

# **Математическая модель переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях с сосредоточенными и распределенными параметрами**

Лапко В.В., Чередникова О.Ю.  
кафедра ЭВМ ДонНТУ  
ola@cs.dgtu.donetsk.ua

## **Аннотация**

*Лапко В.В., Чередникова О.Ю. Математическая модель переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях с сосредоточенными и распределенными параметрами. Разработан алгоритм построения математической модели переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях с сосредоточенными и распределенными параметрами, отличающийся тем, что создание модели исследуемого процесса сводится к обычной коммутации в соответствии с топологией базовых динамических решающих блоков (узлов, ветвей и источников тяги), что обеспечивает наглядный и удобный интерфейс для пользователя при использовании современных программных приложений визуального программирования. Компьютерное моделирование динамической задачи сводится к запуску процедуры одновременного интегрирования дифференциальных уравнений структурных блоков, составляющих сеть.*

## **Анотація**

*Лапко В.В., Чередникова О.Ю. Математична модель перехідних аеродинамічних процесів в вентиляційних мережах з зосередженими та розподіленими параметрами. Розроблений алгоритм побудови математичної моделі перехідних аеродинамічних процесів у вентиляційних мережах із зосередженими та розподіленими параметрами, який відрізняється тим, що побудова моделі процесу, що досліджується, представляє собою звичайну комутацію відповідно до топології базових динамічних вирішувальних блоків (вузлів, гілок й джерела тяги), що забезпечує наочний та зручний інтерфейс для користувача при використанні сучасних програмних модулів візуального програмування. Комп'ютерне моделювання динамічної задачі представляє собою запуск процедури одночасного інтегрування диференційних рівнянь структурних блоків, що складають мережу.*

## **Abstract**

*Lapko V.V., Cherednikova O.Y. Mathematical model of aerodynamical transients in ventilation networks with lumped and distributed parameters. An algorithm has been developed for building a mathematical model of aerodynamical transients in ventilation networks with lumped and distributed parameters which is notable for building a model of a process under examination being boiled down to conventional interconnections between basic dynamic solving units (nodes, branches and draught sources) in accordance with the network topology providing a convenient visual user interface when applying contemporary CASE tools. Computer simulation of a dynamic model comes to calling a procedure of simultaneous solving of differential equations represented by structural units building up a network.*

## **Введение**

Расчету вентиляционных сетей посвящено очень большое количество работ [1-3]. Однако, большинство работ ориентировано на моделирование и оптимизацию процессов воздухораспределения в сети в стационарном режиме. Моделирование переходных аэродинамических процессов в вентиляционных сетях было выполнено [4] для узкого круга сетей, в которых для описания аэродинамики ветвей достаточно учитывать только акустическую массу воздуха в ветви и сжимаемостью воздушного потока (акустической гибкостью) можно пренебречь. В настоящее время, однако, доказано [5], что в реальном диапазоне частотного спектра производственных возмущений в шахтных сетях ( $\omega \leq 0.5$  рад/сек) в модели ветвей сети необходимо учитывать сжимаемость воздушного потока, особенно в длинных ветвях, в которых, кроме того, зачастую приходится учитывать и распределенность акустических параметров. Структурная схема модели ветви и сети в целом в этом случае сводится к совокупности однотипных четырехполюсников, объединенных в соответствии с топологией узлами сети. Известны физические и динамические модели сети метрополитена, построенные из совокупности четырехполюсников [5], на которой были получены важные данные о динамике воздушного потока при движении поездов метрополитена и отработаны оптимальные параметры системы автоматического управления расходом воздуха. Актуальной задачей является создание программной модели такого рода для моделирования широкого спектра динамических возмущений и характеристик ветвей сети.

## Математические модели элементов шахтной вентиляционной сети

Основными элементами шахтной вентиляционной сети (ШВС) являются выработки: вентиляционный, откаточный штреки, лава, подготовительные и тупиковые выработки. При моделировании ШВС представляется ориентированным графом, состоящим из ветвей (выработок) и узлов (мест коммутации выработок друг с другом).

В общем случае математическая модель выработки представляет собой систему с распределенными параметрами. Но для упрощения модели с достаточной для практики точностью возможно использовать цепочечные схемы с сосредоточенными параметрами [5], в которых каждый элемент цепи – четырехполюсник, математическая модель которого представляет собой простые дифференциальные уравнения. Показано [5], что для обеспечения минимальной сложности модели с достаточной для практики точностью одним четырехполюсником отображается участок выработки длиной до 400м. Экспериментально доказано, что выбор типа четырехполюсника не оказывает существенного влияния на точность модели и выбирается только из условия удобства его коммутации с другими элементами цепи. Наиболее простая схема – схема Г-четырёхполюсника показана на рис.1. В схеме замещения учитывается инерционность воздушного потока ( $L$ ), сжимаемость воздуха ( $C$ ) и сопротивление выработки ( $R$ ).

