

УДК 519.876.5

**Р.В. Федюн (канд. техн. наук, доц.), Е.В. Литвинова (магистрант),  
В.А. Попов (канд. техн. наук, доц.)**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: [frv76@list.ru](mailto:frv76@list.ru), [elenka\\_imenno@mail.ru](mailto:elenka_imenno@mail.ru)

## **АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВЕНТИЛЯЦИИ ОТДЕЛЕНИЯ СУШКИ КРИСТАЛЛОВ СЕЛИТРЫ**

*Выполнено моделирование и анализ динамических процессов в нерегулируемой системе вентиляции. В функции предложенной системы управления вентиляцией входит поддержание разности приточного и вытяжного воздуха на заданном уровне и отработка системой возможных возмущений. Рассмотрены типовые режимы и влияние возмущений.*

**Ключевые слова:** система вентиляции, математическая модель, приток, вытяжка, ПИД-закон управления, передаточная функция.

### **Общая постановка проблемы**

Производственный процесс сушки кристаллов селитры сопровождается выделением вредных паров, тепла, влаги, вследствие чего воздух в помещениях претерпевает соответствующие изменения. Эти изменения в общем случае касаются состава и состояния воздуха и отрицательно отражаются на здоровье и самочувствии рабочих, создают тяжелые и опасные условия для работы и неблагоприятно влияют на производительность труда.

Задача вентиляции состоит в том, чтобы поддерживать в помещении состав воздуха, удовлетворяющий гигиеническим требованиям и технологическому регламенту сушки кристаллов селитры. Качественная работа систем вентиляции, точность поддержания параметров воздуха, снижение эксплуатационных расходов и сроков окупаемости вентиляционного оборудования во многом зависят от алгоритмов работы и технической реализации систем автоматизации.

Таким образом, проблема автоматического управления процессом вентиляции в соответствии с количеством выделяющихся вредностей, тепла и пара при обеспечении минимального расхода энергии является актуальной.

### **Постановка задач исследования**

Для исследования динамических режимов и синтеза системы автоматического управления процессом вентиляции отделения сушки селитры необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ процесса вентиляции отделения сушки кристаллов селитры как объекта автоматического управления;
- разработать математическую модель процесса вентиляции отделения сушки кристаллов селитры с учетом выбранного способа управления;
- выполнить моделирование динамических режимов в неуправляемом объекте — системе вентиляции отделения сушки кристаллов селитры и проанализировать полученные результаты;
- осуществить синтез необходимых алгоритмов управления процессом вентиляции;
- выполнить моделирование динамических режимов в замкнутой САУ процессом вентиляции с использованием синтезированных алгоритмов управления.

### Решение задач и результаты исследований

Объектом исследования является система вентиляции технологического процесса сушки селитры. Отделение сушки расположено в 2-х этажном здании на территории ЗАО «Северодонецкое объединение Азот». Выделяющиеся вредности: влага, тепловыделения, пары нитрата натрия. ПДК нитрата натрия  $5 \text{ мг/м}^3$ .

В производственном помещении предусмотрена приточно-вытяжная вентиляция с механическим побуждением. Схема системы вентиляции отделения сушки кристаллов селитры представлена на рисунке 1.

