

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 62-543.2:624.191.94

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА НА ПЛАТФОРМЕ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ ПОРШНЕВОМ ДЕЙСТВИИ ПОЕЗДОВ

Д. В. Зедгенизов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: dimzed2001@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Предложена методика определения коэффициентов настройки преобразователя частоты тока электродвигателя тоннельного вентилятора, учитывающая время регулирования расхода воздуха для каждой интенсивности движения поездов. Определены диапазоны изменения трех критериев оценки качества управления проветриванием в метрополитене. Выполнен анализ потребления электрической энергии на проветривание станции метрополитена в зависимости от угла открытия створок регулятора в пристанционной вентиляционной сбойке и выбраны экономичные режимы работы створчатого регулятора воздухораспределения. Приведена зависимость изменения расхода воздуха на станции от угла установки створчатого регулятора, на основе которой создан алгоритм автоматического управления воздухораспределением в метрополитене мелкого заложения за счет поршневого действия поездов без использования тоннельных вентиляторов. Он позволяет обеспечивать в часы пик требуемый воздухообмен на станции.

Тоннельный вентилятор, частота вращения ротора, расход воздуха, поршневое действие поездов, створчатый регулятор, воздухораспределение, качество управления, метрополитен

DOI: 10.15372/FTPRPI20220407

Система вентиляции тоннелей метрополитена в первую очередь предназначена для обеспечения людей, находящихся в подземных сооружениях, необходимым количеством воздуха требуемого качества. Такие параметры атмосферы метрополитена, как микробиологическая обсемененность воздуха, содержание пыли, влаги, углекислый газ и т. п., значительно варьируют при изменении температуры наружного воздуха, количества пассажиров, сезона года, погодных условий и других причин [1]. Основной способ эффективного регулирования параметров атмосферы подземных сооружений — управление объемным расходом воздуха, пода-

ваемого средствами тоннельной вентиляции [2, 3]. Достаточный расход воздуха разбавляет содержащиеся в подземной атмосфере вредности до требуемого уровня, задаваемого нормативным документом [4]. Тоннельные вентиляторы (ТВ), установленные внутри вентиляционной системы метрополитена, используются для управления параметрами воздуха подземной атмосферы при изменении уровня вредностей в ней [5]. Их производительность оперативно изменяется регулировкой частоты вращения вала электродвигателей [6].

В [7–18] приведены результаты исследования влияния поршневого действия поездов (ПДП) на воздушные потоки в метрополитене. Установлено, что поезда метро при своем движении перемещают значительные массы воздуха, влияют на производительность тоннельных вентиляторов и перераспределение потоков воздуха внутри пассажирских помещений метрополитена. Предлагается уменьшить электрическую мощность, потребляемую тоннельным вентилятором, путем перераспределения доли вентиляционной нагрузки на поршневое действие движущихся по тоннелю поезда метро. Это возможно при создании автоматизированных систем управления проветриванием станции метрополитена (АСУ ПМ), пример построения которых приведен на рис. 1. Их основная часть — системы автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора (САУ ТВ) и системы автоматического управления створчатым регулятором (САУ СР). Створки регулятора воздухораспределения (РВ) устанавливаются в пристанционной вентиляционной сбойке между тоннелями. Каждая из этих систем должна функционировать на основе алгоритмов управления, учитывающих требуемые параметры воздушной среды, поршневое действие поездов, особенности вентиляционной сети метрополитена, требования энергоэффективности и др. Предлагаемое решение позволяет снизить энергопотребление и увеличить качество проветривания, поэтому разработка алгоритмов автоматического управления расходом воздуха в пассажирских помещениях станции метрополитена — весьма актуальная задача.

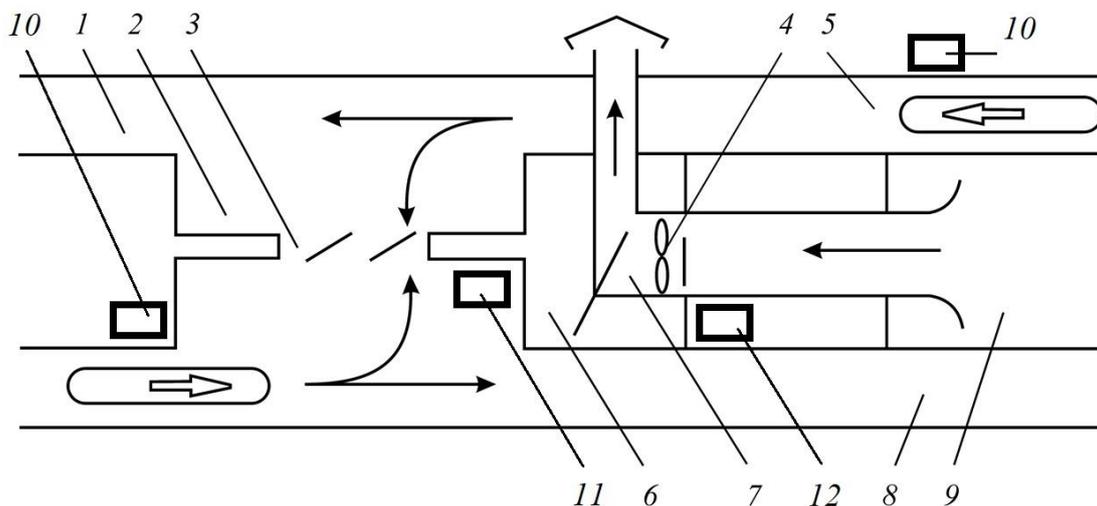


Рис. 1. Схема типового участка метрополитена в момент расположения поездов перед вентиляционной сбойкой: 1 — путевой тоннель № 2; 2 — вентиляционная сбойка; 3 — створчатый регулятор воздухораспределения; 4 — шиберующий аппарат вентилятора; 5 — поезд метро; 6 — затвор гражданской обороны; 7 — тоннельный вентилятор; 8 — путевой тоннель № 1; 9 — пассажирская платформа станции; 10 — система контроля положения поездов; 11 — система автоматического управления створчатым регулятором; 12 — система автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предмет исследования — процессы регулирования воздухообмена на станциях метрополитена. Влиять на эти процессы возможно двумя способами: регулированием частоты вращения вала ротора тоннельного вентилятора (активное регулирование) и перераспределением воздуха между тоннелями за счет изменения угла поворота створок регулятора воздухораспределения, установленного в пристанционной вентиляционной сбойке между тоннелями (пассивное регулирование). Основное возмущающее воздействие на расход воздуха на платформе оказывают движущиеся по тоннелям поезда метро. Если это возмущение вентиляционного режима не скомпенсировать, периодически будет возникать перерасход электроэнергии или ухудшение параметров микроклимата.

