Р.С. Глебов
аспирант
E-mail: mopkobka@mail.ru
М.П. Туманов
канд. техн. наук, доцент
С.С. Антюшин
аспирант
(Московский государственный институт электроники и математики)
Москва, Российская Федерация

Динамическое изменение расхода воздуха в системах вентиляции

В современных нормах и правилах проектирования и эксплуатации систем вентиляции особое внимание уделяется динамическому управлению расходом воздуха. Управление расходом воздуха позволяет повысить эффективность вентиляционной системы и сэкономить расходуемую на нагрев энергию.

В статье приводится результат исследований влияния динамического управления расходом воздуха на температурный режим системы вентиляции. Результатом исследования является математическая модель вентиляционной установки, учитывающая взаимное влияние следующих факторов: скорости вращения вентилятора, расхода воздуха, мощности калорифера, температуры обслуживаемого помещения и наружной температуры.

Ключевые слова: *"вентиляция по требованию"; динамическое управление расходом воздуха; математическая модель вентиляционной установки.*

R.S. Glebov
Postgraduate Student
E-mail: mopkobka@mail.ru
M.P. Tumanov
Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor
S.S. Antyushin
Postgraduate Student
(Moscow State Institute of Electronics and Mathematics)
Moscow, Russian Federation

Dynamic Change of a Consumption of Air in Ventilation Systems

Modern norms and rules of design and operation of systems of ventilation give special attention to dynamic management of a consumption of air. Management of a consumption of air allows to increase efficiency of ventilating system and to save energy spent for heating.

To be given in article the result of researches influence of dynamic management by a consumption of air on a temperature mode of system of ventilation. Result of research is the mathematical model of ventilating installation considering mutual influence of the following factors: speed of rotation of the fan, a consumption of air, heater capacity, temperature of a served room and external temperature.

Keywords: *"Demand-Controlled Ventilation"; dynamic management of a consumption of air; mathematical model of ventilating installation.*

Современным подходом к автоматизации зданий является синтез интегрированной системы управления. Система управления зданием (*Building Management System, BMS*) предполагает создание единой среды для мониторинга и управления разнородными инженерными системами здания, как единым объектом. Интегрированная система управления BMS является основой для реализации концепции "интеллектуального здания", которая предполагает создание энергоэффективного, комфортного и безопасного строения. Сочетание данных свойств "интеллектуального здания" достигается за счет использования современных материалов при строительстве, а также за счет инновационных технических решений и современных алгоритмов управления [1].

Необходимым условием реализации "интеллектуального здания" является использование результатов современных исследований и соблюдение требований стандартов. Динамическое управление расходом воздуха является передовой технологией современных систем вентиляции. Технология динамического управления расходом воздуха предполагает управление оборотами двигателя вентилятора по заданному критерию. Объективной предпосылкой к внедрению динамического управления расходом воздуха является значительное удешевление инверторных схем управления скоростью двигателя за счет использования все более доступных частотно-регулируемых приводов (*Variable Frequency Drives, VFD*).

Динамическое управление расходом приточного воздуха предполагает различные стратегии управления: поддержание заданного уровня концентрации углекислого газа; поддержание заданного давления в распределительном воздуховоде; охлаждение обслуживаемого помещения за счет изменения расхода воздуха; а также управление расходом воздуха в зависимости от количества людей в обслуживаемой зоне (“вентиляция по требованию”, англ. “*Demand-Controlled Ventilation*”, DCV) [2, 3]. Подробно технология “вентиляция по требованию” описана в стандарте ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004 (п. 6.2.7).

Применение технологии динамического расхода приточного воздуха позволяет улучшить климатические параметры и сэкономить энергоресурсы. Снижение энергопотребления системы вентиляции происходит за счет подготовки (нагрева, увлажнения) необходимого объема воздушной массы, отобранной с улицы.

Основной проблемой синтеза систем управления для вентиляционных установок с переменным расходом воздуха является то, что вне зависимости от выбранной стратегии управления расходом приточного воздуха, изменение скорости вращения вентилятора ведет к переходным процессам в контуре управления температурным режимом. Переходные процессы в контуре управления температурой являются следствием изменения объема подготавливаемой воздушной массы.