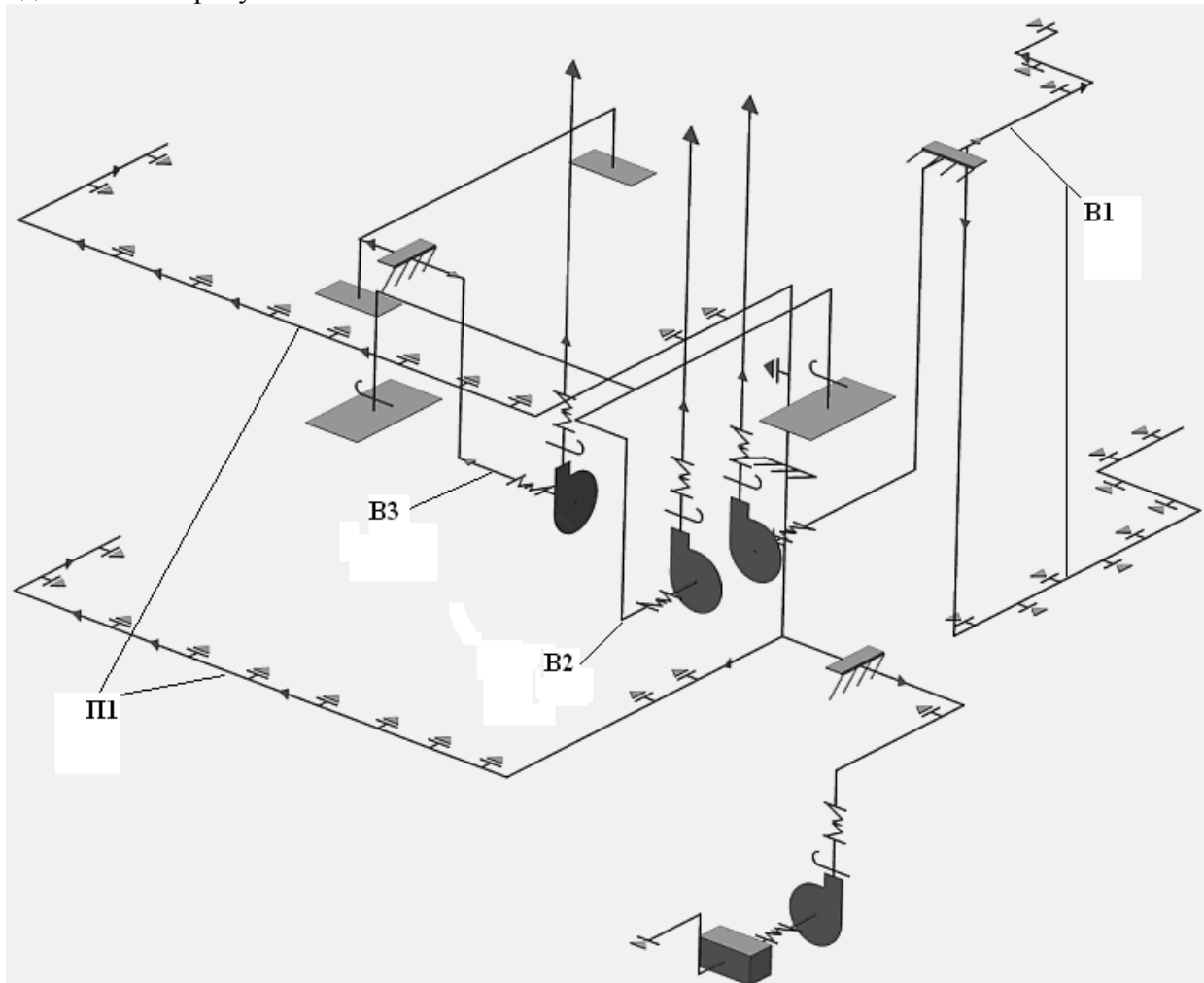


Рисунок 1 — Схема системы вентиляции отделения сушки кристаллов селитры

На рисунке 1 показано, что система вентиляции представлена одной приточной системой П1 и тремя вытяжными: одной общеобменной В1 и двумя местными В2 и В3, представленными в виде зонтов над фильтр-прессами (В2) и центрифугами (В3).

Приточная система представлена водяным калорифером, через который подается уличный воздух, вентилятором и воздуховодом. Вытяжные системы представлены вентиляторами и воздуховодами. Вентиляторы приводятся в действие асинхронными двигателями. На воздуховодах вблизи от вентиляторов и зонтов расположены шиберы. Шиберные задвижки применяют для регулирования потока (те, которые расположены вблизи вентиляторов), но основное их назначение — полное закрытие или открытие движения воздуха.

Для сохранения воздушного баланса требуется совместная работа вытяжных и приточных систем (в данном случае, нескольких вытяжных систем, работающих совместно с одной приточной). Система приточной вентиляции обеспечивают подачу свежего воздуха определенной температуры в производственное помещение с помощью калорифера и вентилятора. Количество приточного воздуха зависит от количества выделившихся вредностей. Производительность вытяжных систем должна изменяться одновременно с производительностью приточной системы. Для этого необходимо регулирование количества приточного и вытяжного воздуха в соответствии с количеством выделяющихся вредностей и тепловым периодом, т.к. в летний период необходимо учитывать дополнительное количество воздуха, которое идет на разбавление тепловыделений от работающих агрегатов.

