

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 62-543.2:624.191.94

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТОННЕЛЬНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Д. В. Зедгенизов, Н. А. Попов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: popov@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Приведены результаты натурального эксперимента по регулированию частоты вращения ротора модернизированного вентилятора ВОМД-24 при влиянии поршневого действия поездов на его производительность. Дана оценка степени уменьшения фактического расхода воздуха на пассажирской платформе станции метрополитена вследствие снижения производительности вентилятора при разной интенсивности движения поездов на линии. Предложены алгоритм регулирования частоты вращения ротора тоннельного вентилятора метрополитена в течение суток в соответствии с интенсивностью движения поездов и структурная схема автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора от преобразователя частоты.

Тоннельный вентилятор, частота вращения ротора, расход воздуха, поршневое действие поездов

DOI: 10.15372/FTPRPI20180414

Актуальной задачей систем тоннельной вентиляции метрополитенов является обеспечение требуемых микроклиматических параметров воздушной среды в пассажирских и служебных помещениях станций. Важнейший параметр микроклимата в подземных сооружениях метрополитена — объемный расход воздуха, проходящего через пассажирские помещения станций и путевые тоннели. От величины расхода воздуха напрямую зависит содержание вредных веществ в метрополитене (микробиологическая обсемененность воздуха, пыль, влага, углекислый газ и т. д.). Выделение вредных веществ в метрополитене обусловлено рядом факторов и меняется в зависимости от пассажиропотока, времени суток, сезона года и т. д. Требуемый расход воздуха на станциях регламентируется нормативным документом [1]. Для обеспечения требуемого расхода воздуха в метрополитенах установлены тоннельные вентиляторы. В [2, 3] показано, что расход воздуха на станции зависит не только от производительности вентилятора, но и подвержен нескольким возмущающим воздействиям, основным из которых является поршневое действие поездов (ПДП).

В зарубежной практике управления вентиляцией метрополитенов основные проблемы штатного проветривания решены с использованием CFD-моделирования воздушных потоков, значительным объемом натуральных экспериментов, оптимизацией алгоритмов локального автоматиче-

ского управления вентиляторами, заслонками и калориферами, а также внедрением надежных и точных приборов мониторинга параметров микроклимата [4, 5]. В настоящее время зарубежные исследователи большое внимание уделяют управлению вентиляцией при пожарах и других чрезвычайных ситуациях. Проектируются и внедряются современные дорогостоящие системы обеспечения безопасности пассажиров (специальная конструкция тоннелей, обустройство дополнительных эвакуационных тоннелей, отдельная система аварийной вентиляции и др.), проводятся испытания средств и алгоритмов аварийного управления проветриванием.

Однако в России не могут быть использованы в полной мере результаты исследований зарубежных ученых, в том числе по причине отсутствия в мире опыта эксплуатации метрополитенов в условиях мелкого заложения и холодного резко континентального климата. К таким метрополитенам относится метрополитен г. Новосибирска. Его специфической особенностью является аэродинамическая связь микроклиматических параметров воздуха в подземных тоннелях с атмосферным воздухом. Поршневое действие поездов, движущихся по линиям метрополитена, тоннели которого расположены вблизи поверхности, приводит к существенному воздухообмену между помещениями метрополитена и атмосферой, что в меньшей степени наблюдается при глубоком заложении станций [6]. Движение воздуха в метрополитенах мелкого заложения инициировано совместным действием станционных тоннельных вентиляторов и поездов, однако часть его замыкается между путевыми тоннелями через циркуляционные вентиляционные сбойки и в воздухообмене на станции не участвует [7, 8]. Для обеспечения требуемого нормативными документами расхода воздуха на станциях тоннельные вентиляторы вынуждены работать с повышенной производительностью, а следовательно, и энергопотреблением.

Автоматическое регулирование частоты вращения ротора тоннельного вентилятора в соответствии с текущей потребностью станции в воздухе может существенно снизить эксплуатационные расходы на вентиляцию линий метрополитена.

Задача повышения эффективности управления тоннельными вентиляторами метрополитена с учетом специфических условий мелкого заложения тоннелей на примере г. Новосибирска — весьма актуальна. Она может быть решена путем создания автоматических систем управления тоннельными вентиляторами на базе современных частотно-регулируемых приводов переменного тока (бесконтактных преобразователей частоты тока статора электродвигателя). Внедрение таких систем показало, что при снижении частоты вращения ротора тоннельного вентилятора поршневое действие поездов, проходящих мимо вентиляционной камеры, снижает расход воздуха через вентилятор, в некоторых случаях до опрокидывания струи, что может ставить под угрозу поддержание нормируемых микроклиматических параметров воздушной среды в метрополитене.