Современная практика применения систем с переменным расходом воздуха не учитывает влияние скорости вращения вентилятора на температурный режим, за исключением закрытых коммерческих разработок. Подобное упрощение систем управления приводит к значительному ухудшению качества функционирования системы вентиляции, а в некоторых случаях к незатухающим переходным процессам в контуре управления температурой.

В данной статье приводиться результат экспериментальных исследований влияния управления расходом воздуха (скоростью вращения вентилятора) на температурный режим системы вентиляции с учетом наружной температуры воздуха.

Целью исследований было получение математической модели вентиляционной установки с динамическим управлением приточным вентилятором и синтеза на ее основе системы управления с компенсацией влияния переменного расхода воздуха на температурный режим. Исследования проводились в предположении, что вентиляционная установка представляет собой “черный ящик”. Входные параметры математической модели следующие:

Y_1 – управляющее воздействие на калорифер;

Y_2 – управляющее воздействие на двигатель (частоту вращения вентилятора);

W_1 – температура наружного воздуха.

Выходные параметры модели:

X_1 – температура подаваемого воздуха;

X_2 – расход воздуха.

Динамическое изменение режимов
(Выдержка из стандарта 62.1-2004)

6.2.7. Динамическое изменение режимов. Система может проектироваться с учетом изменения расхода свежего воздуха (Vot) и/или расхода воздуха, подаваемого в рабочую или обслуживаемую зону в зависимости от изменяющейся обстановки. Указанное изменение обстановки включает в себя следующие случаи, которые, однако, не исчерпывают все возможные варианты:

- *Изменение количества людей, присутствующих в одной или более индивидуальных зонах, а также потребного удельного расхода воздуха на человека, в соответствии с чем меняются требования по расходу свежего воздуха.*
- *Замечание: Примерами измерений, регистрирующих подобные изменения, являются следующие: дневное расписание, прямой подсчет количества людей, а также оценка количества присутствующих людей или удельного расхода свежего воздуха на человека с использованием датчиков, таких как, например, датчики концентрации* CO_2.
- *Изменение эффективности воздухораспределения при различных расходах воздуха и температурах.*

Более высокая доля свежего воздуха на притоке, благодаря забору дополнительного количества свежего воздуха в целях свободного охлаждения или компенсации вытяжки.

В качестве метода экспериментального исследования был выбран метод активной идентификации, с управляющим воздействием “ступенька”[5]. Исследования проводились по следующему алгоритму:

1. Измерялось значение температуры наружного воздуха (эксперименты проводились в диапазоне наружных температур –20…+20 °С).

2. Начальная скорость вращения вентилятора и мощность калорифера устанавливались равными 630 об/мин и 5,1 кВт (30 % от своих максимальных значение 2100 об/мин и 17 кВт), ожидалось завершение переходных процессов в системе вентиляции.

3. После окончания переходных процессов скорость вращения вентилятора увеличивалась с 630 до 2100 об/мин (с 30 до 100 %) и фиксировалась переходная характеристика изменения температуры в приточном канале.

Результаты эксперимента по исследованию влияния расхода воздуха (скорости вращения вентилятора) на температурный режим в системах вентиляции приведены на рисунке 1 (результаты приведены к нулевым начальным условиям).

Анализ результатов показывает, что температурный режим системы вентиляции зависит от изменения расхода воздуха. По графику (рис. 1) видно,

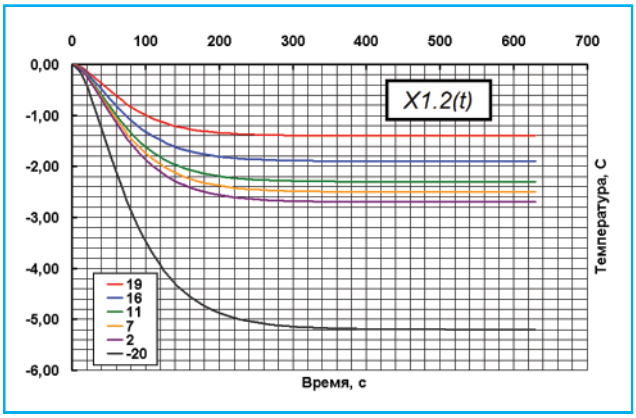

Рис. 1. Зависимость температуры приточного воздуха от расхода воздуха (скорости вращения вентилятора) при различных уличных температурах