В рассматриваемой системе вентиляции используются асинхронные электроприводы (АД), питаемые трехфазным напряжением  $U$  с частотой  $f$ , которые обеспечивают заданную частоту вращения  $n$  центробежных вентиляторов (ЦВ). Центробежные вентиляторы обеспечивают подачу  $Q$ , соответствующую аэродинамической характеристике вентилятора на соответствующей частоте  $n$  [1].

Работу системы вентиляции можно разделить на две составляющих — работу в пусковом режиме и работу в номинальном режиме. Первый режим характеризуется разгоном вентилятора с нулевой скорости до номинальной и, соответственно, таким же увеличением расхода.

Для получения динамических характеристик объекта необходимо получить передаточные функции составляющих частей системы вентиляции — асинхронного электропривода, центробежного вентилятора и воздуховодов.

Будем искать передаточную функцию асинхронного двигателя как отношение частоты вращения ротора к частоте питающего напряжения. В [1] предлагается эту передаточную функцию разбить на две составляющих — «момент/частота вращения» и «частота напряжения/момент» для возможности учета момента сопротивления, действующего на вал двигателя. Тогда структурная схема модели асинхронного электродвигателя при управлении частотой напряжения статора будет иметь вид, представленный на рис.2.

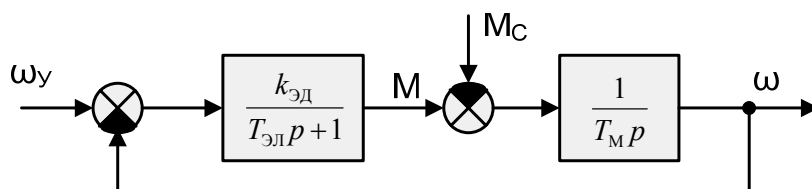


Рисунок 2 — Структурная схема модели асинхронного электродвигателя при управлении частотой питающего напряжения

По данной структурной схеме (рис.2) получим передаточную функцию асинхронного электродвигателя по управляющему воздействию в относительных единицах:

$$W(p)_{AD} = \left(\frac{\gamma}{v}\right)^2 \frac{1}{(T_{ЭМ} p + 1)T_M p + \left(\frac{\gamma}{v}\right)^2} = \frac{k_{AD}}{T_{ЭМ} T_M p^2 + T_M p + k_{AD}}, \quad (1)$$

где  $T_M$  — механическая постоянная времени двигателя,  $T_{ЭМ}$  — электромагнитная постоянная времени двигателя,  $\gamma = U_{1a} / U_{1an}$  — относительное напряжение статора (к номинальному),  $v = \Omega_1 / \Omega_{1n}$  — относительная частота напряжения статора (к номинальной).

Данная передаточная функция справедлива для случая, когда потокосцепление статора есть величина постоянная, т.е. одновременно с изменением частоты питающего напряжения изменяется и его величина в соответствии с выражением:  $U_{1a} / \omega_1 = const$ ; что обеспечивается в современных преобразователях частоты.

Имея конструктивные параметры двигателя, можно вычислить коэффициент  $(\gamma/\nu)^2$ . Согласно справочным данным, рассматриваемые двигатели рассчитаны на напряжение 380В с частотой 50Гц. Тогда, переходя к абсолютным величинам:

$$\left(\frac{\gamma}{\nu}\right)^2 = \left(\frac{U}{f}\right)^2 = \left(\frac{380}{50}\right)^2 = 57,76 B^2 c^2. \quad (2)$$

Таким образом, на основании структурной схемы (рис.2) с учетом выражений (1) и (2) получены передаточные функции асинхронных электродвигателей всех вентиляторов:

$$W_{AD}^{П1}(p) = \frac{57,76}{(0,14p + 1)37,54p + 57,76}, \quad W_{AD}^{B1}(p) = \frac{57,76}{(0,14p + 1)23,1p + 57,76}, \quad (4)$$

$$W_{AD}^{B2}(p) = \frac{57,76}{(0,13p + 1)25,99p + 57,76}, \quad W_{AD}^{B3}(p) = \frac{57,76}{(0,05p + 1)11,55p + 57,76}. \quad (5)$$