Цель настоящей работы — оценка степени снижения расхода воздуха, проходящего через вентилятор, находящийся под влиянием ПДП и разработка алгоритма для автоматической стабилизации расхода воздуха на платформе станции метрополитена мелкого заложения в условиях резко континентального климата Сибири. Движение поездов по тоннелям метрополитена приводит и к превышению расхода воздуха через вентилятор, относительно требуемого значения. Однако для обеспечения безопасности подземных пассажирских перевозок необходимо в первую очередь не допускать существенного снижения исследуемого параметра.

Стабилизация требуемого часового расхода воздуха через осевой станционный вентилятор метрополитена мелкого заложения, работающий при аэродинамических возмущениях от поездов, может быть достигнута автоматическим регулированием частоты вращения. Это выполняется в соответствии с алгоритмом, при котором сигнал задания производительности вентилятора на следующий такт управления формируется с учетом недостатка воздуха, вычисленного на предшествующем такте.

Предложено оценивать изменение объема воздуха, подаваемого стационарным тоннельным вентилятором на платформу несколько раз за 1 ч (несколько тактов управления), и регулировать частоту вращения вентилятора один раз за каждый такт управления в соответствии с недостатком воздуха, вычисленным на предыдущем такте, используя для этого два набора коэффициентов регулятора.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований — модернизированный тоннельный вентилятор ВОМД-24 с диаметром рабочего колеса 2400 мм, установленный в стационарной вентиляционной камере станции “Октябрьская” Новосибирского метрополитена. Ротор вентилятора после модернизации приводился во вращение асинхронным электродвигателем 4АМ315М12 мощностью 55 кВт. Для изменения частоты вращения ротора использовался преобразователь частоты Altivar 61 с выходной частотой тока 0.5 – 500 Гц. Схема участка вентиляционной сети метрополитена приведена на рис. 1. Схема установки измерительного оборудования в вентиляционной камере метрополитена во время проведения экспериментов показана на рис. 2.

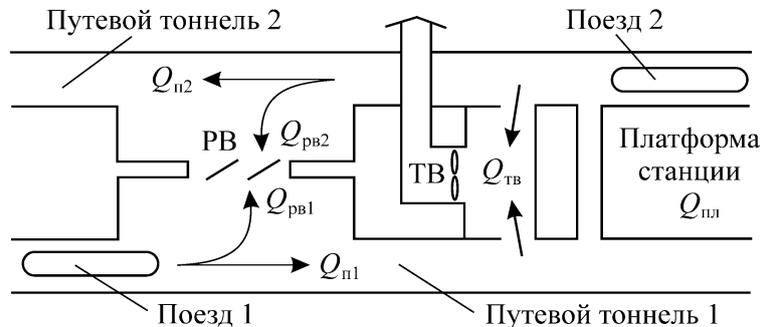


Рис. 1. Схема типового участка метрополитена в момент расположения поездов перед вентиляционной сбойкой: $Q_{п1}$, $Q_{п2}$ — расход воздуха, вызванный поршневым действием поезда, поступающий из тоннеля на платформу станции; $Q_{рв1}$, $Q_{рв2}$ — расход воздуха через регулятор воздухораспределения; $Q_{пл}$ — расход воздуха через платформенный зал станции; $Q_{тв}$ — расход воздуха через тоннельный вентилятор; РВ — створчатый регулятор воздухораспределения

Эксперимент проводился при двух частотах тока, питающего электродвигатель вентилятора: 18 Гц (ограничивается максимальной допустимой по условиям токовой перегрузки преобразователя частоты скоростью вращения вентилятора, расход воздуха на этой частоте $50 \text{ м}^3/\text{с}$) и 10 Гц (составляет 55% от максимально допустимой скорости вращения вентилятора, расход воздуха $27.5 \text{ м}^3/\text{с}$). Указанные расходы воздуха являются требуемыми значениями производительности тоннельного вентилятора в отсутствии движения поездов в метро. Соответствие частоты тока электродвигателя и расхода воздуха вентилятора, использованные в эксперименте, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Соотношение расхода воздуха вентилятора и частоты тока электродвигателя