Для поддержания на платформе станции метрополитена расхода воздуха, требуемого санитарными нормами, необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику расчета коэффициентов настройки регулятора частоты вращения вала ротора тоннельного вентилятора;
- определить основные критерии качества управления расходом воздуха на платформе;
- обосновать режимы работы створчатого регулятора воздухораспределения для снижения энергопотребления на проветривание;
- разработать алгоритм управления воздухораспределением пассивным способом без использования тоннельного вентилятора (это необходимо в зимнее время, когда вентиляторы в метрополитене мелкого заложения, расположенного в зоне резко континентального климата, выключены).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА РОТОРА ТОННЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

В настоящее время у электромеханических служб эксплуатации метрополитенов появляется возможность оперативно регулировать частоты вращения рабочего колеса вентилятора в соответствии с текущими потребностями в воздухе [1]. Скорость вращения вала тоннельного вентилятора регулируется серийно выпускаемым преобразователем частоты тока статора приводного электродвигателя вентилятора [19]. При его настройке службами эксплуатации возникает проблема задания числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части пропорционально-интегрального регулятора частоты вращения ротора вентилятора, встроенного в преобразователь частоты. Ввод некорректных значений указанных коэффициентов и последующее регулирование производительности вентилятора может привести к поломке оборудования и опасности нарушения требований документов, нормирующих микроклиматические параметры воздуха в подземных сооружениях [4]. Создание инженерной методики настройки пропорционально-интегрального регулятора САУ ТВ — актуальная задача.

В теории автоматического управления разработаны методы расчета коэффициентов настройки для систем автоматического регулирования [20, 21]. Однако на практике их использование имеет недостатки. Например, известный графоаналитический (тангенциальный) метод нахождения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора весьма чувствителен к выбору точки, относительно которой проводится касательная к кривой переходного процесса исследуемой координаты, и требует определенной квалификации и опыта инженерно-технического персонала на производстве.

Существует аналитический метод расчета А. М. Шубладзе. Помимо громоздких расчетов, в нем отсутствует математическое описание для того класса объектов, к которым относится вентиляционная сеть метрополитена, что затрудняет практические вычисления по данной методике.

Пакет программ Simulink позволяет рассчитать коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора быстрее и точнее, чем упомянутые методики. Моделирование переходных процессов осуществляется путем численного интегрирования методом Дормана–Принса 4–5-го порядка с автоматическим изменением шага интегрирования (ODE 45 Dormand-Prince variable-step). Для получения числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части регулятора, согласно данной методике, необходимо выполнить следующие шаги.

1. Сбор исходных данных с объекта управления: снимаются переходные процессы исследуемой координаты, например производительности тоннельного вентилятора при его пуске [6]; уточняются технические характеристики электродвигателя (номинальная частота вращения, момент инерции ротора) и самого вентилятора (момент инерции рабочего колеса вентилятора).

2. Разработка структурной схемы САУ ТВ с электроприводом от преобразователя частоты тока статора электродвигателя (рис. 2).

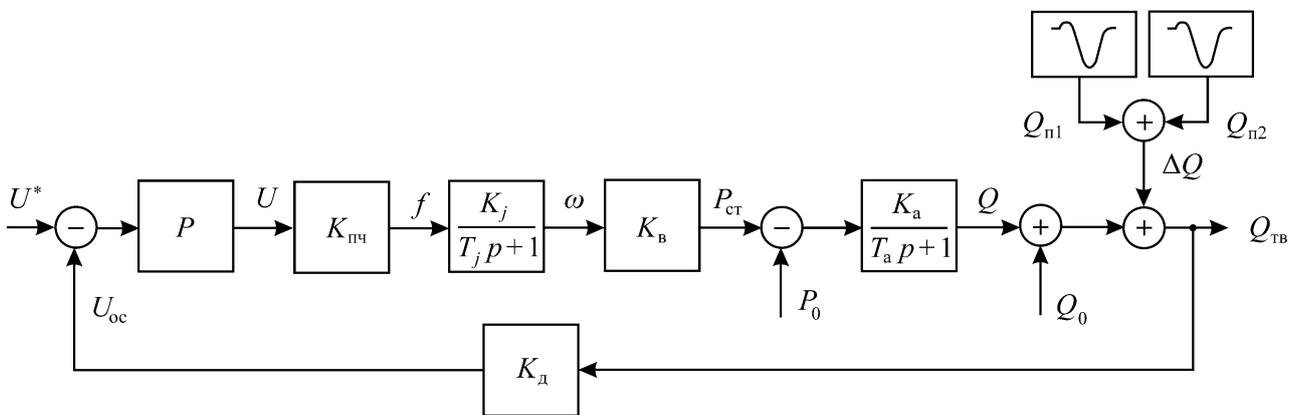


Рис. 2. Структурная схема САУ ТВ с электроприводом от преобразователя частоты: P — регулятор производительности вентилятора; $K_{пч}$ — коэффициент преобразователя частоты, Гц/В; K_j — коэффициент усиления двигателя, рад/(с·Гц); T_j — постоянная времени двигателя, с; $K_в$ — коэффициент усиления вентилятора, 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 на входе преобразователя частоты, В; U_{oc} — напряжение обратной связи с датчика производительности вентилятора, В; f — частота тока статора приводного электродвигателя, Гц; ω — частота вращения рабочего колеса вентилятора, рад/с; $P_{ст}$ — статическое давление, Па; Q — производительность вентилятора, м³/с; ΔQ — объемный расход воздуха, вызванный движением поездов, м³/с; $Q_{тв}$ — расход воздуха, проходящий через тоннельный вентилятор, м³/с; $Q_{п1}$, $Q_{п2}$ — расход воздуха от поршневого действия поездов 1 и 2 соответственно, м³/с; P_0 — начальные условия по давлению, Па; Q_0 — начальные условия по производительности, м³/с

3. Расчет параметров структурной схемы: вычисляются все коэффициенты передачи, постоянные времени, начальные условия, параметры линеаризации, диапазоны изменения входного и выходного воздействий. Также необходимо оценить влияние возмущений расхода воздуха, вносимых движущимися поездами метро на воздушный поток, создаваемый вентилятором при его регулировании [7–9].

4. Определение требований к качеству переходного процесса регулирования производительности тоннельного вентилятора с учетом поршневого эффекта и выбранного режима управления вентилятором. На основе анализа данных натуральных экспериментов рассчитывается

требуемое время переходного процесса и величина перерегулирования [22–30]. При нахождении желаемого времени переходного процесса важно учесть, что с увеличением интенсивности движения поездов по линии процесс регулирования производительности вентилятора на текущем такте должен заканчиваться как можно раньше начала прохождения следующего поезда. Для повышения экономичности управления регулирование частоты вращения ротора должно заканчиваться не позднее 1/3 от интервала времени до следующего поезда метро [27].