Введем коэффициент усиления электродвигателя, который будет характеризовать соответствие частоте вращения ротора в установившемся режиме частоте питающего напряжения. Согласно справочным данным, при частоте питающего напряжения 50 Гц частота вращения ротора составляет 1000 об/мин (для двигателей АИР 180 М6, АИР 112 МА6, АИР 112 МВ6, ) и 3000 об/мин (для двигателя АИР 63 В2). Как известно,

$$n_2 = \frac{60f_1}{p}(1 - s), \quad (6)$$

где  $f_1$  — частота питающего напряжения,  $p$  — число полюсов,  $s$  — скольжение.

В процессе работы двигателя величина скольжения изменяется, однако в устойчивом режиме не превышает 2–5%, поэтому для определения коэффициента усиления двигателя ею можно пренебречь. Тогда:

$$k_{П1} = \frac{n_{2ycm(П1)}}{f_{1ycm(П1)}} = \frac{1000}{50} = 20, \quad k_{B1} = \frac{n_{2ycm(B1)}}{f_{1ycm(B1)}} = \frac{1000}{50} = 20,$$

$$k_{B2} = \frac{n_{2ycm(B2)}}{f_{1ycm(B2)}} = \frac{1000}{50} = 20, \quad k_{B3} = \frac{n_{2ycm(B3)}}{f_{1ycm(B3)}} = \frac{3000}{50} = 60.$$

Как правило, на практике вентилятор и воздуховод рассматривают как один объект, и с определенной долей точности аппроксимируют общую передаточную функцию в виде апериодического звена без запаздывания (максимальная длина воздуховода не превышает 8 м):

$$W_Q(p) = \frac{k_Q}{T_1 p + 1}, \quad (7)$$

Используя характеристики вентиляторов [2], определили  $k_Q$  каждого вентилятора:

– приток на 2 этажа (П1): для  $Q=17200 \text{ м}^3/\text{ч}$  (8400 — 1й этаж, 8800 — 2й этаж), при 1000 об/мин коэффициент усиления по расходу  $k_{QП1}=1,8 \text{ м}^3/(\text{об}/\text{мин})$ ;

– общеобменная вытяжка (В1): для  $Q=5700 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при 1000 об/мин коэффициент усиления по расходу  $k_{QВ1}=0,85 \text{ м}^3/(\text{об}/\text{мин})$ ;

- местная вытяжная установка (B2): для  $Q=6600 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при 1000 об/мин коэффициент усиления по расходу  $k_{QB2}= 0,95 \text{ м}^3/(\text{об}/\text{мин})$ ;
- местная вытяжная установка (B3): для  $Q=1100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , при 2750 об/мин коэффициент усиления по расходу  $k_{QB3}= 0,7 \text{ м}^3/(\text{об}/\text{мин})$ .

С помощью библиотеки Simulink в Matlab составлена из полученных математических моделей отдельных элементов структурная схема модели системы вентиляции (рис.3).