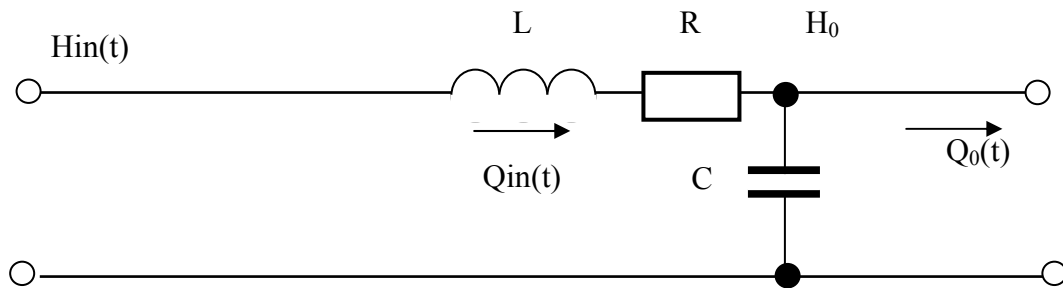


Рисунок 1 – Электрогидравлическая схема замещения отрезка выработки Г-четырёхполюсником, учитывающим инерционность, сжимаемость и аэродинамическое сопротивление отрезка выработки

Математическая модель для одного Г-четырёхполюсника (рис.1) определяется соотношениями:

$$L \frac{dQ_{in}}{dt} + RQ_{in} | Q_{in} | = H_{in} - H_o ; \quad (1)$$

$$C \frac{dH_o}{dt} = Q_{in} - Q_o . \quad (2)$$

Для удобства построения схемы моделирования представим уравнения (1), (2) в виде:

$$Q_{in} = \frac{1}{L} \int (H_{in} - H_o - RQ_{in} | Q_{in} |) dt ;$$

$$H_o = \frac{1}{C} \int (Q_{in} - Q_o) dt .$$

Тогда схема решающего блока, реализующего математическую модель четырехполюсника, и его условное обозначение будут иметь вид, показанный на рис.2.

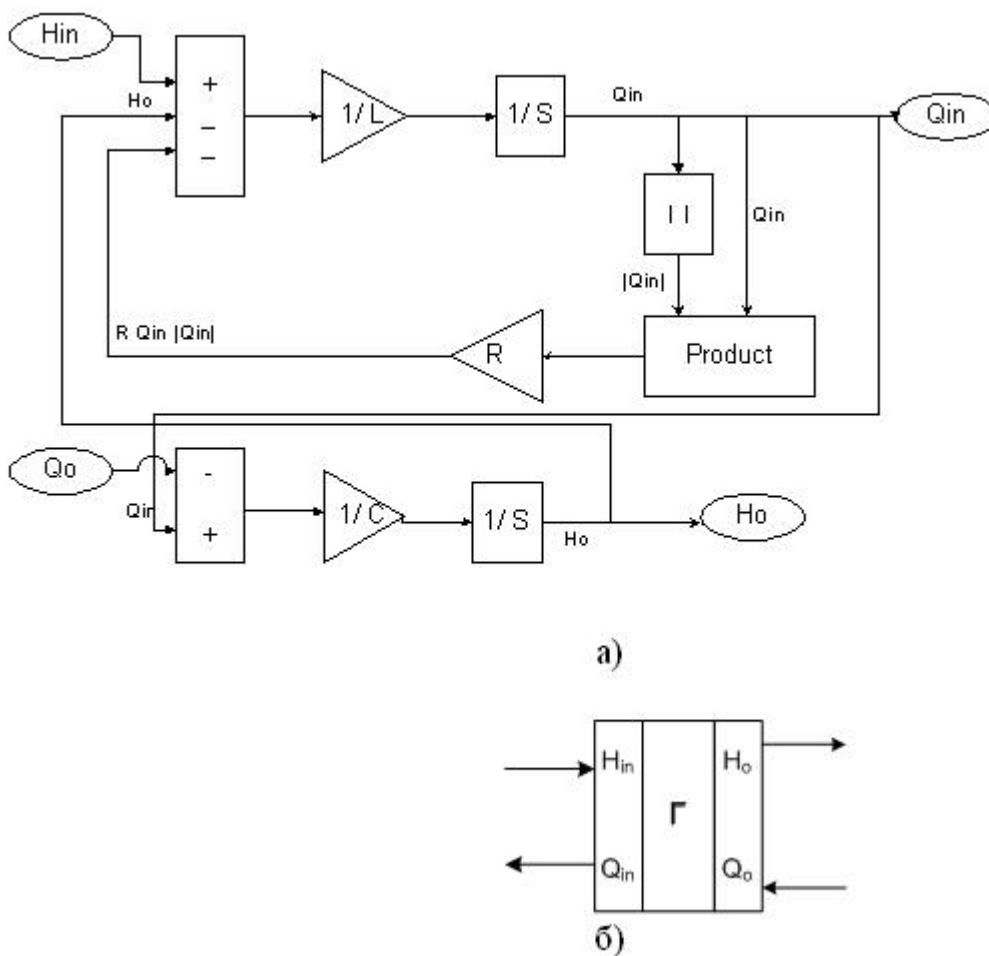


Рисунок 2 – Схема решающих элементов одного Г-четырёхполюсника (а) и интерфейс блока по входу и выходу (б)