5. Составление структурной схемы САУ ТВ в программе Simulink: ввод числовых параметров блоков; настройка входного блока Step и блока вывода переходных процессов Scope. В качестве блока регулятора САУ ТВ используется блок PID Controller из стандартной библиотеки Simulink (рис. 3).

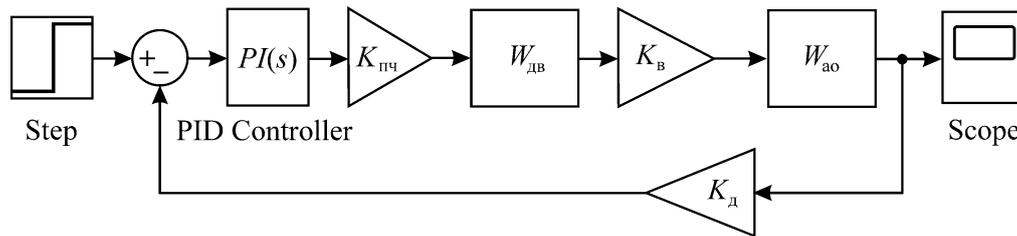


Рис. 3. Структурная схема САУ ТВ в программе Simulink: Step — блок ввода параметров входного воздействия; PID Controller — блок настройки параметров регулятора; $K_{пч}$ — коэффициент усиления преобразователя частоты тока; $W_{дв}$ — передаточная функция двигателя вентилятора; $K_{в}$ — коэффициент усиления вентилятора; $K_{д}$ — коэффициент усиления датчика расхода воздуха; $W_{ао}$ — передаточная функция вентиляционной сети; Scope — блок вывода переходных процессов системы

6. Настройка желаемого вида переходного процесса регулирования производительности. В блоке PID Tuner устанавливаются требуемые параметры переходного процесса выходной координаты системы (перерегулирование и время переходного процесса).

7. Запуск расчета системы и контроль вида переходного процесса по блоку Scope.

После проверки выполнения требований к переходному процессу считываются числовые коэффициенты пропорциональной и интегральной частей пропорционально-интегрального регулятора САУ ТВ. Для графического нахождения коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора проведены расчеты при постоянных времени двигателя $T_{дв}$ и объекта T_a , отличных от заданных ($T_{дв} = 3 - 48$ с, $T_a = 0.55 - 8.80$ с). Ниже приведены коэффициенты пропорциональной $K_{п}$ и интегральной $K_{и}$ части регулятора для обеспечения требуемого расхода вентилятора $27 \text{ м}^3/\text{с}$ при интенсивности движения поездов 12 пар/ч:

| | $K_{п}$ | $K_{и}$ |
|-----------------|---------|---------|
| $T_{дв} = 3$ с | 0.0345 | 0.0093 |
| $T_{дв} = 6$ с | 0.0441 | 0.00757 |
| $T_{дв} = 12$ с | 0.0779 | 0.00678 |
| $T_{дв} = 24$ с | 0.1867 | 0.00791 |
| $T_{дв} = 48$ с | 0.3780 | 0.00800 |
| $T_a = 0.55$ с | 0.1277 | 0.01070 |
| $T_a = 1.10$ с | 0.0847 | 0.00767 |
| $T_a = 2.20$ с | 0.0779 | 0.00678 |
| $T_a = 4.40$ с | 0.0784 | 0.00580 |
| $T_a = 8.80$ с | 0.0915 | 0.00512 |

Для удобства практического использования результатов расчетов коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора построены графики их изменения в зависимости от постоянной времени двигателя и объекта (рис. 4).

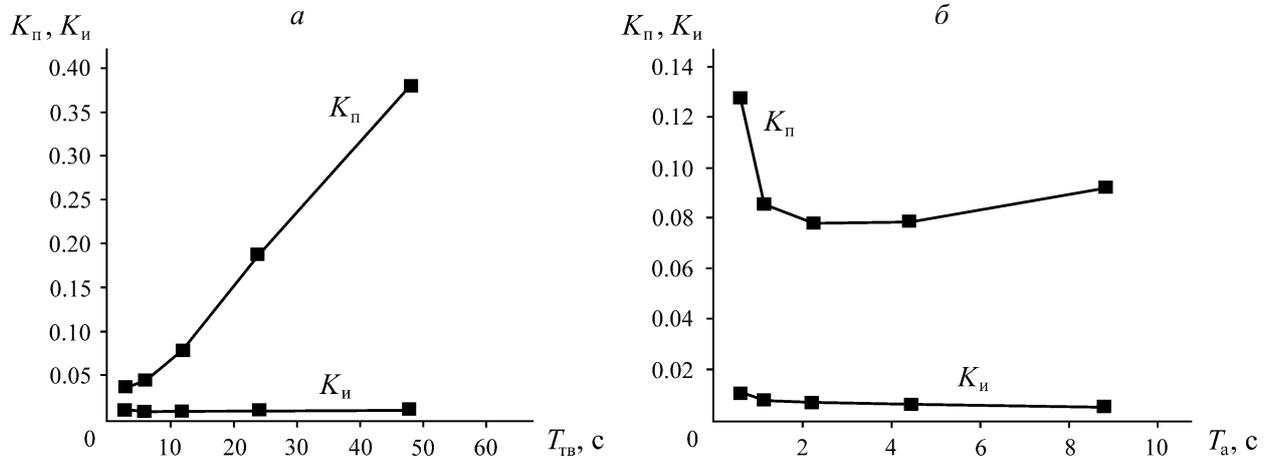


Рис. 4. Изменение рассчитанных коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора при изменении постоянных времени объекта: K_p, K_i — коэффициенты пропорциональной и интегральной части регулятора; $T_{дв}, T_a$ — постоянные времени двигателя и объекта

Установлено, что коэффициент пропорциональной части пропорционально-интегрального регулятора K_p увеличивается с возрастанием значения постоянной времени двигателя $T_{дв}$ (рис. 4а) и достигает своего экстремума (минимума) при изменении постоянной времени объекта T_a (рис. 4б). Коэффициент интегральной части регулятора производительности вентилятора K_i изменяется незначительно и в исследуемом рабочем диапазоне значений может приниматься постоянным.

Исследования позволили разработать методику определения коэффициентов настройки преобразователя частоты тока электродвигателя тоннельного вентилятора, которая впервые учитывает время регулирования расхода воздуха. Время регулирования определяется по условию завершения текущего переходного процесса до начала следующего и не превышает 1/3 от фактического (текущего) интервала движения поездов.