что при фиксированном значении уличной температуры зависимость между передаточной функцией по расходу воздуха ($W_{расх}$) и передаточной функцией по температуре ($W_{темп}$) описывается инерционным звеном ($W_{РТ}$) – линейным дифференциальным уравнением. Температура наружного воздуха имеет нелинейное влияние на передаточную функцию зависимости температуры помещения от расхода воздуха ($W_{РТ}$). Представив нелинейное влияние наружной температуры в виде блока $W_{НРТ}$ получим, что общая структура математической модели вентиляционной установки с динамическим управлением скоростью вентилятора имеет структуру, представленную на рисунке 2. Передаточная функция по температуре $W_{темп}$ является инерционным звеном с запаздывание [4] как у любого теплового процесса (в рамках статьи не рассматривается). Передаточная функция расхода воздуха ($W_{расх}$) зависит от стратегии управления, в нашем случае управление будет осуществляться по запросу оператора на изменение расхода приточного воздуха. В этом случае передаточная функция $W_{расх}$ – это зависимость объема подаваемого воздуха от скорости вращения: $W_{расх} = K_{ПО} \cdot K_{ОС} \cdot S_{канала}$, где $K_{ПО}$ – коэффициент пересчета из процентов в обороты, $K_{ос}$ – коэффициент пересчета оборотов в скорость воздушного потока на выходе вентилятора, $S_{канала}$ – площадь сечения воздухораспределительного канала.

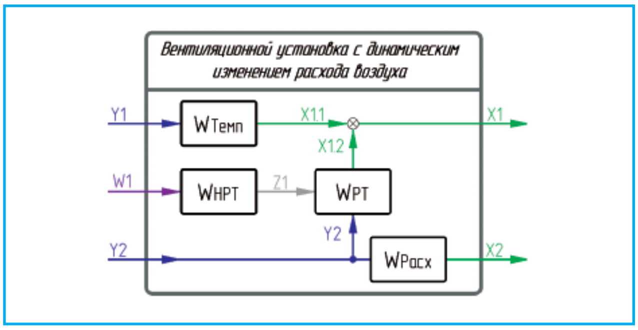

Рис. 2. Структура математической модели вентиляционной установкой с технологией DCV

Аппроксимация *S*-образной характеристики [5] влияния расхода воздуха на температуру помещения ($W_{РТ}$) проводилась передаточной функцией вида:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{(T_{об}p+1)^m} \cdot e^{-\tau_{об}p}.$$

Результаты параметрической идентификации передаточной функции $W_{РТ}$ (табл. 1 и рис. 3) показывают, что с повышением наружной температуры влияние расхода воздуха (скорости вращения вентилятора) на температурный режим уменьшается – уменьшается абсолютное значение коэффициента усиления, а скоротечность переходного процесса увеличивается – уменьшается постоянная времени $W_{РТ}$. Влияние скорости двигателя на контур

Таблица 1

Результаты параметрической идентификации передаточной функции $W_{РТ}$

Наружная температура (°C)	Коб	Тоб	τоб	m	Начальные условия (°C)	Точность идентификации (%)
+19	-0,020	45,73	0,00	2	39,90	3,58
+16	-0,027	53,61	0,57	2	39,20	5,93
+11	-0,033	51,02	0,00	2	33,50	3,03
+7	-0,036	53,61	0,00	2	29,30	2,57
+2	-0,039	55,31	0,00	2	27,40	4,34
-20	-0,074	63,64	0,00	2	18,20	2,39

