



**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАСТРОЙКИ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
РЕГУЛЯТОРА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОННЕЛЬНОГО ВЕНТИЛЯТОРА**

**Д. В. Зедгенизов**

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

Выполнен анализ существующих методов расчета коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора системы автоматического управления производительностью осевого вентилятора метрополитена мелкого заложения. Представлена методика расчета коэффициентов регулятора в среде Mathlab (Simulink).

*Тоннельный вентилятор, регулятор, производительность, расчет коэффициентов*

**DETERMINING THE ADJUSTMENT FACTORS OF AUTOMATIC  
PERFORMANCE CONTROLLER OF TUNNEL FAN**

**D. V. Zedgenizov**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: dimzed2001@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Analysis of the existing methods for calculating the coefficients of proportional-integral controller of axial fan performance system in a shallow subway was carried out. The technique of calculating the controller coefficients in the Mathlab (Simulink) environment is presented.

*Tunnel fan, controller, performance, calculation of coefficients*

В настоящее время при модернизации вентиляторных агрегатов метрополитенов, либо при строительстве новых станций появляется возможность оперативного регулирования частоты вращения рабочего колеса вентилятора [1]. В большинстве таких случаев скорость вращения вала вентилятора регулируется преобразователем частоты (ПЧ) тока статора приводного электродвигателя вентилятора [2]. При настройке ПЧ службами эксплуатации возникает проблема задания числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части пропорционально-интегрального регулятора (ПИР) частоты вращения ротора вентилятора, встроенного в ПЧ. Ввод некорректных значений указанных коэффициентов и последующее регулирование производительности тоннельного вентилятора (ТВ) может привести к поломке оборудования и опасности нарушения требований документов, нормирующих микроклиматические параметры воздуха в подземных сооружениях [3–5]. Поэтому создание инженерной методики настройки ПИР системы автоматического управления производительностью (САУП) тоннельного вентилятора является актуальной задачей.

В теории автоматического управления разработан ряд методов расчета коэффициентов настройки для систем автоматического регулирования [6], но использование этих методов на практике имеет ряд недостатков.

Так, например, известен графо-аналитический (тангенциальный) метод нахождения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. Однако этот метод чувствителен к выбору точки, относительно которой проводится касательная к кривой переходного процесса исследуемой координаты. Метод требует определенной квалификации и опыта инженерно-технического персонала на производстве. Имеется также аналитический метод (метод А. М. Шубладзе). Помимо громоздких расчетов в научной литературе не приведены формулы для получения промежуточных значений коэффициентов при равенстве показателя степени знаменателя передаточной функции объекта единице (как в случае с системой автоматического управления тоннельного вентилятора), что затрудняет вычисления по данной методике.

Вместе с тем в настоящее время существует признанный специалистами пакет программ Simulink, который позволяет рассчитать коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора быстрее и точнее. Моделирование переходных процессов осуществляется путем численного интегрирования методом Дормана–Принса 4-5 порядка с автоматическим изменением шага интегрирования (ODE 45 Dormand–Prince variable-step). Описанные далее шаги по расчету коэффициентов основаны на применении этой программы.

**Описание методики определения коэффициентов.** Согласно данной методике для получения числовых значений коэффициентов пропорциональной и интегральной части ПИР необходимо выполнить следующие шаги:

**Шаг 1.** Сбор исходных данных с объекта управления. На этом этапе снимаются переходные процессы исследуемой координаты (например, производительности вентилятора при его запуске) [7], уточняются технические характеристики электродвигателя (номинальная частота вращения, момент инерции ротора) и самого вентилятора (момент инерции вала вентилятора).

**Шаг 2.** Составление структурной схемы САУП ТВ с электроприводом от преобразователя частоты тока статора электродвигателя (рис. 1), где  $K_{\text{пч}}$  — коэффициент преобразователя частоты, Гц/В;  $K_j$  — коэффициент усиления двигателя, рад/(с·Гц);  $T_j$  — постоянная времени двигателя, с;  $K_{\text{в}}$  — коэффициент усиления вентилятора, Па·с/рад;  $K_a$  — коэффициент усиления участка вентиляционной сети, м<sup>3</sup>/Па·с;  $T_a$  — постоянная времени участка вентиляционной сети, с;  $K_d$  — коэффициент усиления датчика объемного расхода воздуха, В·с/м<sup>3</sup>;  $U^*$  — входное задающее воздействие, В;  $U$  — напряжение управления преобразователем частоты, В;  $U_{\text{oc}}$  — напряжение на выходе датчика производительности вентилятора, В;  $f$  — частота тока двигателя вентилятора, Гц;  $\omega$  — частота вращения ротора вентилятора, рад/с;  $P_{\text{ст}}$  — статическое давление, развиваемое вентилятором, Па;  $Q$  — производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta Q$  — объемный расход воздуха от поршневого действия поездов, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{тв}}$  — расход воздуха, проходящий через тоннельный вентилятор, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{п1}}, Q_{\text{п2}}$  — расход воздуха от поршневого действия поезда 1 и поезда 2, м<sup>3</sup>/с;  $P_0$  — начальные условия по давлению, Па;  $Q_0$  — начальные условия по производительности, м<sup>3</sup>/с;  $P$  — регулятор производительности вентилятора.