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОМ ВОЗДУХА НА ПЛАТФОРМЕ СТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

При создании алгоритмов управления регуляторами проветривания основное внимание должно уделяться постановке задачи синтеза алгоритмов, выбору начальных и граничных условий математических моделей, а также формулировке требований к качеству переходных процессов. Координатами автоматического управления проветриванием являются производительность станционного вентилятора и угловое положение створок регулятора воздухораспределения, установленного в вентиляционной сбойке в окрестности станции.

Отметим, что в документе, регламентирующем процесс вентиляции сооружений метрополитена [4], указанные критерии оценки качества, т. е. требования к точности поддержания скорости воздуха, ко времени переходного процесса и перерегулированию не определены.

Проведем обоснование числовых значений прямых критериев оценки, таких как время регулирования $t_{рег}$, перерегулирование σ и ошибка управления в установившемся режиме ε [20].

Время регулирования производительности вентилятора $t_{\text{рег. в.}}$. Эксперименты на осевых вентиляторах в Новосибирском метрополитене показали, что минимальное время от начала разгона до максимальной скорости составляет 20–45 с [27]. Меньшая продолжительность запуска в ряде случаев может вывести из строя электрическую и механическую части оборудования подземной вентиляционной установки. Нецелесообразно изменять режим работы тоннельных вентиляторов метрополитена > 4 раз в час [7, 27]. При максимальном количестве поездов на линии в Новосибирском метрополитене 20 пар/ч необходимо, чтобы вентилятор завершил единичный цикл регулирования за $1/3$ промежутка времени до прихода очередного поезда ($t_{\text{рег. в(max)}} = 60$ с).

Перерегулирование производительности вентилятора $\sigma_{\text{в}}$. Для вентиляторов перерегулирование производительности недопустимо ($\sigma_{\text{в}} = 0\%$), так как это увеличивает затраты электроэнергии. Циклы ускорения и торможения вращающихся на валу вентилятора масс из-за шпоночных соединений и муфт снижают их долговечность и увеличивают затраты на ремонт.

Ошибка управления производительностью вентилятора в установившемся режиме $\varepsilon_{\text{в}}$. Спецификой тоннельной вентиляции станций метрополитенов мелкого заложения является значительная аэродинамическая связь подземных сооружений с атмосферой. Это приводит к неконтролируемым утечкам воздуха, затрудняя определение расхода воздуха на платформе станции, а следовательно, и управление им в автоматическом режиме. Еще одна особенность алгоритмов проветривания станции в метрополитене мелкого заложения (ММЗ) — необходимость осреднения за час расхода воздуха, проходящего через платформу. В связи с чем ошибка управления $\varepsilon_{\text{в}}$ не должна превышать 10%. Более жесткие требования к точности управления производительностью повлекут за собой рост затрат на создание, изготовление и эксплуатацию системы.

Время регулирования угла поворота створчатого регулятора воздухораспределения $t_{\text{рег. р.}}$. Для условий Новосибирского метрополитена за 3 мин паузы между последовательно проходящими по одному пути поездами, по другому пути может прибыть только один поезд. Поэтому максимальное время регулирования расхода воздуха одним регулятором воздухораспределения ограничено 1.5 мин. Минимальное время (наибольшая скорость) регулирования увеличивает нагрузки на механизм перемещения створок регулятора и мощность их электропривода. Целесообразно при синтезе алгоритмов управления задавать время регулирования угла поворота в диапазоне 5–90 с.

Ошибка управления углом поворота створок в установившемся режиме $\varepsilon_{\text{р}}$. Поскольку регулирование створками — основа энергоэффективного управления расходом воздуха на платформе, от точности управления этим процессом зависит величина электроэнергии, сэкономленной на проветривание станции за счет снижения производительности вентилятора, т. е. управление створками регулятора должно быть астатичным ($\varepsilon_{\text{р}} = 0\%$).

Показатели качества управления режимом проветривания ММЗ сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Показатели качества управления режимом проветривания ММЗ

| Управляемая величина | Время регулирования $t_{\text{рег. с}}$ | Перерегулирование σ | Статическая ошибка ε |
|---|---|----------------------------|----------------------------------|
| | | % | |
| Производительность станционного тоннельного вентилятора | 20–60 | 0 | 10 |
| Угол открытия створок регулятора воздухораспределения | 5–90 | 0 | 0 |

При выполнении указанных требований к качеству управления изменение координат системы во времени приведено на рис. 5.