Частота тока f , Гц	Расход воздуха Q	
	$\text{м}^3/\text{с}$	%
18	50	100
16	44.1	88
14	38.6	77
12	33	66
10	27.5	55
7	19.1	38.2
2.5	7	14

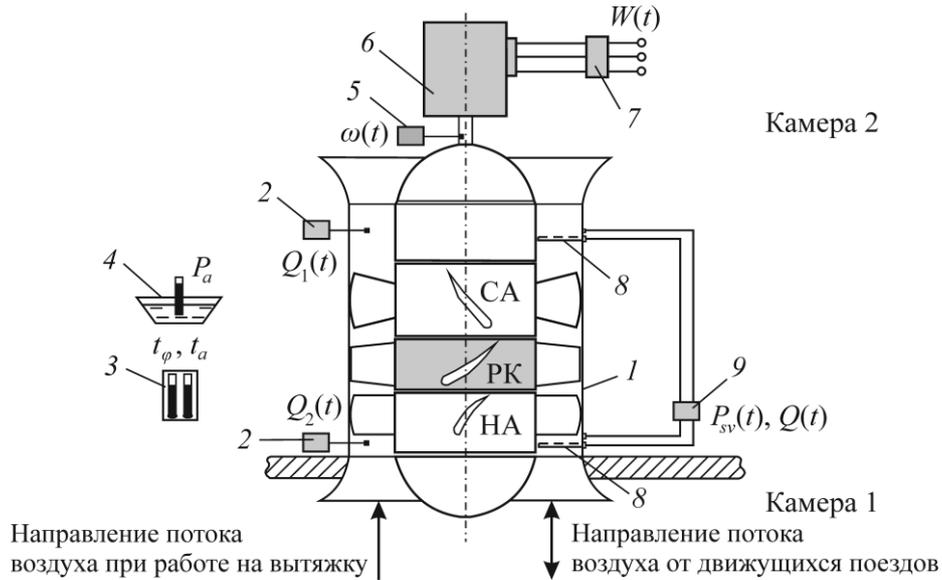


Рис. 2. Схема установки контрольно-измерительного оборудования в ходе проведения эксперимента: 1 — корпус вентилятора ВОМД-24; 2 — термоанемометр; 3 — психрометр; 4 — барометр; 5 — цифровой тахометр; 6 — электродвигатель вентилятора; 7 — электронный ваттметр; 8 — осредняющий насадок; 9 — цифровой дифференциальный манометр; СА — спрямляющий аппарат; РК — рабочее колесо; НА — направляющий аппарат (шибер)

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Серия экспериментов проводилась в различное время суток при нескольких интенсивностях движения поездов на линии метрополитена. На рис. 3 представлены изменения расхода воздуха через вентилятор при требуемой его производительности 27.5 (10 Гц) и 50.0 м³/с (18 Гц). Интенсивность движения поездов в этой серии опытов составляла 7 и 15 пар за 1 ч.