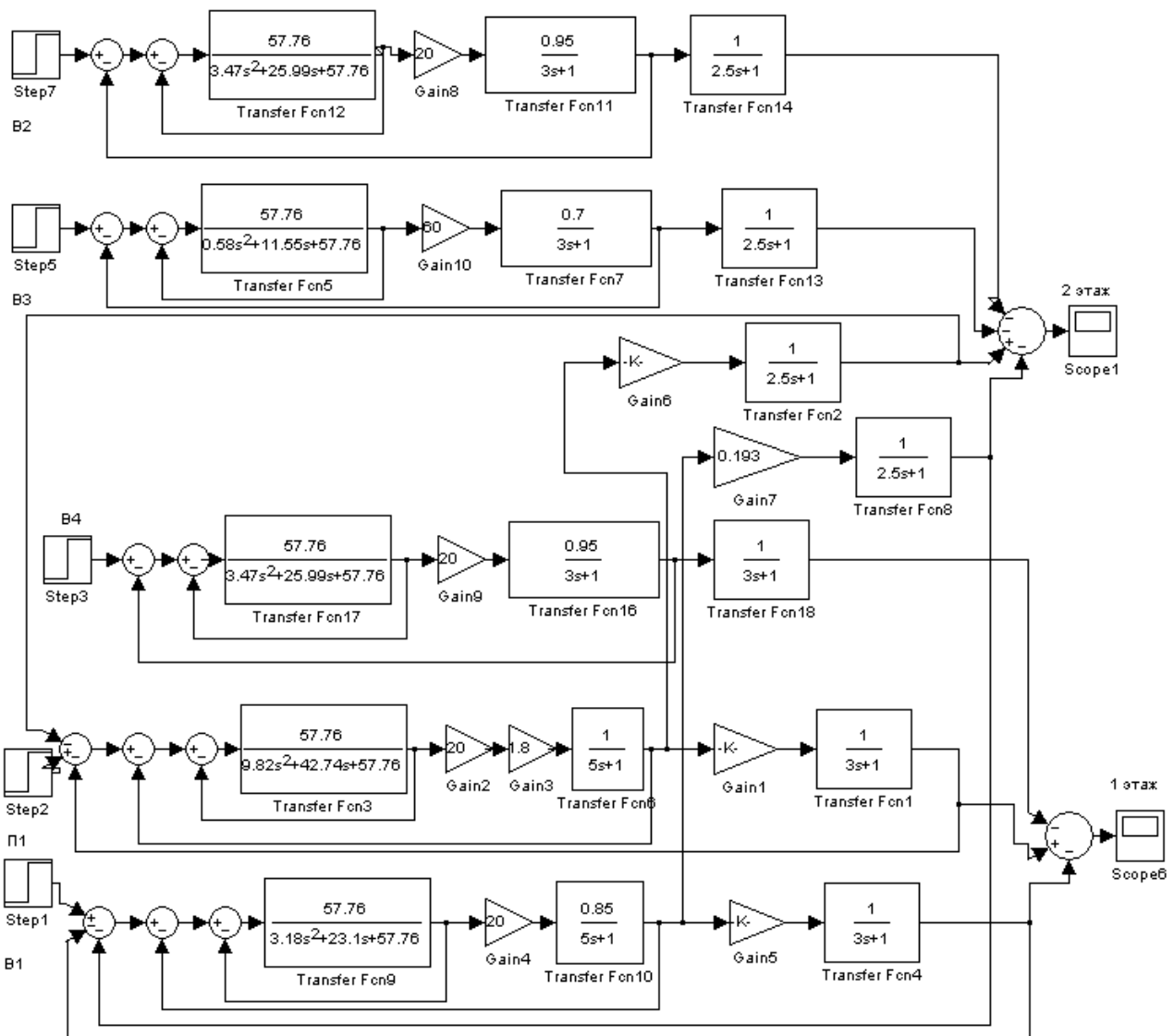
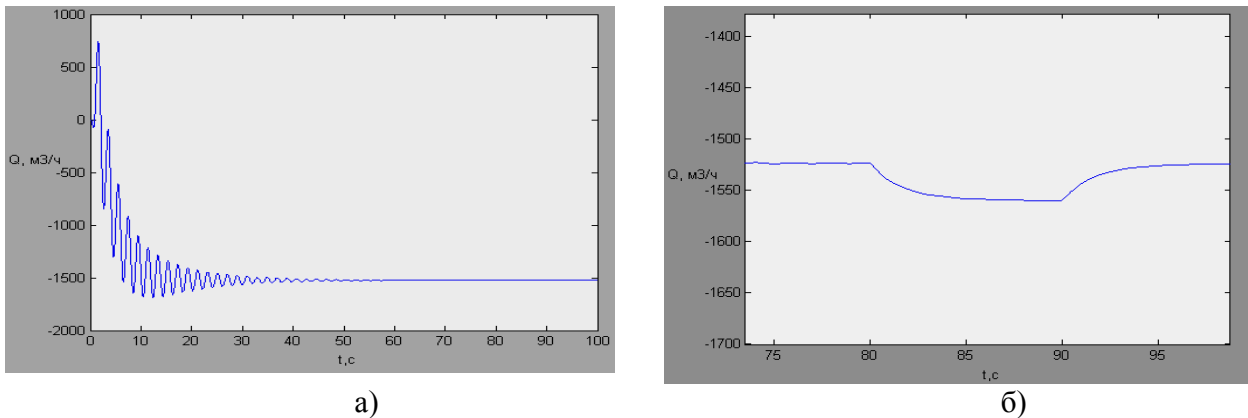