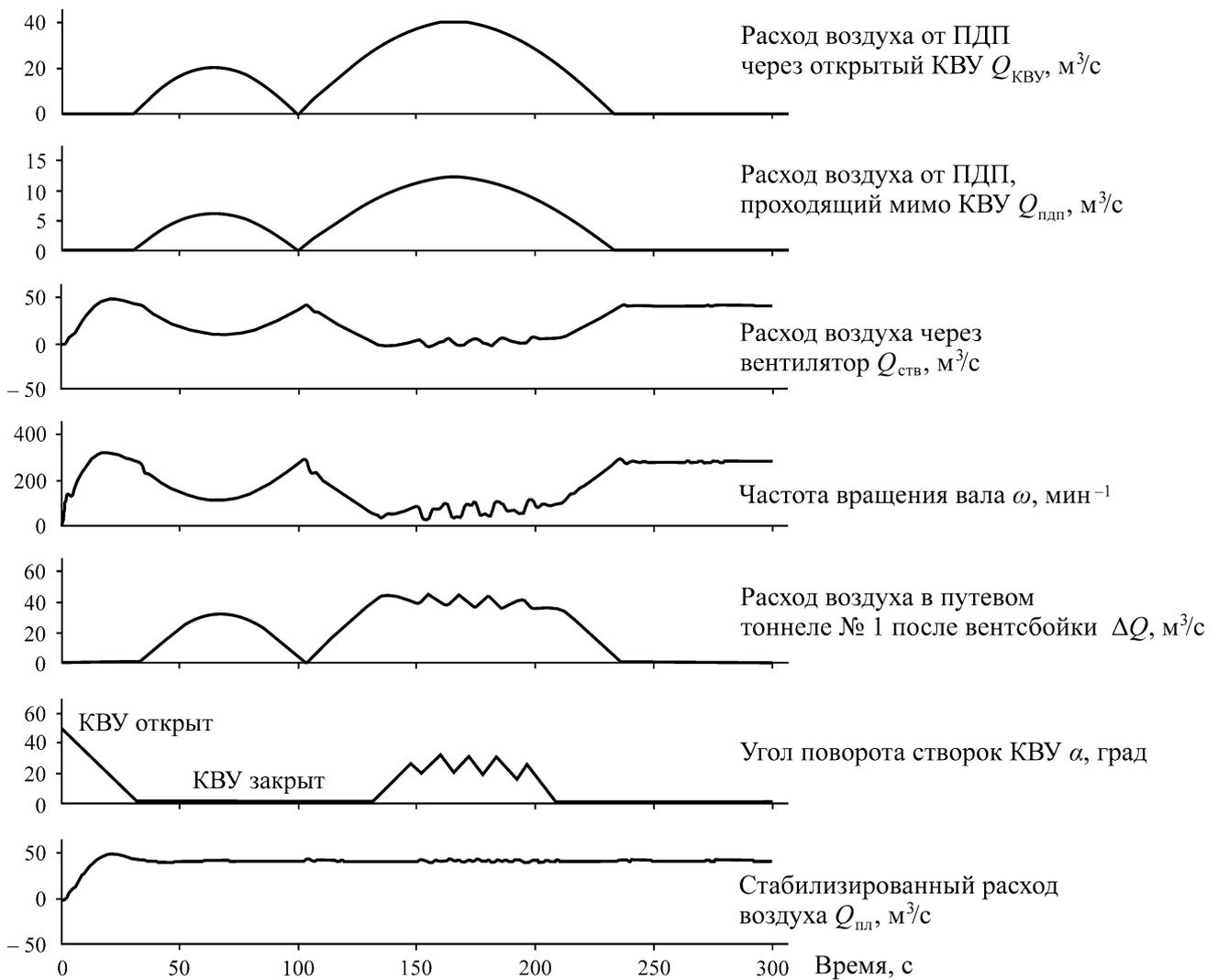


Рис. 5. Поддержание расхода воздуха на платформе станции ММЗ путем изменения частоты вращения вала вентилятора и угла открытия регулятора: ПДП — поршневое действие поездов; КВУ — клапан вентиляционный утепленный (створчатый регулятор воздухораспределения)

Так как интенсивность движения поездов метрополитена в течение суток неравномерна, максимальное время завершения процессов регулирования для регуляторов режима проветривания тоже переменна (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Время регулирования при разном числе пар поездов на линии метрополитена, с

| Показатель | Интенсивность движения, пар/ч | | | |
|--|-------------------------------|-----|-----|-----|
| | 7 | 12 | 15 | 20 |
| Время между поездами, следующими в одном направлении | 514 | 300 | 240 | 180 |
| Максимальное время регулирования ТВ | 170 | 100 | 80 | 60 |
| Минимальное время регулирования ТВ | 30 | | | |
| Максимальное время регулирования РВ | 257 | 150 | 120 | 90 |
| Минимальное время регулирования РВ | 5 | | | |

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СТВОРЧАТОГО РЕГУЛЯТОРА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ВЕНТИЛЯЦИЮ**

Системы электропривода тоннельных вентиляторов станций ММЗ обычно оборудуются электродвигателями мощностью 45–70 кВт, работающими на частоте вращения 500 об./мин. Распределение требуемых расходов воздуха на пассажирской платформе станции в течение 24 ч представлено на рис. 6.

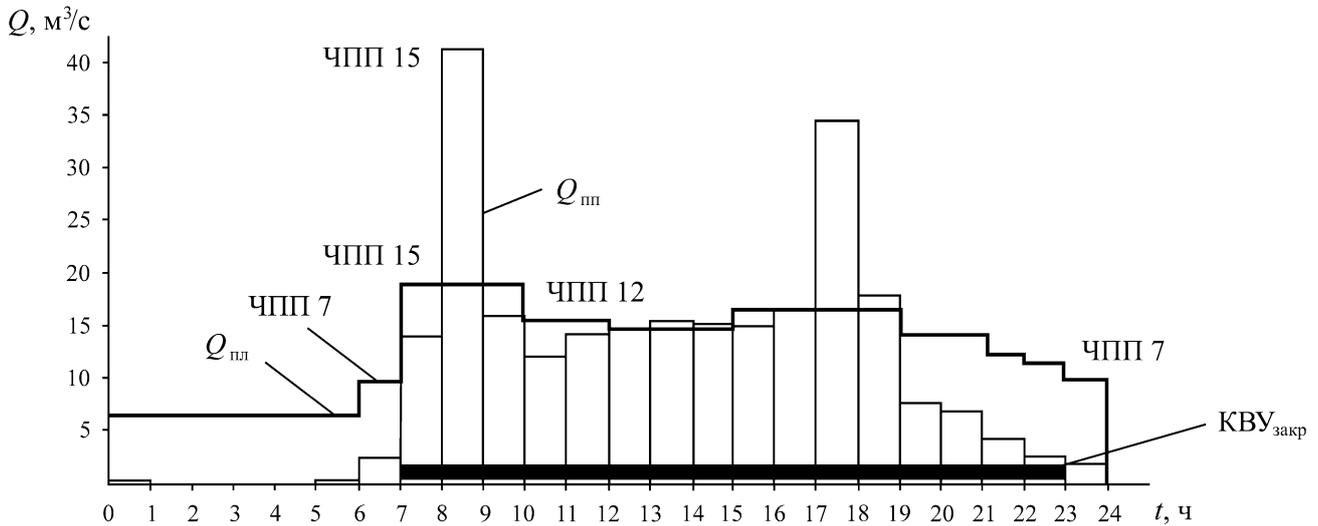


Рис. 6. Расчетные значения расходов воздуха на станции “Октябрьская” Новосибирского метрополитена: $Q_{пл}$ — требуемый расход воздуха на платформе; $Q_{пп}$ — расход воздуха, вычисленный по пассажиропотоку; ЧПП — число пар поездов

При согласованном управлении углом открытия регулятора воздухораспределения и частотой вращения вала вентилятора можно снизить расход электроэнергии на проветривание [8]. Рассчитаем мощность, потребляемую двигателем вентилятора, при таком управлении. Расход воздуха на платформе станции:

$$Q_{пл} = (Q_{КВУ1} + Q_{КВУ2})k_{КВУ} + Q_{пдп1} + Q_{пдп2} + Q_{ств}k_{ств} + Q_d,$$

где $k_{КВУ}$ — коэффициент открытия створок; Q_d — добавочный расход воздуха от действия естественной тяги.