Входными параметрами блока являются напор на входе цепочечного участка ( $H_i$ ) и расход воздуха в нагрузке блока ( $Q_o$ ). При работе блока формируется напор в нагрузке цепочечного участка ( $H_o$ ) и значение расхода воздуха на входе блока ( $Q_{in}$ ) (рис.2,б).

В общем случае для моделирования длинных выработок (ветви) используются цепочечные схемы Г-четырёхполюсников (рис.3,а). Коммутационная схема на основе двух четырёхполюсников показана на рис.3,б.

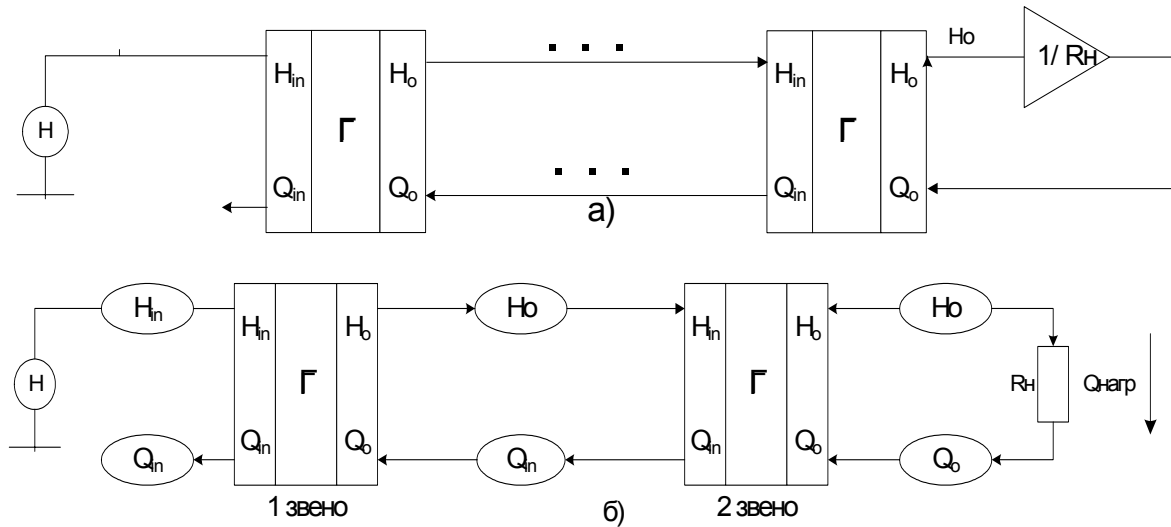


Рисунок 3 – Коммутационная схема ветви на основе двух решающих блоков для Г-образного четырёхполюсника

При моделировании узлов ШВС, т.е. мест коммутации выработок друг с другом будем различать разветвляющие узлы (места, где выход одной выработки является началом нескольких выработок (рис.4,б) и суммирующие узлы (места, где выходы нескольких выработок являются входом одной выработки (рис.4,а).