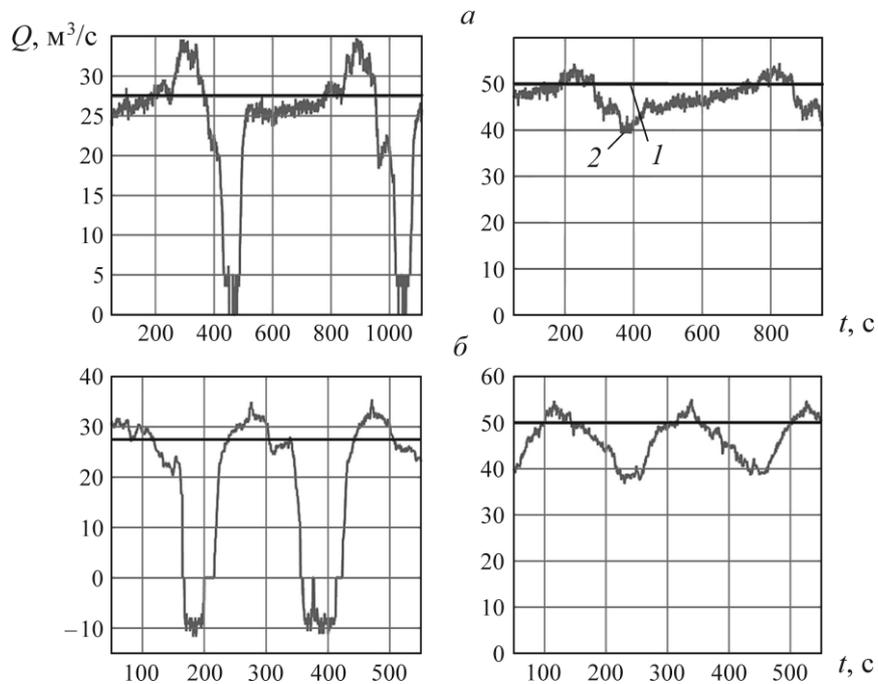


Рис. 3. Расход воздуха через вентилятор за 1 ч при интенсивности движения 7 пар поездов (а) и 15 пар поездов (б) при производительности вентилятора 27.5 и 50.0 м³/с: 1 — требуемая производительность вентилятора; 2 — фактический расход через вентилятор

Анализ данных эксперимента показал, что поршневое действие поездов, подходящих к вентиляционной камере, вызывает увеличение расхода воздуха через вентилятор, работающий в режиме удаления воздуха со станции. Как только поезда удаляются от вентиляционной камеры по тому или иному пути, расход воздуха снижается, что особенно заметно на пониженных частотах вращения ротора вентилятора. Контроль частоты вращения ротора вентилятора проводили с помощью цифрового тахометра. Отмечено, что для фиксированной частоты тока статора под действием ПДП значительного изменения частоты вращения ротора не происходит. Активная мощность, потребляемая электродвигателем вентилятора, в ходе эксперимента меняется пропорционально расходу воздуха.

Для исследования влияния поршневого действия поездов на управление проветриванием станции составлен типовой график изменения расхода воздуха через вентилятор при движении подвижного состава метрополитена (рис. 4).

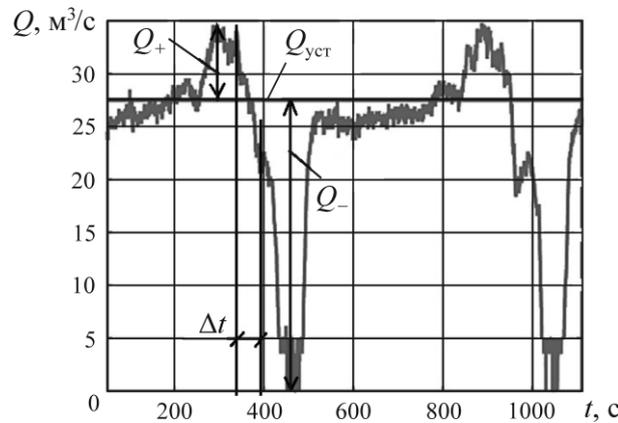


Рис. 4. Изменение расхода воздуха через вентилятор при поршневом действии поездов: Q_+ , Q_- — максимальное и минимальное амплитудные значения расхода воздуха, проходящего через вентилятор, $\text{м}^3/\text{с}$; Δt — разность во времени между прохождением поезда 1 и поезда 2 мимо вентиляционной камеры, с; $Q_{уст}$ — установившееся (требуемое) значение производительности вентилятора без влияния поездов, $\text{м}^3/\text{с}$

Оценить разброс амплитудных значений Q_+ и Q_- в зависимости от интервала времени Δt (в относительных величинах) можно по графику на рис. 5. Выявлено, что амплитуда колебаний производительности вентилятора зависит не от интенсивности движения поездов, как предполагалось до экспериментов, а определяется временем между проходами обоих поездов мимо вентиляционной камеры. При увеличении Δt отклонение фактического расхода воздуха через вентилятор от его установившегося значения снижается, а наибольшее снижение расхода воздуха наблюдается при одновременном прохождении поездов мимо вентиляционной камеры.