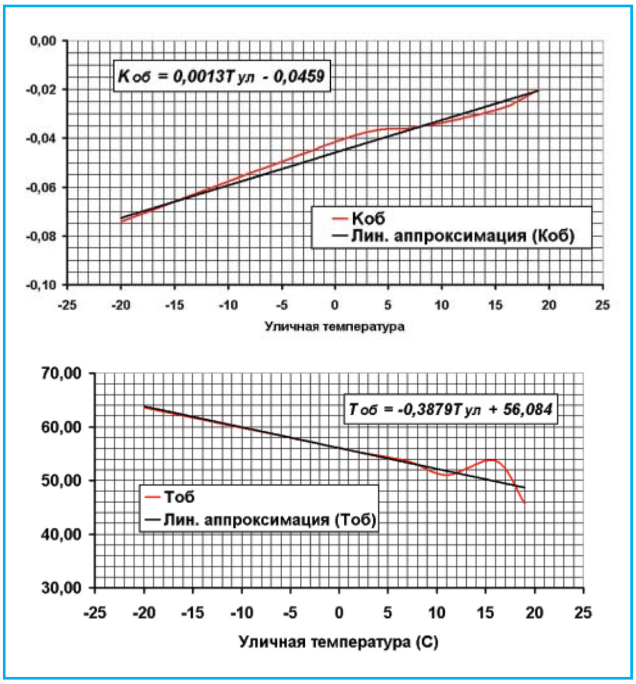

Рис. 3. Зависимость параметров передаточной функции $W_{РТ}$ от уличной температуры

управления температурой практически отсутствует, если разница между наружной и внутренней температурой воздуха относительно мала (≈ 20,9 °С). В этом случае реакция контура управления температурой (при изменении скорости двигателя от 630 до 2100 об/мин) составляет 1,4 °С. При значительной разнице между наружной и внутренней температурой воздуха (≈ 38,2 °С), изменение скорости двигателя (630…2100 об/мин) уменьшает температуру воздуха в помещении на 5,2 °С, что соответствует 26 % диапазона задающего воздействия в контуре управления температурой (+15…+35 °С).

Графики зависимости параметров передаточной функции $W_{\text{РТ}}$ от уличной температуры (рис. 3) показывают, что зависимость параметров передаточной функции $W_{\text{РТ}}$ от наружной температуры практически линейна и выражается следующими формулами (блок $W_{\text{НРТ}}$):

$$K_{\text{об}}(T_{\text{ул}}) = 0{,}0013 \cdot T_{\text{ул}} + 0{,}0459,$$

$$T_{\text{об}}(T_{\text{ул}}) = -0{,}3879 \cdot T_{\text{ул}} + 56{,}084.$$

Результаты исследования системы вентиляции с переменным расходом воздуха (с динамическим управлением скоростью вентилятора) показали, что температура приточного воздуха зависит не только от нагревательного элемента, но и от скорости вращения вентилятора. Влияние скорости вентилятора на температурный режим описывается нелинейным дифференциальным уравнением, коэффициенты которого зависят от наружной температуры. По результатам исследования можно сделать вывод, что для сохранения критериев качества управления во всем эксплуатационном диапазоне система вентиляции с переменным расходом воздуха должна учитывать следующие факторы:

- *Стратегия управления расходом воздуха.* От стратегии управления зависят периодичность и амплитуда изменения скорости вращения вентилятора. Если стратегия предусматривает незначительные изменения расхода, то их влияние на температурный режим будут малы и успешно скомпенсируется ПИД регулятором в контуре управления температурой воздуха.
- *Скорость вращения вентилятора.* По значению данного параметра можно вводить дополнительное слагаемое к управлению калорифером, которое будет в дополнение к ПИД регулятору компенсировать возмущения вызванные изменением расхода воздуха.
- *Температура наружного воздуха.* Температура наружного воздуха позволяет однозначно определить точные значения параметров передаточной функции $W_{\text{РТ}}$, которая описывает взаимное влияние температуры приточного воздуха и скорости вращения двигателя.