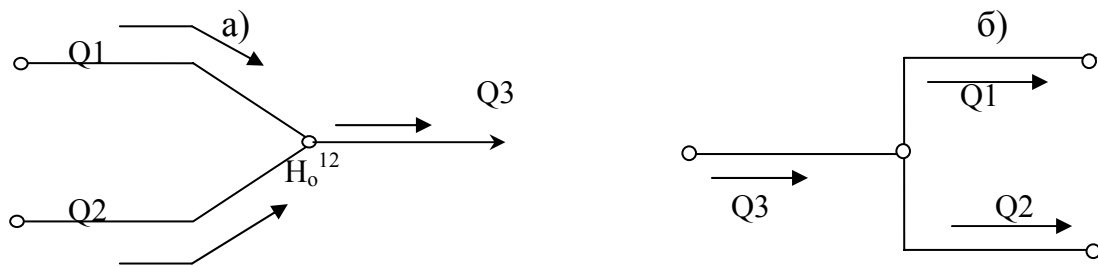
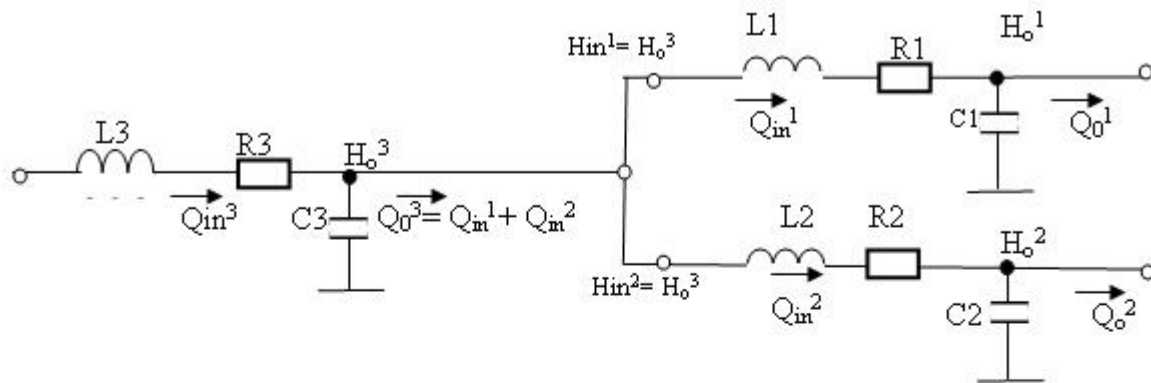


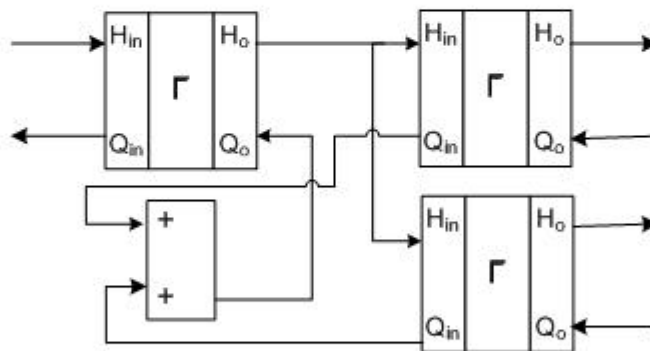
Рисунок 4 – Суммирующий (а) и разветвляющийся (б) узлы

На рис.5 приведена электрогидравлическая схема замещения (а), модель (б) и обозначение блока разветвляющего узла. Входными параметрами этого узла являются входной напор и расходы воздуха на

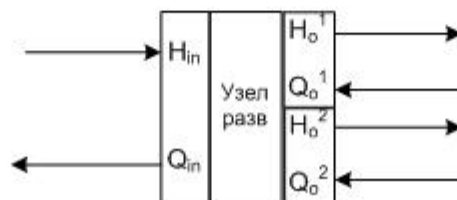
входе двух ветвей, а на выходе блока формируется значение расхода воздуха и значения напоров на входе каждой выработки-ветви.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Электрогидравлическая схема замещения (а), коммутационная схема блока (б) и условное обозначение блока (в) разветвляющегося узла

Электрогидравлическая схема замещения суммирующего узла приведена на рис.6. Для удобства моделирования преобразуем эту схему таким образом, как это показано на рис.7.