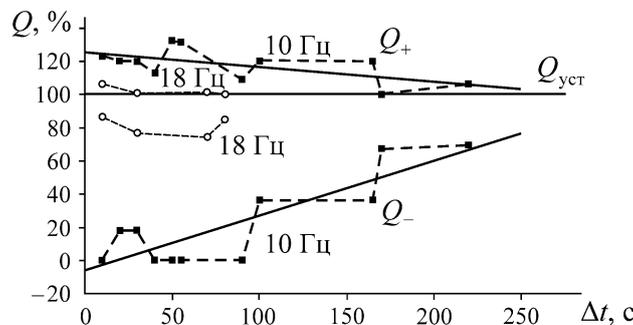


Рис. 5. Изменение расхода воздуха Q_+ и Q_- , проходящего через вентилятор при поршневом действии поездов, в зависимости от интервала времени Δt

Для того чтобы оценить степень влияния поездов на производительность частотно-регулируемого тоннельного вентилятора, вычисляли объемы воздуха V , проходящего через тоннельный вентилятор при поршневом действии движущихся поездов метро (рис. 3). Отдельно оценивались объемы воздуха, превышающие установившееся значение производительности вентиляторов без влияния поездов, а также объемы, соответствующие снижению фактического расхода вентилятора. На рис. 6 показано изменение указанных величин в зависимости от промежутка времени Δt между проходами поездов мимо вентиляционной камеры при различной интенсивности движения поездов (7, 12 и 15 пар поездов на линии за 1 ч) при максимальной и минимальной частоте вращения ротора вентилятора.

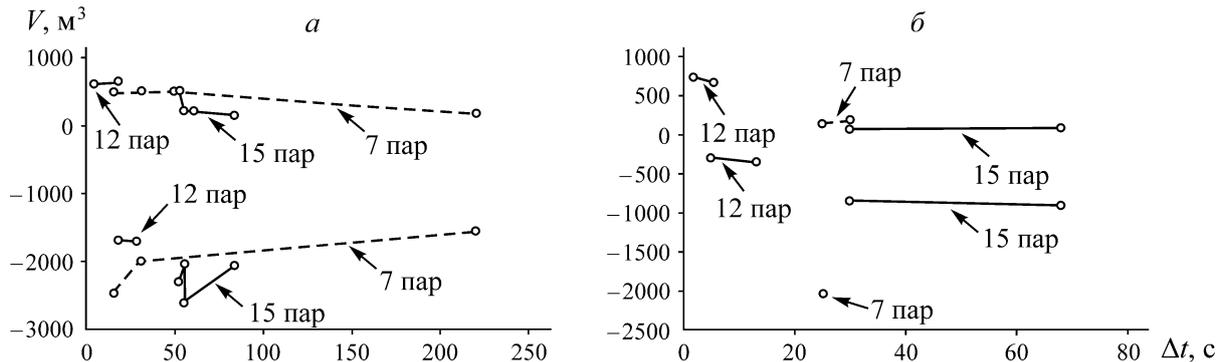


Рис. 6. Изменение объемов воздуха, проходящих через вентилятор при различной интенсивности движения поездов, при производительности вентилятора 27.5 (а) и 50.0 м³/с (б)

Поршневое действие поездов снижает объем воздуха, проходящего через стационарный тоннельный вентилятор, работающий на вытяжку, в диапазоне от 1000 до 2600 м³ за одну встречу поездов. Это эквивалентно снижению производительности вентилятора с 8 до 39.3%. Снижение объема воздуха в основном определяется случайной комбинацией встречных поездов, прошедших за определенный период мимо вентиляционной камеры, и частотой вращения вала вентилятора.

Снижение расхода воздуха Q_- через вентилятор зависит от скорости вращения ротора вентилятора (рис. 7). Сплошная линия — экспериментальные данные, штриховая — предполагаемая линия, построенная на основании интерполяции. Погрешность имеющихся средств измерения расходов при частоте тока двигателя 10 Гц не позволила корректно определить глубину снижения расхода. Предположительно, эта точка должна находиться на штриховой линии (показано стрелкой).

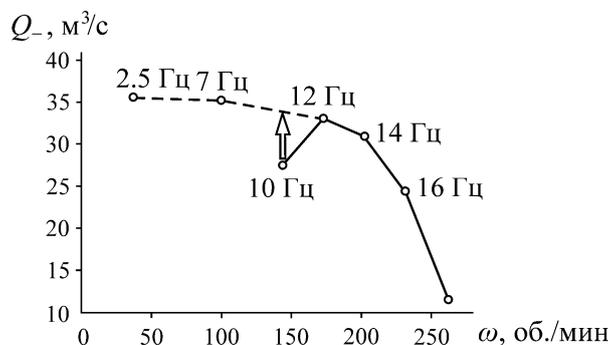


Рис. 7. Изменение минимального амплитудного значения расхода воздуха, проходящего через вентилятор Q_- , при различной частоте вращения ротора ω

Видно, что при уменьшении скорости вращения ротора поршневое действие поездов существенно снижает заданную производительность вентилятора. График на рис. 7 в дальнейшем может использоваться для оценки максимально допустимой глубины регулирования частоты вращения ротора вентилятора.

АЛГОРИТМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРА

Способность системы автоматического регулирования компенсировать снижение расхода воздуха через тоннельный вентилятор при высокой интенсивности движения снижает-ся. Для исследуемого объекта в соответствии с интенсивностью движения поездов предложен алгоритм регулирования производительности тоннельного вентилятора метрополитена, основные данные для которого представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Данные для алгоритма регулирования производительности вентилятора, м³/с

Интенсивность движения поездов, пар/ч	$Q_{\text{норм}}$ на чел./ч	$Q_{\text{пл}}$	$Q_{\text{тв}}$	Способ регулирования
0	—	7	11	Вентилятор работает с постоянной минимальной частотой вращения
7	30	7	11	Вентилятор выключен, шиберующие аппараты открыты
12	30	17	27	Автоматическое управление частотой вращения ротора 1 раз в 15 мин с учетом предыдущего такта
15	50	42	78	Вентилятор работает с максимальной частотой вращения ротора

В отсутствии движения поездов вентилятор поддерживает минимальный расход воздуха, необходимый по требованиям строительных норм и правил [1]. При низкой интенсивности движения поездов их поршневое действие способно обеспечить требуемое проветривание пассажирских помещений станции без включения вентилятора, поскольку в этом случае снизилась бы частота вращения вала, а проходящие поезда существенно уменьшили расход вентилятора. Поэтому при интенсивности движения поездов около 7 пар за 1 ч работа вентилятора нецелесообразна, он должен быть выключен, а его шиберующие аппараты открыты для свободного пропуска воздуха через установку. При высокой интенсивности движения поездов предлагается переводить вентилятор в режим автоматического поддержания требуемого часового расхода воздуха с регулированием его производительности не более 4 раз за 1 ч с учетом недостатка воздуха, вычисленного на предыдущем такте управления. В часы пик вентилятор переводится на работу с максимальной производительностью. Процесс численного моделирования автоматического регулирования расхода воздуха через вентилятор при максимальном возмущающем воздействии и интенсивности движения 12 пар поездов за 1 ч представлен на рис. 8. Заданная частота вращения ротора вентилятора меняется не более 3 раз за 1 ч и не превышает максимально допустимого значения (рис. 9).

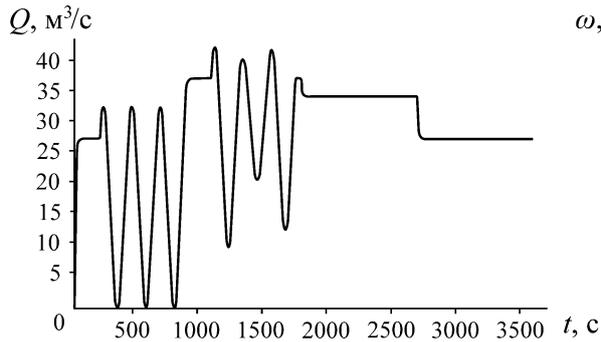


Рис. 8. Изменение расхода воздуха через вентилятор при автоматическом регулировании по предложенному алгоритму движения 12 пар поездов за 1 ч

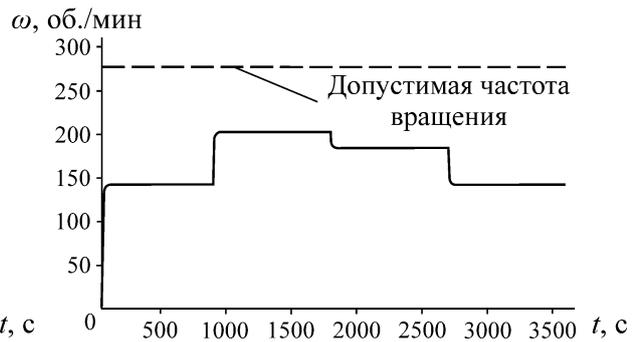


Рис. 9. Изменение частоты вращения ротора вентилятора ω для компенсации поршневого действия поездов в режиме автоматического управления

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРА

Для реализации предлагаемого способа регулирования частоты вращения вентилятора предлагается систему управления строить на основе структурной схемы (рис. 10).