Рисунок 3 — Схема модели системы вентиляции отделения сушки кристаллов селитры

Выполнено моделирование динамических режимов в неуправляемой САУ при изменении задающего воздействия (рис.4, а) и при действии возмущающего воздействия в момент времени  $t=80$  сек в течении 10 сек (рис.4,б). Учтено, что кроме рассмотренных центробежных вентиляторов на первом этаже присутствует осевой вентилятор, работающий на вытяжку. Он обозначен как B4.  $Q_{B4}=3800 \text{ м}^3/\text{ч}$ .



а) б)  
Рисунок 4 — Изменение расхода воздуха в замкнутой САУ без регуляторов  
а — при изменении задающего воздействия; б — при действии возмущения (80–90сек)

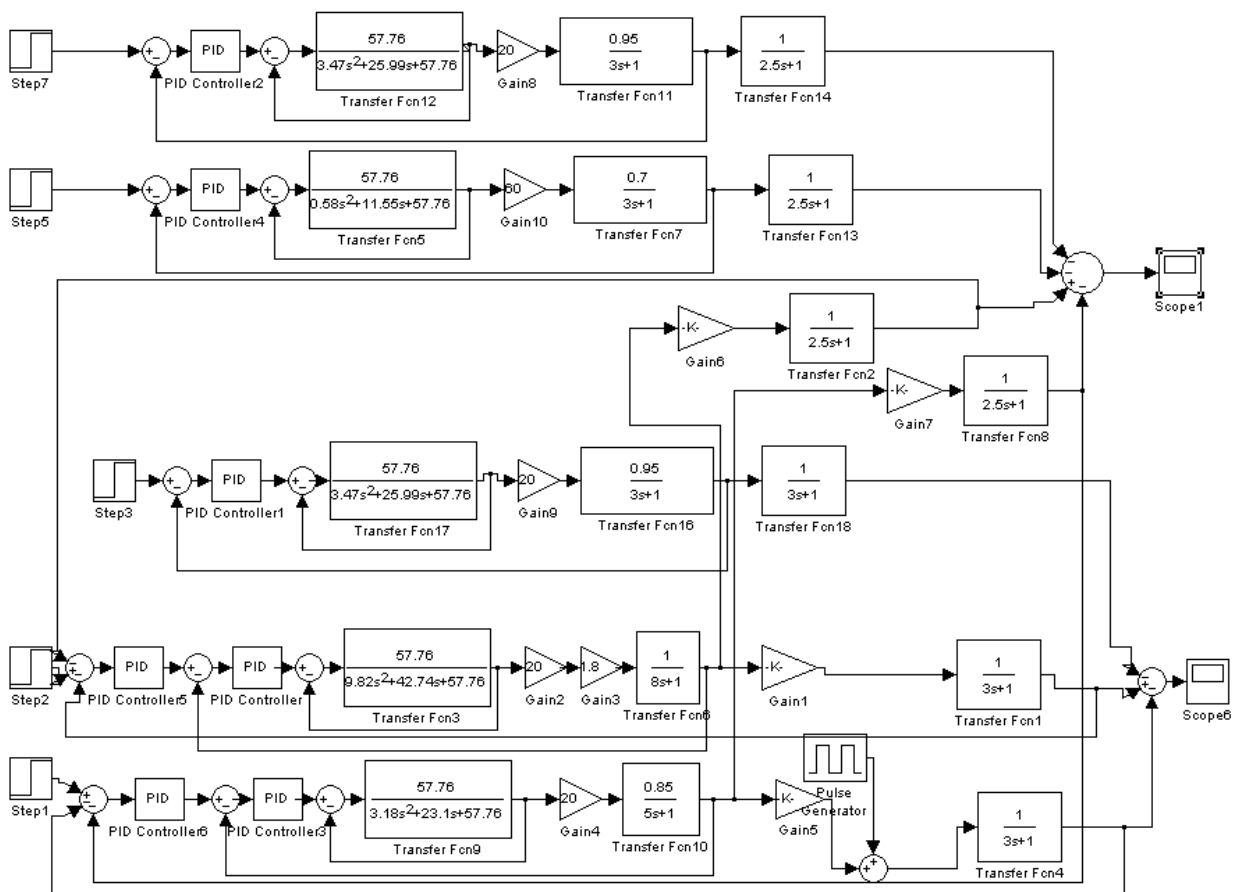


Рисунок 5 — Схема модели САУ процессом вентиляции отделения сушки кристаллов селитры