Мощность, потребляемая электродвигателем ТВ, находится по формуле [5]

$$N = Q_{пл}^3 R_a K_{пер} / 1000 \eta_{тв} \eta_{дв}.$$

Здесь R_a — аэродинамическое сопротивление сети; $K_{пер}$ — коэффициент пересчета, учитывающий, что только часть расхода воздуха, создаваемого тоннельным вентилятором, идет на платформу [2]; $\eta_{тв}$, $\eta_{дв}$ — КПД вентилятора и электродвигателя вентилятора. Мощность N , потребляемая тоннельным вентилятором за 1 ч, приведена в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Мощность, потребляемая электродвигателем тоннельного вентилятора

| ЧПП, пар/ч | $Q_{пл}$, м³/с | $N_{перг}$ | $N_{КВУ}$ | | Экономия за 1 ч, % |
|------------|-----------------|------------|------------|------------|--------------------|
| | | | $N_{КВУ0}$ | $N_{КВУ1}$ | |
| 7 | 10 | 732 | 462 | 434 | 36–40 |
| 12 | 15 | 2472 | 1083 | 781 | 56–68 |
| 15 | 20 | 5859 | 2234 | 974 | 62–83 |
| 15 | 40 (час пик) | 46888 | 28210 | 11630 | 40–75 |

При полностью открытых створках регулятора ($N_{\text{КВУ}0}$) возможна экономия 36–62 % электроэнергии по сравнению с режимом, в котором отсутствует регулирование производительности в течение суток ($N_{\text{нерег}}$). При закрытом положении створок ($N_{\text{КВУ}1}$) экономия достигает 40–83 %.

Экспериментальные исследования показали, что воздухораспределение на станциях зависит от времени Δt между проходами встречных поездов мимо тоннельного вентилятора [6], поэтому потребляемая двигателем вентилятора мощность также переменна (рис. 7).

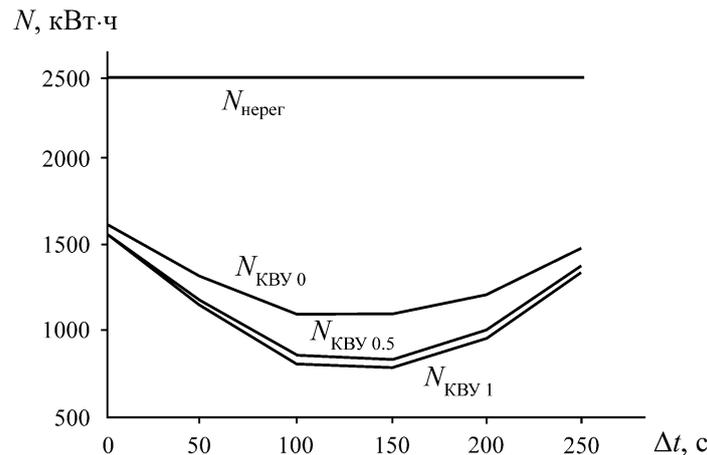


Рис. 7. Активная мощность, потребляемая вентилятором, в зависимости от степени открытия створок КВУ (0, 0.5, 1) и времени между проходами встречных поездов Δt

Наибольшая экономия электроэнергии возможна при движении поездов в противофазе с $\Delta t = 100–150$ с вследствие наложения влияния поездов.

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПАССИВНЫМ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Ежегодно с октября по май тоннельные вентиляторы ММЗ, расположенные в зоне резко-континентального климата, выключены и проветривание станций осуществляется только тем воздухом, который поступает из атмосферы от поршневого действия поездов на линии (см. рис. 1). Это обусловлено необходимостью защиты пассажиров, персонала и конструкций метро от переохлаждения воздухом, поступающим из атмосферы. Управление воздушными потоками, проходящими через пристанционные вентсбойки, позволит поддерживать требуемый по пассажиропотоку расход воздуха на платформе станции даже без включения вентиляторов.

В качестве объекта исследований принята станция “Октябрьская” Новосибирского метрополитена, для которой большую часть суток (с 10 до 21 ч, исключая часы пик) интенсивность движения поездов составляет 10–12 пар/ч. В исследуемый период года тоннельные вентиляторы выключены, их шиберующие аппараты закрыты, затворы гражданской обороны закрыты и в пассажирских вестибюлях стоит двойной ряд дверей. Типовое расположение поездов в путевых тоннелях, прилегающих к станции, имеет четыре варианта (рис. 8).

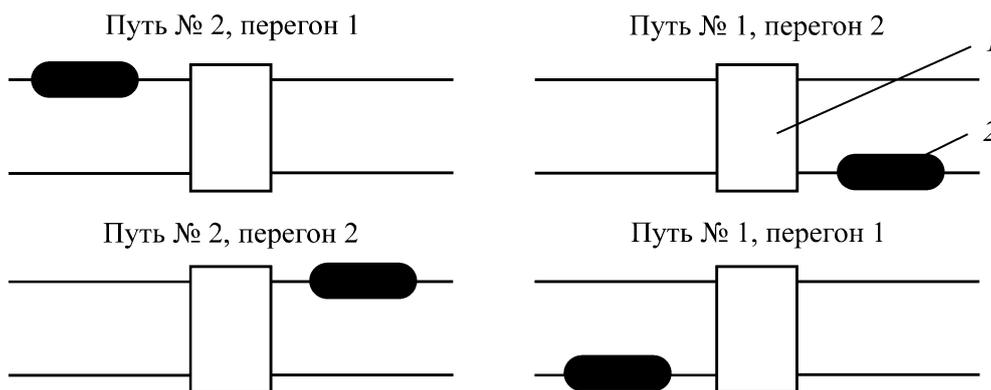


Рис. 8. Варианты расположения поездов, относительно станции метрополитена при интенсивности движения 10–12 пар поездов в час: 1 — пассажирская платформа станции; 2 — поезд метро

Для каждого из четырех вариантов расположения поездов рассчитаны расходы воздуха на станции, инициированные поршневым действием поездов, при отсутствии створчатого регулятора в пристанционной вентсбойке, а также при его установке с угловым положением створок 0, 15, 21, 25 и 48° (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Расход воздуха $Q_{ст}$ на станции в зависимости от угла поворота створок регулятора, м³/с

| Угол поворота створок, град | $Q_{ст}$ | | | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Путь № 2, перегон 1 | Путь № 1, перегон 2 | Путь № 2, перегон 2 | Путь № 1, перегон 1 |
| Без регулятора | 9.05 | 8.85 | 11.60 | 6.45 |
| 0 | 15.70 | 15.95 | 16.90 | 13.30 |
| 15 | 19.35 | 20.00 | 21.25 | 17.20 |
| 21 | 22.30 | 23.40 | 24.60 | 20.45 |
| 25 | 26.20 | 27.95 | 29.10 | 24.90 |
| 48 | 31.85 | 34.55 | 35.70 | 31.75 |

Оперативное регулирование воздухораспределения створчатыми регуляторами изменяет расход воздуха на станции в 3.07–4.90 раза (в среднем в 3.8 раза) по сравнению с воздухораспределением без регуляторов (вентсбойка полностью свободна для прохождения воздуха).