Последнее звено ветви Q1

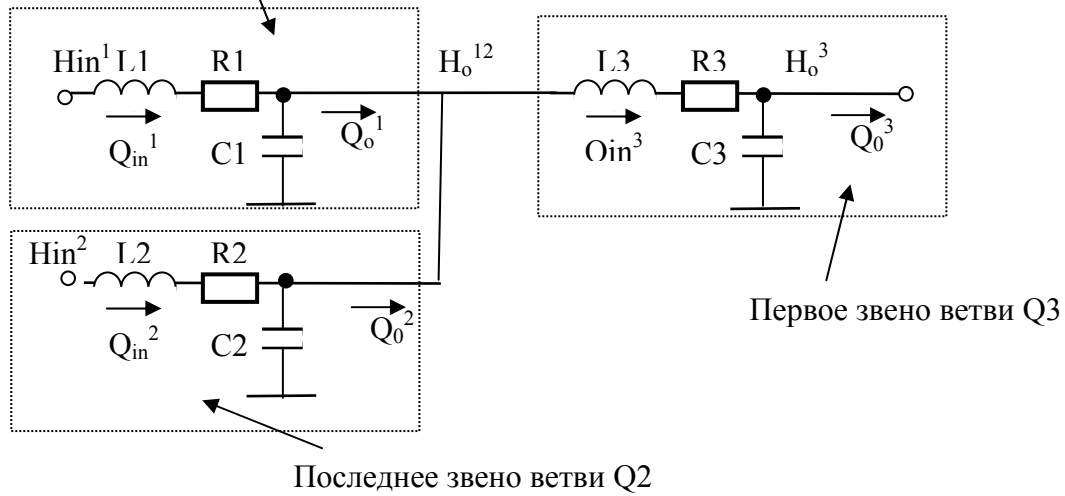


Рисунок 6 – Электрическая схема суммирующего узла

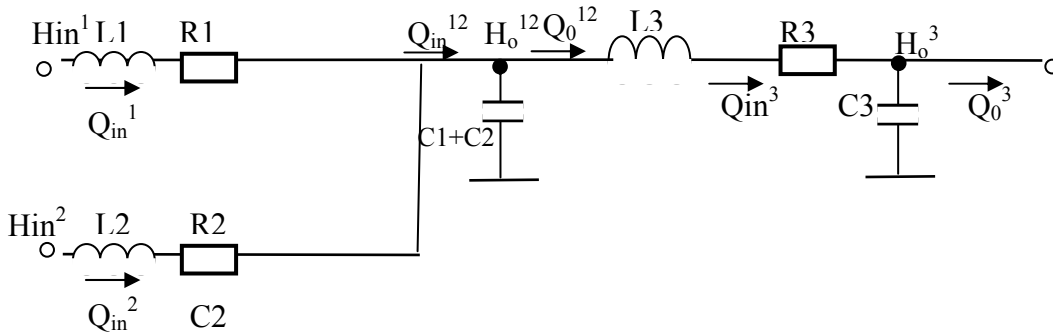


Рисунок 7 – Эквивалентная схема суммирующего узла

На рис. 8 приведена структура блока суммирующего узла (БСУ) (а) и его обозначение (б). Входными параметрами блока являются входные напоры двух ветвей и расход воздуха на выходе двух ветвей, а на выходе блока выдается начальное значение расходов воздуха для каждой ветви и суммарное значение напора.

Блок «Qс» на рис.8 является общим звеном ветвей 1 и 2. Его математическая модель представлена соотношением:

$$(C_1 + C_2) \frac{dH_o}{dt} = Q_{in1} + Q_{in2} - Q_o$$

Модель, соответствующая этому описанию приведена на рис.9.

Электрическая схема блока «1/2 Г» (рис.8) и схема его модели показаны на рис.10. Его математическая модель определяется соотношениями:

$$L_1 \frac{dQ_{in}^1}{dt} + R_1 Q_{in}^1 | Q_{in}^1 | = H_{in}^1 - H_o$$

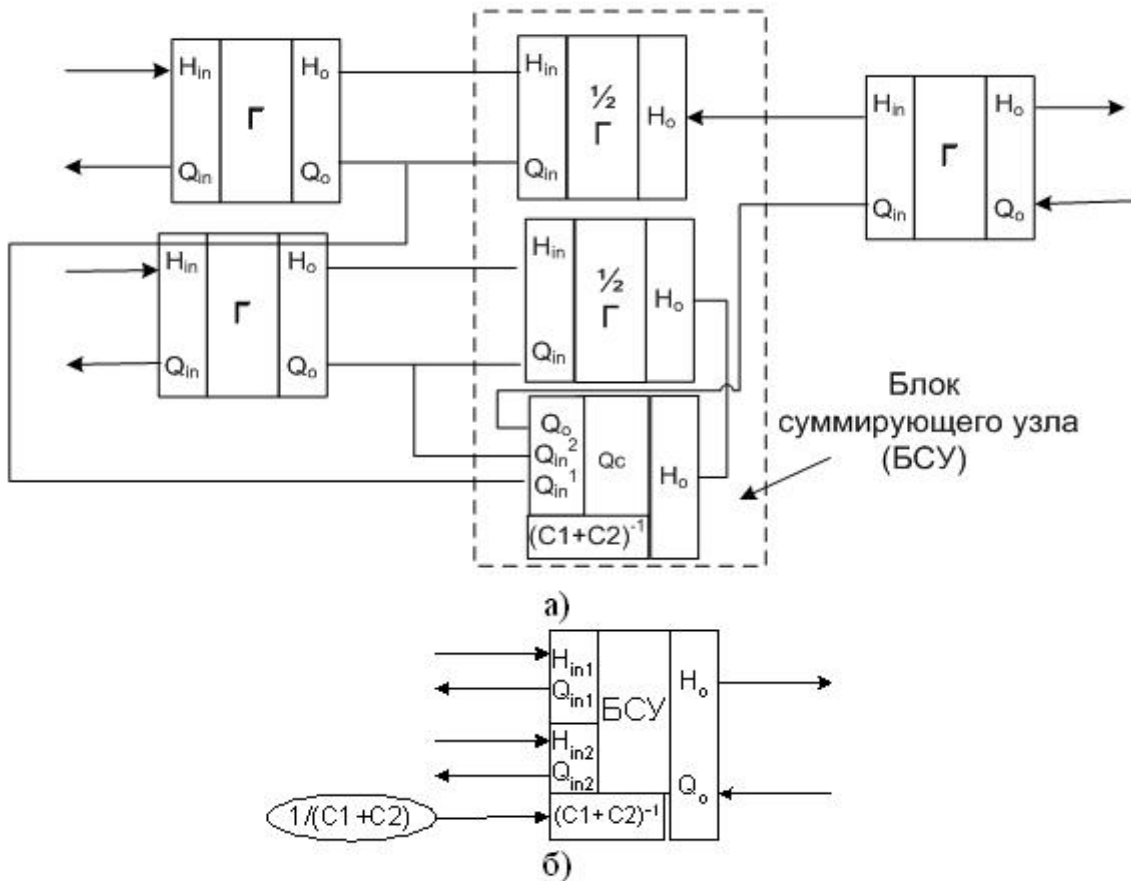


Рисунок 8 – Структура (а) и обозначение (б) блока суммирующего узла

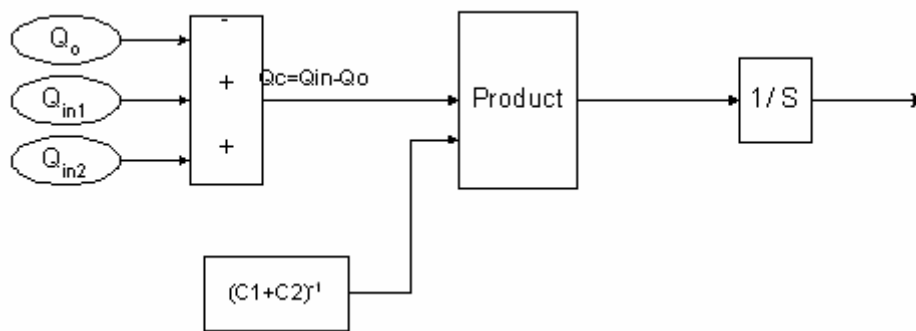


Рисунок 9 – Аналоговая схема собирающего узла

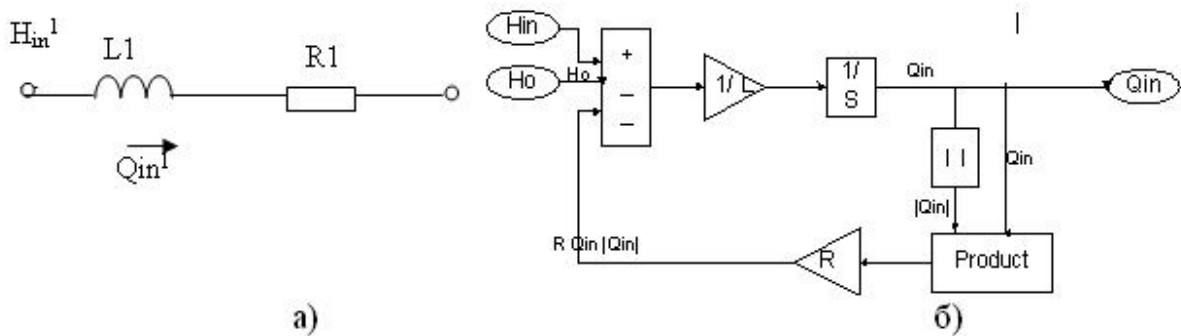


Рисунок 10 – Электрическая (а) и аналоговая схема блока « $\frac{1}{2} \Gamma$ »



## Математическая модель шахтной вентиляционной сети

Модель ШВС представляет собой схему, в которой перечисленные выше блоки соединены между собой через входные и выходные клеммы. В качестве примера было выполнено моделирование сети, состоящей из трех ветвей, воздухоподающих стволов и главных откаточных штреков (рис.11), параметры которых приведены в табл.1. По этим данным для модели были рассчитаны параметры модели (L, C, R).

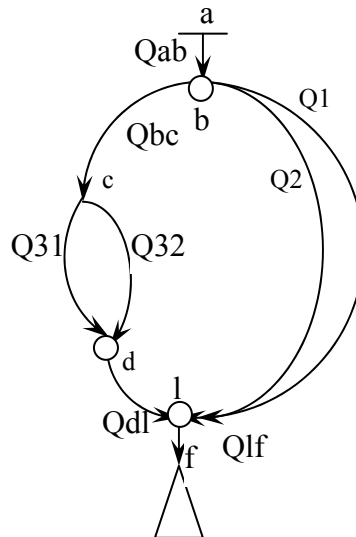


Рисунок 11 – Схема гипотетической шахтной вентиляционной сети

Таблица 1 – Параметры ветвей сети

	1 ветвь			2 ветвь			3-1 ветвь		
	Ош1	Л1	Вш1	Ош2	Л2	Вш2	ош31	Л31	вш31
L, м	420	94	420	800	120	800	650	110	650
S, м <sup>2</sup>	7	3	5	7	1.4	5.1	8.6	2.7	7.3
R, н·с·м <sup>-6</sup> ·10 <sup>-4</sup>	4.8	6.22	1.16	5	57	1	2.7	27	5