Использование систем вентиляции с динамическим управлением скоростью вентилятора позволяет: повысить энергоэффективность вентиляционной установки; улучшить микроклимат в обслуживаемом помещении; создать эффективные системы динамического распределения воздуха; охлаждать обслуживаемые помещения за счет изменения расхода воздуха [2, 3]. Для сохранения критериев качества управления во всем диапазоне эксплуатации систем вентиляции с переменным расходом требуется учет скорости вращения двигателя и наружной температуры воздуха. Системы вентиляции с переменным расходом воздуха, без учета данных параметров, значительно ухудшают показатели качества системы управления в зимний период эксплуатации, поскольку взаимное влияние контуров управления усиливается. Наружная температура воздуха характеризует величину взаимного влияния контура управления расходом приточного воздуха и контура управления температурой в помещении.

Разработанная математическая модель была использована для синтеза регулятора системы управления вентиляционной установкой П1В1 в УМЦ "АРМО-ГРУПП", обслуживающей

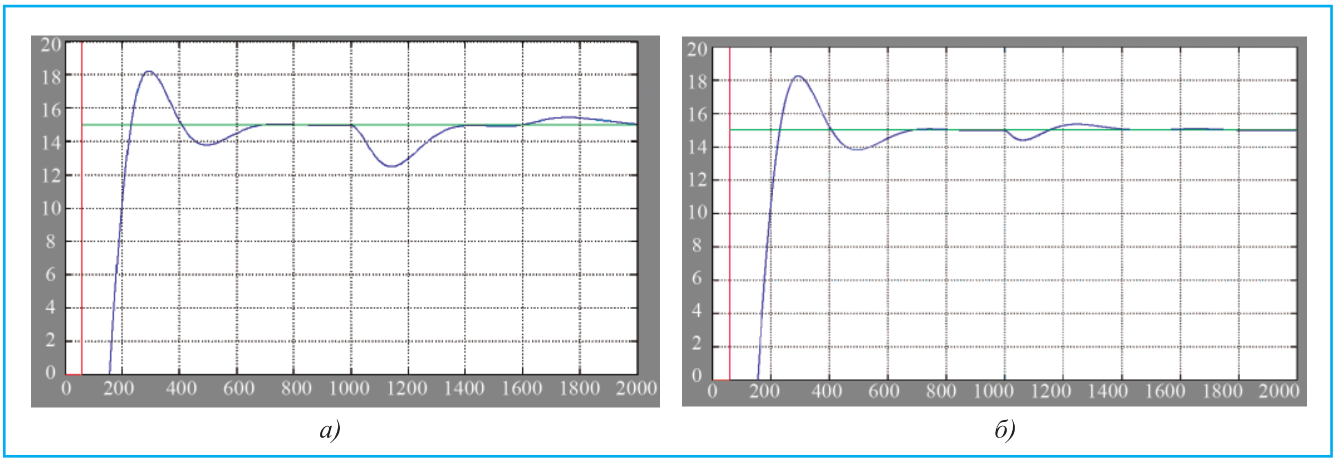

Рис. 4. Переходной процесс в контуре управления температурным режимом. Параметры системы: уличная температура –20 °С; уставка температуры 14,5 °С (В момент времени 1000 с происходит изменение уставки концетрации СО2 с 550 до 500 ppm: а) без использования компенсации, б) с использованием компенсации

Таблица 2.

Оценка результатов работы компенсатора при динамическом изменении скорости вращения вентилятора (управление концентрацией углекислого газа)

Критерий качества	*без использования компенсатора*	*с использования компенсатора*
Установившееся значение ошибки	*0,149*	*0,015*
Время последнего выхода за 5% зону от заданного значения	*1289,00*	*573,20*
Интеграл абсолютного значения ошибки	*8485,34*	*7508,95*

лекционный класс. Вентиляционная установка в режиме реального времени управляет температурой приточного воздуха и концентрацией углекислого газа в помещении. Нагрев приточного воздуха в системе вентиляции осуществляется электрическим калорифером (17 кВт), для управления расходом воздуха используется двигатель (0,3 кВт, 2100 об/мин) с частотно-регулируемым приводом. В алгоритме управления системой вентиляции применяется блок компенсации, который использует представленную математическую модель для коррекции сигнала управления калорифером. Применение этого метода позволило уменьшить интеграл ошибки управления в 1,12 раза (на 12 %) и обеспечить работу системы в 5 %-ой зоне от заданного значения (рис. 4 и табл. 2).