Получена зависимость изменения расхода воздуха на станции от угла установки створчатого регулятора (достоверность аппроксимации $R^2 = 0.95$): $Q_{ст} = 15.9e^{0.0165\alpha}$. Ниже для станции “Октябрьская” приведен требуемый расход воздуха $Q_{ст}$ и требуемое изменение угла поворота створок регулятора воздухораспределения при интенсивности движения поездов 10–12 пар/ч:

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Время суток, ч | 10–16 | 16–17 | 17–18 | 18–19 | 19–21 |
| Расход воздуха $Q_{ст}$, м ³ /с | 15 | 17 | 34 | 18 | 8 |
| Угол поворота створок α , град | 0 | 8 | 48 | 12 | 0 |

Видно, что требуемый по пассажиропотоку расход воздуха изменяется для станции “Октябрьская” в течение суток более чем в 4 раза. В вечерний час пик требуемый расход достигает 34 м³/с, что не может быть обеспечено без его регулирования створками. Установка створчатых регуляторов воздухораспределения позволяет решить эту проблему.

Блок-схема алгоритма автоматического управления воздухораспределением пассивным способом показана на рис. 9 (i — шаг итерации алгоритма управления).

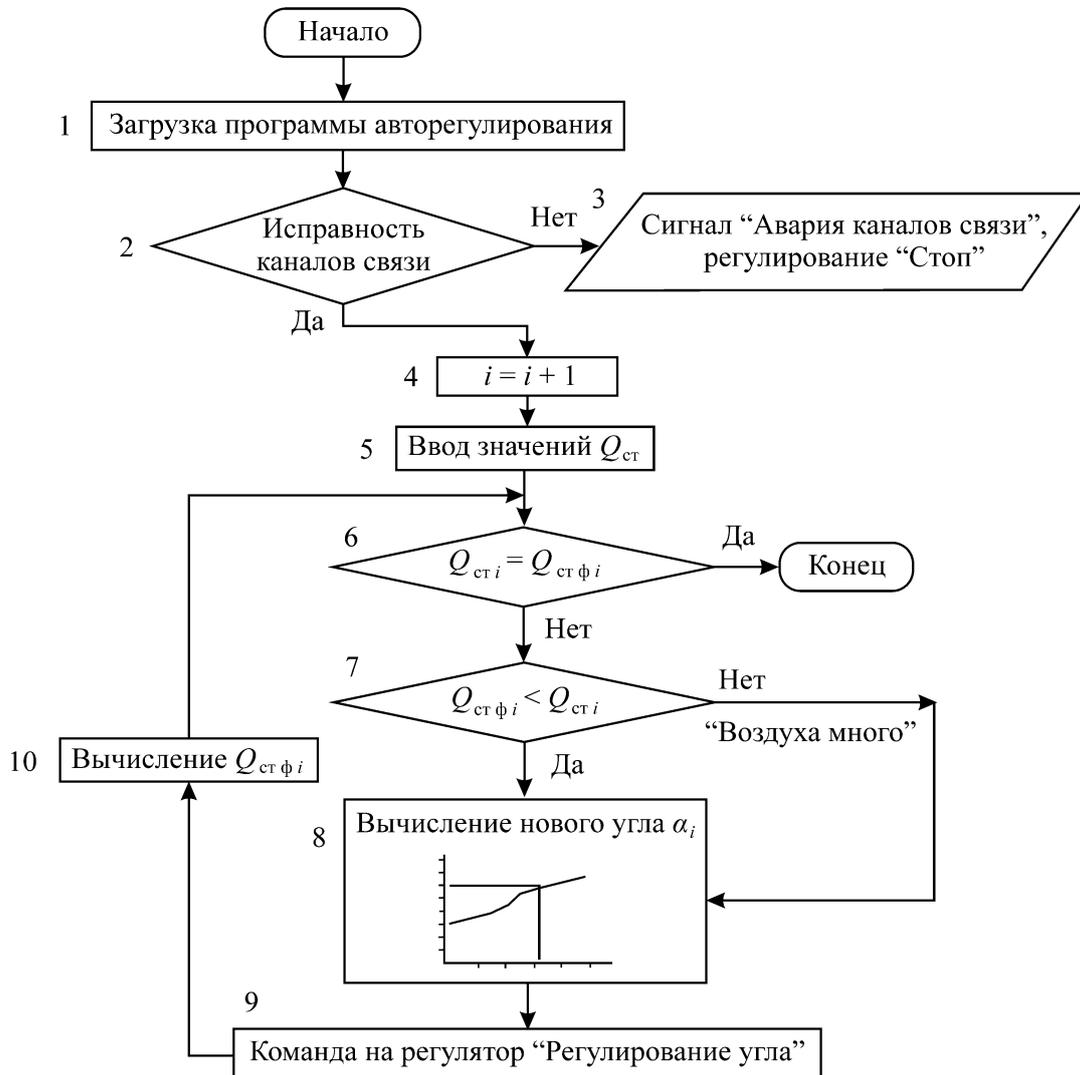


Рис. 9. Блок-схема алгоритма автоматического управления воздухораспределением пассивным способом (регулятором типа КВУ в пристанционной вентсбойке)

После запуска алгоритма проверяются каналы связи, запускается приращение шага управления и в блоке 5 задается требуемое значение расхода воздуха на платформе $Q_{ст i}$. Далее это значение расхода сравнивается в блоке 6 с фактическим расходом воздуха на платформе $Q_{ст ф i}$, вычисленным в блоке 10 по информации с датчиков. При несовпадении указанных значений в блоке 8 происходит вычисление нового угла поворота створок α на основе полученной зависимости $Q_{ст}$. Затем в блоке 9 выдается команда на механизм поворота створок регулятора и происходит корректировка расхода воздуха.

Выявлено, что оперативное регулирование воздухораспределения створчатыми регуляторами, установленными в пристанционных вентсбойках, изменяет расход воздуха на станции в 3.8 раза по сравнению с воздухораспределением без регуляторов. Получена зависимость изменения расхода воздуха на станции от угла установки створчатого регулятора, на основе ко-

торой разработан алгоритм автоматического управления пассивным воздухораспределением в метрополитене мелкого заложения за счет поршневого действия поездов без использования тоннельных вентиляторов, позволяющий обеспечивать в часы пик требуемое воздухораспределение на станции.

ВЫВОДЫ

Разработана методика определения коэффициентов настройки преобразователем частоты тока электродвигателя тоннельного вентилятора, которая учитывает время регулирования расхода воздуха для каждой интенсивности движения поездов. Время регулирования определяется по условию завершения текущего переходного процесса до начала следующего и не должно превышать $1/3$ от фактического (текущего) интервала движения поездов.