Таблица 1 - Продолжение

	3-2 ветвь			гвш	гош	ab	lf
	ош32	л32	вш1				
L, м	900	125	900	600	150	800	650
S, м <sup>2</sup>	7	2.2	4.9	6.5	6.5	6.5	6.5
R, н·с·м <sup>-6</sup> ·10 <sup>-4</sup>	5	120	11.6	1.2	5	4.8	4.8

Состав решающих блоков и схема соединений блоков для этой сети (рис.12) в принципе могут быть параллельно реализованы с использованием MIMD-технологии. При этом каждый из блоков или их совокупность может выполняться в этом случае на отдельном процессоре.

Временные диаграммы потоков воздуха показаны на рис.13.

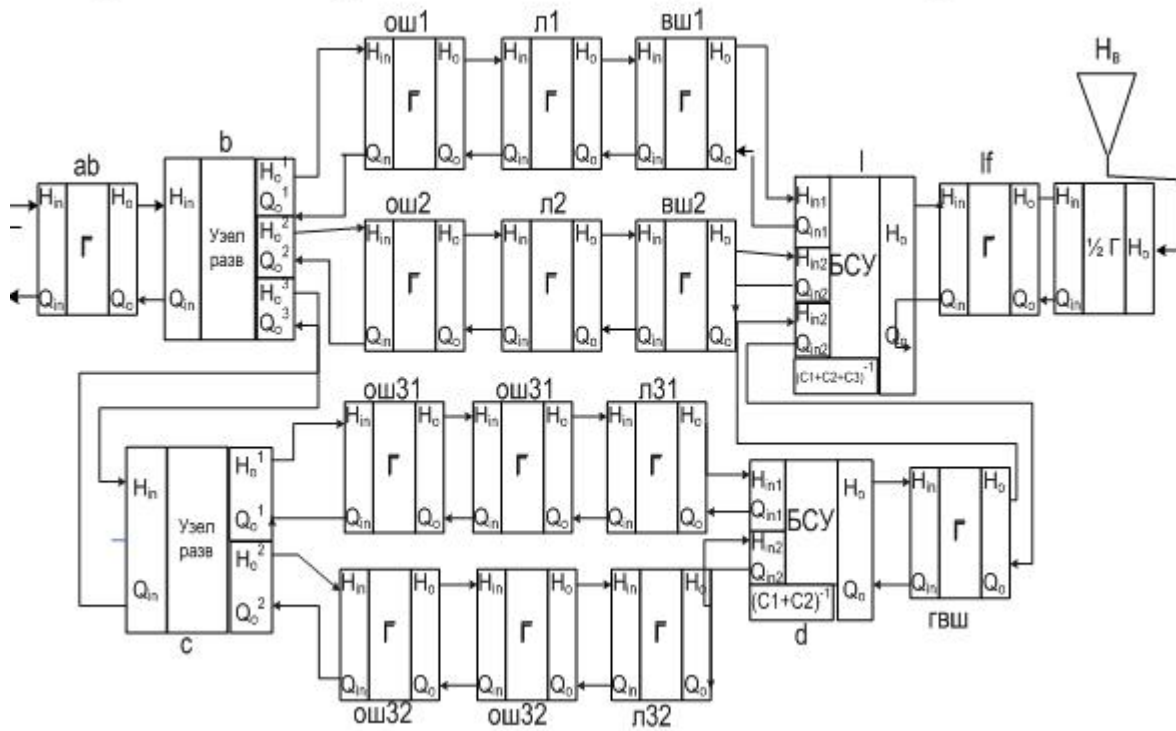


Рисунок 12 – Состав и коммутационная схема математической модели гипотетической ШВС с распределенными параметрами