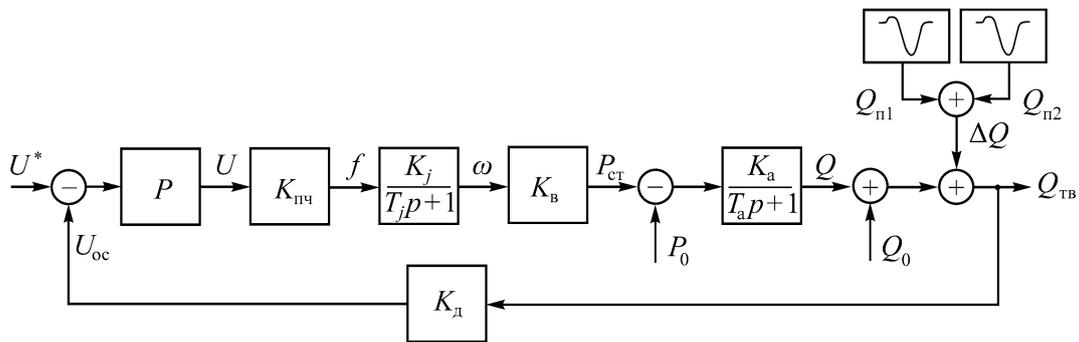


Рис. 10. Структурная схема автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора от преобразователя частоты: $K_{пч}$ — коэффициент преобразователя частоты, Гц/В; K_j — коэффициент усиления двигателя, рад/(с·Гц); T_j — постоянная времени двигателя, с; $K_в$ — коэффициент усиления вентилятора, Па·с/рад; K_a — коэффициент усиления участка вентиляционной сети, м³/Па·с; T_a — постоянная времени участка вентиляционной сети, с; $K_д$ — коэффициент усиления датчика объемного расхода воздуха, В·с/м³; U^* — входное задающее воздействие, В; U — напряжение управления преобразователем частоты, В; U_{oc} — напряжение на выходе датчика производительности вентилятора, В; f — частота тока двигателя вентилятора, Гц; ω — частота вращения ротора вентилятора, рад/с; $P_{ст}$ — статическое давление, развиваемое вентилятором, Па; Q — производительность вентилятора, м³/с; ΔQ — объемный расход воздуха от поршневого действия поездов, м³/с; $Q_{тв}$ — расход воздуха, проходящий через тоннельный вентилятор, м³/с; $Q_{п1}$, $Q_{п2}$ — расход воздуха от поршневого действия поезда 1 и поезда 2, м³/с; P_0 — начальные условия по давлению, Па; Q_0 — начальные условия по производительности, м³/с; P — регулятор производительности вентилятора

Математическая модель системы может быть записана в виде уравнений:

$$W_{дв}(p) = \frac{\omega(p)}{f(p)} = \frac{K_j}{T_j p + 1}, \quad W_{пч}(p) = \frac{f(p)}{U(p)} = K_{пч}, \quad W_a(p) = \frac{Q(p)}{P_{ст}(p)} = \frac{K_a}{T_a p + 1},$$

$$W_d(p) = \frac{U_{oc}(p)}{Q(p)} = K_d, \quad W_b(p) = \frac{P_{ст}(p)}{\omega(p)} = K_b.$$

Параметры математической модели имеют следующие значения: $K_{пч} = 50$ Гц/В; $T_j = 12$ с; $K_j = 1.52$ рад/(с·Гц); $K_b = 10$ Па·с/рад; $K_a = 0.16$ м³/Па·с; $K_d = 0.12$ В·с/м³; $P_0 = -93$ Па; $T_a = 2.2$ с, $Q_0 = 18$ м³/с.

Система управления реализует следующий алгоритм. Задается сигнал требуемого расхода воздуха за 1 ч. Первые 15 мин (первый такт управления) двигатель вентилятора работает с постоянной частотой вращения и не реагирует на возмущающие воздействия. На выходе системы с помощью интегратора идет подсчет фактического расхода воздуха через вентилятор. По окончании первого такта работы система управления сравнивает фактический измеренный расход воздуха, полученный за 15 мин, с заданным на этот такт значением. В следующие 15 мин поступает новый сигнал задания требуемого расхода воздуха и двигатель в этом такте работает с новой постоянной частотой вращения и т. д. Реализация указанного алгоритма управления осуществляется применением двух наборов коэффициентов в системе управления [9, 10]. Первый используется только во время переключения двигателя и необходим для быстрого его разгона на новую частоту вращения, второй работает в остальное время и не отслеживает поезд.