Перерегулирование в контуре управления температурным режимом, вызванное изменением работы вентилятора со стандартным ПИД регулятором без блока компенсации, составляет 3,50 °С (наружная температура –20 °С), а с использованием блока компенсации, выполненного на базе представленной математической модели, перерегулирование составляет 0,50 °С.

Список литературы

1. Табунщиков Ю. А. Интеллектуальные здания // *АВОК*, 2001, № 3. С. 6–14.
2. *Standard 62.1-2004*. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (ANSI Approved). ANSI/ASHRAE 62.1-2004.
3. В библиотеку проектировщика. Технологии DCV в системах вентиляции // *Мир климата*, № 43. Перевод и адаптация Е.П. Вишневсковский, М.М. Короткевич по материалам журнала ASHRAE (Dennis Stanke, Standard 62.1-2004 System Operation: Dynamic Reset Options).
4. Бондарь Е.С., Гордиенко А.С., Михайлов В.А., Нимич Г.В. *Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха* / Под общ. ред. Е.С. Бондаря. К.: Издательство: ТОВ “Видавничий будино “Аванпост-Прим”. 2005. С. 101–103, 104–120.
5. Льюнг Л. *Идентификация систем. Теория для пользователей.* Перевод с англ. под редакцией Я.З. Цыпкина. М.: Наука. 1991. 432 с.

References

1. Tabunshchikov Yu. A. Intellektualnye zdaniya [Intelligent Buildings]. AVOK, 2001, no. 3, pp. 6–14.
2. *Standard 62.1-2004*. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (ANSI Approved). ANSI/ASHRAE 62.1-2004.
3. V biblioteku proektirovshchika. Tekhnologii DCV v sistemakh ventilyatsii [The library designer. DCV technology in ventilation]. *Mir klimata* [World Climate], no. 43. Perevod i adaptatsiya E.P. Vishnevskovskiy, M.M. Korotkevich po materialam zhurnala ASHRAE [Translation and adaptation of HE Vishnevskovsky, MM Korotkevich based on ASHRAE Journal (Dennis Stanke, Standard 62.1-2004 System Operation: Dynamic Reset Options)].
4. Bondar E.S., Gordienko A.S., Mikhaylov V.A., Nimich G.V. *Avtomatizatsiya sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Automation of ventilation and air-conditioning]. Pod obshch. red. E.S. Bondarya [Ed.: E.S. Bondarya]. Kiev: Izdatelstvo:TOV “Vidavnichiy budino “Avanpost-Prim” [Kiev: publishing house TOV “Vidavnichiy budino “Avanpost-Prim”]. 2005, pp. 101–103, 104–120.
5. Lyung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya polzovateley* [Identification systems. The theory for the users]. Perevod s angl. pod redaktsiey Ya.Z. Tsypkina [Translated from English, edited by Ya.Z. Tsypkina]. M.: Nauka [Moscow: Science]. 1991. 432 p.

Информация об авторах

Глебов Роман Сергеевич, аспирант
E-mail: mopkobka@mail.ru
Туманов Михаил Петрович, канд. техн. наук, доцент
E-mail: miketum@mail.ru
Антюшин Святослав Сергеевич, аспирант
E-mail: slavaant@mail.ru
Московский государственный институт электроники и математики
109028, Москва, Российская Федерация, Б. Трехсвятительский переулок, д. 3.

Information about the authors

Glebov Roman Sergeevich, Postgraduate Student
E-mail: mopkobka@mail.ru
Tumanov Mikhail Petrovich, Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor
E-mail: miketum@mail.ru
Antyushin Svyatoslav Sergeevich, Postgraduate Student
E-mail: slavaant@mail.ru
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics
109028, Moscow, Russian Federation, B. Trehsvyatitelsky lane, 3.