. Розрахунок великих дуже розріджених мережних моделей вентиляційних систем шахт методом обернених операторів, що налагоджуються самостійно. Нелінійну систему суворо другого порядку представляють у вигляді диференційних рівнянь з елементами, нелінійність яких змінюється від 1 до 2. При цьому початкові рівняння перетворюються в модель багатозв'язної системи автоматичного керування, що й досліджується.

Результати. Обгрунтовано вибір методу самоналагоджувальних зворотних операторів, застосованого для розрахунку систем з різною мірою нелінійності рівнянь алгебри високої розмірності, що описують мережеві об'єкти і, у тому числі, шахтні вентиляційні мережі. Показано, що запропонований підхід дозволяє досліджувати систему диференціальних різницевих рівнянь, що інтерпретується як математична модель еквівалентної багатозв'язної системи автоматичного регулювання, методами сучасної теорії автоматичного управління.

Наукова новизна. Наукова новизна запропонованого в роботі методу – використання методу зворотних самоналагоджувальних операторів у сепаратних контурах мережевих моделей великої міри розрідженості, що дозволило значно збільшити швидкість збіжності обчислювальних процесів.

Практична значимість. Розробка методу розрахунку мережевих моделей вентиляційних систем шахт дозволяє створити програмний комплекс для систем управління безпекою на шахтах і копальнях. Наявність інформації, необхідної для об'єктивної оцінки ситуації, що складається на місці аварії, покращує питання інформаційного забезпечення для посадовців органів управління процесами ліквідації аварій.

Ключові слова: *велика мережева модель, вентиляційна система шахти*

Purpose. Development of the estimation method for ventilating shaft system models aiming decision making concerning mine ventilation control in order to solve the problem of air distribution in mine tunnels.

Methodology. We have calculated the large and strongly rarified system model of ventilating shaft by the method of self-tuning inverse operators. Nonlinear system of the second order is represented by differential equations with elements, whose nonlinearity varies from 1 to 2. Thereby the primary equations grow into the model of multivariable automatic control system under consideration.

Findings. We have substantiated the application of the method of self-tuning reverse operators for the calculation of the algebraic systems with different degree of non-linearity of high-degree equations, describing network objects such as mine ventilation network. We have proved that the offered approach allows to investigate the system of differential equations, interpreted as a mathematical model of the equivalent multiply connected system of automatic control, by the methods of modern theory of automatic control.

Originality. Application of the method of reverse self-tuning operators in the separate contours of large and strongly rarified system models allowed us to increase considerably the convergence rate of computation processes.

Practical value. Development of the method of calculation of mine ventilation system models allows us to create a software package for mine safety management systems. Availability of the information required for objective estimation of situation at a place of accident simplifies informing functionaries responsible for elimination of emergencies.

Keywords: *large system model, ventilating shaft*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Є.В. Кочурой. Дата надходження рукопису 15.01.13.