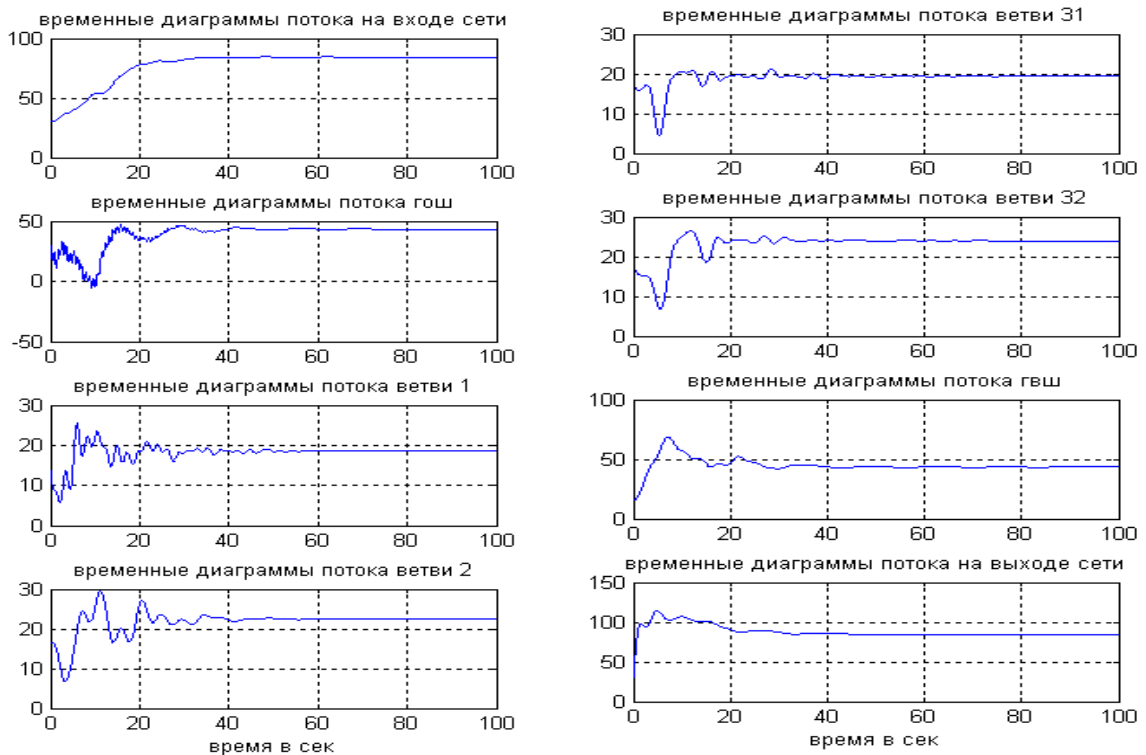


Рисунок 13 – Результаты моделирования сети

В модели исследован режим переключения (скачок напора от  $-1000$  до  $-6000$ ). Начальные значения потоков и напоров во всех узлах модели были приняты равными установившимся значениям при напоре  $-1000\text{н/м}^2$ .

### **Заключение**

Разработанный алгоритм построения математической модели переходных аэродинамических процессов в вентиляционной сети с сосредоточенными параметрами отличается тем, что создание модели исследуемого процесса сводится к обычной коммутации в соответствии с топологией базовых динамических решающих блоков (узлов, ветвей и источников тяги), что обеспечивает наглядный и удобный интерфейс для пользователя при использовании современных программных приложений визуального программирования. Компьютерное моделирование динамической задачи сводится к запуску процедуры одновременного интегрирования дифференциальных уравнений структурных блоков, составляющих сеть.

В дальнейшем предполагается включение этой модели в систему диспетчерского управления шахтной вентиляционной сетью КАГИ для предварительного имитационного моделирования процессов в ШВС при выборе оптимального управления сетью.

### **Библиографический список**

1. Назаренко В.И. Разработка и исследование системы диспетчерского управления проветриванием шахт методами математического моделирования.: Дис. канд. техн. наук. – Донецк, 1974, 222с.
2. Круглов Ю.В. Расчет сложных вентиляционных сетей на ЭВМ / Ю.В. Круглов // Известия вузов. Горный журнал. – 2004. – №2. – С. 46 – 49.
3. Круглов Ю.В. Сравнительный анализ современных алгоритмов расчета вентиляционных сетей / Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, Л.Ю. Левин // Известия вузов. Горный журнал. – 2006. - №5. – С. 32 – 37.
4. Абрамов Ф.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Ф.А. Абрамов, Л.П. Фельдман, В.А. Святный. – К.: Наукова думка, 1981. – 284с.
5. Петров Н.Н. Электронная модель системы автоматического управления проветривания шахт.// Н.Н. Петров, П.Н. Ермолаев, П.Т. Пономарев. В кн.: Автоматическое управление в горном деле. Новосибирск: Б.И.,1971, с.89 – 93.



**Лапко Владимир Васильевич.**

В 1963 году закончил Донецкий технический университет по специальности «Автоматизация производственных процессов». В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов». С 1965г. работает на кафедре ВТ (ныне ЭВМ).

Научные интересы: моделирование и схемотехника средств автоматики и вычислительной техники



**Чередникова Ольга Юрьевна.**

В 1995 получила диплом специалиста по специальности «Программное обеспечение компьютерной техники» в Донецком техническом университете. С 2001г. работает ассистентом на кафедре «Электронные вычислительные машины». В 2004г. поступила в аспирантуру.

Научные интересы: моделирование.

---

Дата надходження до редакції 21.10.2008 р.