Разработана методика определения коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) производительности станционного вентилятора метрополитена мелко-го заложения с приводом от преобразователя частоты, позволяющая исключить компенсацию возмущающего воздействия от поршневого действия каждого поезда при стабилизации заданной производительности вентилятора. Она включает следующие основные разделы:

- натурное обследование объекта (сбор технических характеристик вентилятора, двигателя, преобразователя частоты и т. д.);
- составление математической модели объекта (рассчитываются коэффициенты и постоянные времени математической модели, определяются начальные условия вычислений);
- численное моделирование переходных процессов регулирования производительности тоннельного вентилятора (подбирают форму, длительность и параметры перерегулирования переходных процессов, удовлетворяющих требованиям к качеству управления и позволяющих системе не реагировать на каждый поезд);
- определение коэффициентов ПИ-регулятора (для пропорциональной и интегральной частей).

В дальнейшем для получения требуемых значений коэффициентов ПИ-регулятора на аналогичных тоннельных вентиляторных установках достаточно повторить вычисления первых трех пунктов предложенной методики.

ВЫВОДЫ

Амплитуда колебаний производительности вентилятора определяется временем между проходами поездов мимо вентиляционной камеры, а также частотой вращения ротора вентилятора. Поршневое действие поездов снижает объем воздуха, проходящего через станционный тоннельный вентилятор, работающий на вытяжку, в диапазоне 1000–2600 м³ за одну встречу поездов, что эквивалентно снижению производительности вентилятора в диапазоне 8.0–39.3 %.

Стабилизация требуемого часового расхода воздуха через осевой стационарный вентилятор метрополитена мелкого заложения, работающий при аэродинамических возмущениях от поездов, достигается автоматическим регулированием частоты его вращения, при котором сигнал задания производительности вентилятора на следующий такт управления формируется с учетом недостатка воздуха, вычисленного на предшествующем такте.

Предложено отслеживать уменьшение объема воздуха, подаваемого на платформу за 1 ч, вследствие поршневого действия поездов и регулировать частоту вращения стационарного тоннельного вентилятора один раз за каждый такт управления в соответствии с недостатком воздуха, вычисленного на предыдущем такте.

Разработанная методика определения коэффициентов ПИ-регулятора производительности стационарного вентилятора с приводом от преобразователя частоты позволяет исключить компенсацию возмущающего воздействия от поршневого действия каждого поезда при стабилизации заданной производительности вентилятора.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов взаимодействия тоннельного вентилятора с регулятором воздушораспределения с целью снижения мощности, потребляемой электродвигателем вентилятора за счет использования поршневого действия поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СП 120.13330.2012.** Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003: утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012: дата введ. 01.01.2013. — М., 2013. — 260 с.
2. **Цодиков В. Я.** Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975. — 568 с.
3. **Красюк А. М.** Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006. — 164 с.
4. **Bettelini M., Henke A., Steiner W., and Gagliardi M.** Upgrading the ventilation of the Gotthard road tunnel, Proceedings of the 11th Int. Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern, Switzerland, 2003. — P. 28–45.
5. **Vardy A., Gunki S., Ichikawa A., Yamashiro H., and Nakahori I.** Automatic control of tunnel portal emissions, Proc. of the 11th Int. Symp. on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Luzern, Switzerland, 2003. — P. 551–563.
6. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 101–108.
7. **Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А.** Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздушораспределение в метрополитене мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2010. — № 4. — С. 75–82.
8. **Красюк А. М., Косых П. В., Русский Е. Ю.** Влияние возмущений воздушного потока от поршневого действия поездов на туннельные вентиляторы метрополитенов // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 144–153.
9. **Нетушил А. В., Балтрушевич А. В., Бурляев В. В.** Теория автоматического управления: Нелинейные системы управления при случайных воздействиях. — М.: Высш. шк., 1983. — 432 с.
10. **Yurkevich V. D.** PI/PID Control for nonlinear systems via singular perturbation technique, Advances in PID Control, Publisher InTech., 2011. — P. 113–142.
11. **Попов Н. А., Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А., Зедгенизов Д. В.** Совершенствование методических основ разработки систем тоннельной вентиляции метрополитенов мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 175–186.