На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы. Из рис.4 видно, что суммарный сигнал не устанавливается в ноль. Физически это означает, что происходит выдувание воздуха на первом и втором этажах. Колебательный вид переходных процессов приводит к большим динамическим нагрузкам на технологическое оборудование —

электропривод и вентиляторные установки. Наблюдается значительная статическая ошибка по каналу задания (рис.4,а) и отсутствие компенсации возмущающих воздействий (рис.4,б).

Для устранения статической ошибки, улучшения динамических характеристик и компенсации возмущающих воздействий в систему вводятся ПИ-регуляторы для каждой из подсистем управления притоками и вытяжками и ПИД-регулятор для подсистемы соотношения расходов. Согласно [3,4] определены следующие настройки регуляторов:  $K=0,75$ ,  $T_i=0,06$ ,  $T_d=0,411$  (для системы П1);  $K=0,6$ ,  $T_i=0,12$  (для системы В1);  $K=0,3$ ,  $T_i=0,1$  (для системы В2);  $K=0,158$ ,  $T_i=0,0525$  (для системы В3);  $K=0,1$ ,  $T_i=0,1$  (для первого этажа);  $K=0,1$ ,  $T_i=0,1$  (для второго этажа). Модель замкнутой САУ с предложенными регуляторами приведена на рис.5.

Результаты моделирования динамических процессов в САУ вентиляцией отделения сушки кристаллов селитры при действии возмущающих воздействий приведены на рис.6, рис.7. Из рисунка 6 видно, что происходит требуемое поддержание соотношения приточного и вытяжного воздуха, находящегося в комнатах на первом и втором этажах — разность между приточным расходом воздуха и вытяжным равна нулю (рис.6, рис.7). Статическая ошибка отсутствует, переходные кривые имеют плавную апериодическую форму.

Из рис.6,а и рис.6,б видно, что возмущение расходом воздуха на первом этаже полностью компенсируется САУ как для первого этажа (рис.6,а), так и для второго этажа (рис. 6,б).

Из рис.7,а и рис.7,б видно, что возмущение расходом воздуха на втором этаже полностью компенсируется САУ как для первого этажа (рис.7,б), так и для второго этажа (рис. 7,а).

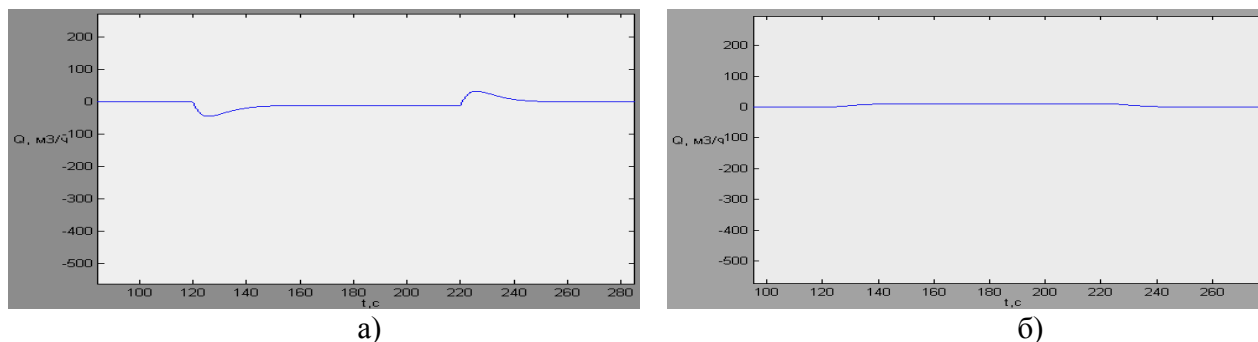


Рисунок 6 — Изменение соотношения приточного и вытяжного расходов воздуха в разработанной САУ при возмущении на первом этаже. а — первый этаж; б — второй этаж