Предложен алгоритм автоматического управления комплексом тоннельного вентиляционного оборудования станции метрополитена мелкого заложения, основанный на зависимости активной мощности, потребляемой тоннельным вентилятором при его оперативном регулировании в течение суток, от фактического числа пар поездов на линии, требуемого расхода воздуха на платформе и положения створок регулятора воздухораспределения в вентиляционной сбойке, позволяющий обеспечивать требуемое качество регулирования производительности вентилятора с учетом текущего режима управления комплексом вентиляционного оборудования станции метрополитена, а также снизить расход электроэнергии на проветривание на 36–83 %.

Установлено, что для зимнего периода регулирование расхода воздуха в пристанционных вентсбойках ММЗ обеспечивает в часы пик требуемое по пассажиропотоку воздухораспределение на станции.

Впервые предложено управлять производительностью тоннельного вентилятора ММЗ, вычисляя сигнал задания перед каждым тактом управления на основе оценки предполагаемого времени между прохождением встречных поездов мимо вентиляционной камеры, угла закрытия створок регулятора воздухораспределения вентсбойки, текущей частоты вращения вала вентилятора и требуемого расхода воздуха на платформе станции, что позволяет снизить энергопотребление тоннельного вентилятора за счет использования поршневого действия поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красюк А. М., Лугин И. В. Вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2019. — 316 с.
2. Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006. — 164 с.
3. Громов В. Н. Особенности обеспечения микроклимата метрополитенов // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. — 2017. — С. 96–103.
4. СП 120.13330.2012. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003, утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 г., дата введения 01.01.2013. — М., 2013. — 260 с.
5. Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975. — 568 с.
6. Зедгенизов Д. В. Результаты экспериментального исследования процесса регулирования частоты вращения ротора тоннельного вентилятора метрополитена // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — № 1. — Т. 4. — С. 11–14.

7. **Красюк А. М., Лугин И. В.** Исследование динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 101–108.
8. **Красюк А. М., Лугин И. В., Павлов С. А.** Об эффекте возникновения циркуляционных колец и их влиянии на воздухораспределение в метрополитене мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2010. — № 4. — С. 75–82.
9. **Красюк А. М., Косых П. В., Русский Е. Ю.** Влияние возмущений воздушного потока от поршневого действия поездов на тоннельные вентиляторы метрополитенов // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 144–153.
10. **Ma J., Zhang X., Li A., Deng B., Lv W., Guo Y., Zhang W., and Huang L.** Analyses of the improvement of subway station thermal environment in northern severe cold regions, *Build. Environ.*, 2018, Vol. 143. — P. 579–590.
11. **Khaleghi M. and Talaee M. R.** Analysis of unsteady air flow in the subway station influenced by train movement, *Sci. Technol. Built Environ.*, 2019. — P. 1–10.
12. **Pan S., Fan L., Liu J., Xie J., Sun Y., Cui N., Zhang L., and Zheng B.** A review of the piston effect in subway stations, *Adv. Mech. Eng.*, 2013, Vol. 5. — 950205.
13. **Zhang X., Ma J., Li A., Lv W., Zhang W., Yang C., and Deng B.** Train-induced unsteady airflow effect analysis on a subway station using field experiments and numerical modelling, *Energy Build.*, 2018, Vol. 174. — P. 228–238.
14. **Zhang X., Ma J., Li A., Lv W., Zhang W., and Li D.** Ventilation for subway stations with adjustable platform doors created by train-induced unsteady airflow, *Build. Environ.*, 2019, Vol. 152. — P. 87–104.
15. **Zhang X., Li A., Gao R., Yu S., Ma J., Yang C., Li D., Guo Y., and Du W.** Effect of operational modes on the train-induced airflow and thermal environment in a subway station with full-height platform bailout doors, *Build. Environ.*, 2021, Vol. 194. — 107671.
16. **Xue P., You S., Chao J., and Ye T.** Numerical investigation of unsteady airflow in subway influenced by piston effect based on dynamic mesh, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2014, Vol. 40. — P. 174–181.
17. **Yan W., Naiping G., Lihui W., and Xiping W.** A numerical analysis of airflows caused by train-motion and performance evaluation of a subway ventilation system, *Indoor Built Environ.*, 2014, Vol. 23. — P. 854–863.
18. **Yang W. C., Peng L. M., Shi C. H., and Hu Z. L.** Numerical simulation on ventilation effect of train-induced wind in subway, *Appl. Mech. Mater.*, 2013. — P. 444–445.
19. **Андреев А. И.** Энергоэффективный автоматизированный электропривод для вентиляции метрополитена // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сб. науч. тр. — Новосибирск, 2014. — С. 37–39.
20. **Нетушил А. В., Балтрушевич А. В., Бурляев В. В.** Теория автоматического управления: нелинейные системы управления при случайных воздействиях. — М.: Высш. шк., 1983. — 432 с.
21. **Yurkevich V.D.** PI/PID control for nonlinear systems via singular perturbation technique, *Advances in PID Control*, Publisher in Tech., 2011. — P. 113–142.
22. **Лангеман Э. Г., Калугин М. В.** Автоматизация вентиляционной системы метрополитена // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. — 2013. — № 2. — С. 310–314.
23. **Шишова М. А., Петрунькина П. В.** Управление вентиляционной системой метрополитена с помощью нечеткой логики // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сб. науч. тр. — Новосибирск, 2016. — С. 165–167.
24. **Зедгенизов Д. В.** Обоснование требований к качеству автоматического управления проветриванием метрополитенов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — № 2. — Т. 6. — С. 108–112.

25. **Ледовских А. В.** Разработка алгоритмов управления станционными и перегонными вентиляторами в лабораторном стенде, выполненном в форме станции метрополитена // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. — 2014. — С. 90–93.
26. **Гиривой Д. В., Русский Е. Ю.** Синтез алгоритмов автоматического управления проветриванием станции метрополитена // Наука. Промышленность. Оборона: Тр. XVIII Всерос. науч.-техн. конф.; под ред. С. Д. Саленко. — 2017. — С. 141–145.
27. **Зедгенизов Д. В., Попов Н. А.** О повышении эффективности управления тоннельными вентиляторами метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 123–133.
28. **Петрунькина П. Д., Шишова М. А., Огнева Т. Д.** АСУ ТП вентиляции Новосибирского метрополитена // Наука. Технологии. Инновации. — 2015. — С. 157–159.
29. **Косов Н. В., Захаркина С. В.** Система автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитена // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2020): Сб. Всерос. науч. конф. молодых исследователей с междунар. участием, посвященной юбилейному году в ФГБОУ ВО РГУ им. А. Н. Косыгина. — 2020. — С. 90–92.
30. **Тетиор Л. Н., Дауров И. М.** Системы автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитенов // Метро и тоннели. — 2017. — № 5–6. — С. 32–33.

Поступила в редакцию 18/V 2022

После доработки 02/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022