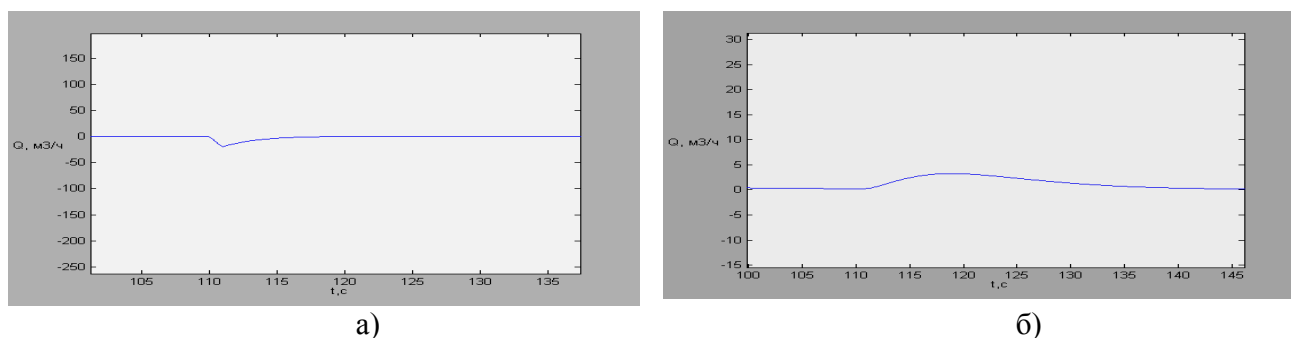


Рисунок 7 — Изменение соотношения приточного и вытяжного расходов воздуха в разработанной САУ при возмущении на втором этаже. а — второй этаж; б — первый этаж

### Выводы

1. Из анализа процесса вентиляции отделения сушки кристаллов селитры следует, что с позиции автоматического управления данный объект описывается многомерной многосвязной моделью.

2. Предложенная математическая модель процесса вентиляции позволила исследовать динамические процессы в объекте управления, по результатам которых сделан вывод о необходимости синтеза новых алгоритмов управления.

3. Для достижения требуемых показателей качества предложено использовать двухуровневую структуру САУ: нижний уровень — управление расходом воздуха каждого вентилятора, верхний уровень — управление соотношением расходов приточного и вытяжного воздуха.

4. Использование предложенных ПИ-регуляторов на нижнем уровне и ПИД-регуляторов на верхнем с соответствующими настройками позволило устранить статическую ошибку, улучшить динамические показатели качества, а также скомпенсировать возмущающие воздействия, что подтверждается результатами моделирования.

### Список использованной литературы

1. Башарин А.В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А.В. Башарин, В.А. Новиков, Г.Г. Соколовский. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 392 с.
2. Соломахова С.С. Центробежные вентиляторы: справочник / С.С. Соломахова. — М: Машиностроение, 1990 — 263с.
3. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. — М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. — 832 с.
4. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. — 911 с.

Надійшла до редакції:  
01.02.2012р.

Рецензент:  
д-р техн.наук, проф. А.А. Зорі

*R.V. Fedyun, O.V. Litvinova, V.A. Popov. Automatic Control of Process-Dependent Parameters in the Drying Section for Saltpetre Crystals. Dynamic processes in unregulated aeration system have been simulated and analysed. Functions of the introduced aeration control system are the maintenance of the difference of incoming and exhaust air on a specified level and reduction of the possible disturbances. The typical situations have been considered.*

**Keywords:** aeration system, mathematical model, inflow, exhaust ventilation, PID-control, transfer function.

*Р.В. Федюн, О.В. Литвинова, В.А. Попов. Автоматичне управління процесом вентилявання відділення сушіння кристалів селітри. Виконано моделювання та аналіз динамічних процесів в нерегульованій системі вентиляції. У функції запропонованої системи управління вентиляцією входить підтримка різниці припливного і витяжного повітря на заданому рівні і відпрацювання системою можливих збурень. Розглянуто типові режими та вплив на них збурень.*

**Ключові слова:** система вентиляції, математична модель, приплив, витяжка, ПИД-закон управління, передатна функція.

© Федюн Р.В., Литвинова Е.В., Попов В.А., 2012