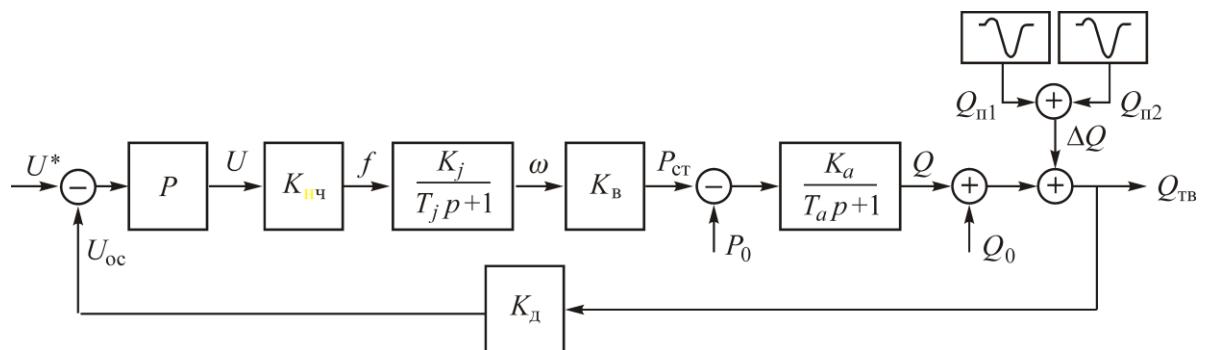


Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления производительностью тоннельного вентилятора от преобразователя частоты

**Шаг 3.** Расчет параметров структурной схемы. Необходимо вычислить все коэффициенты передачи, постоянные времени, начальные условия, параметры линеаризации, диапазоны изменения входного и выходного воздействий, а также оценить влияние возмущений, вносимых движущимися поездами метро на воздушный поток, создаваемый вентилятором при его регулировании [8–10].

**Шаг 4.** Установление требований к качеству переходного процесса регулирования производительности тоннельного вентилятора с учетом поршневого эффекта и выбранного режима управления вентилятором. На этом этапе определяются требуемое время переходного процесса и величина перерегулирования [11–21]. При этом важно учесть, что при увеличении интенсивности движения поездов по линии процесс регулирования производительности вентилятора на текущем такте должен заканчиваться как можно раньше момента прохождения следующего поезда. Для повышения экономичности управления регулирование частоты вращения ротора должно заканчиваться не позднее 1/3 от интервала времени до следующего поезда метро.

**Шаг 5.** Составление структурной схемы САУП ТВ в программе Mathlab (Simulink). Здесь происходит ввод числовых значений параметров блоков, настройка входного блока “Step” и блока вывода переходных процессов “Scope”. В качестве блока регулятора САУП используется блок “PID Controller” из стандартной библиотеки Simulink (рис. 2).

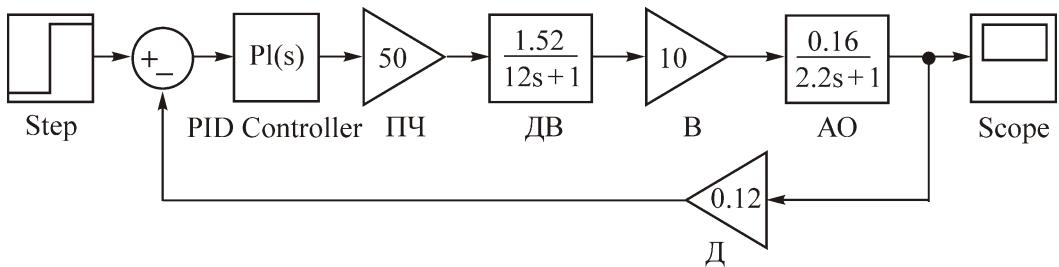


Рис. 2. Структурная схема САУП ТВ в программе Mathlab: Step — блок ввода параметров входного воздействия; PID Controller — блок настройки параметров регулятора; ПЧ — блок преобразователя частоты; ДВ — блок моделирования двигателя вентилятора; В — блок параметров вентилятора; АО — блок расчета параметров вентиляционной сети (аэродинамический объект); Scope — блок вывода переходных процессов системы; Д — блок датчика обратной связи по расходу воздуха

**Шаг 6.** Настраивается желаемый вид переходного процесса регулирования производительности. В блоке “PID Tuner” устанавливаются требуемые параметры переходного процесса выходной координаты системы (перерегулирование и время переходного процесса) (рис. 3).

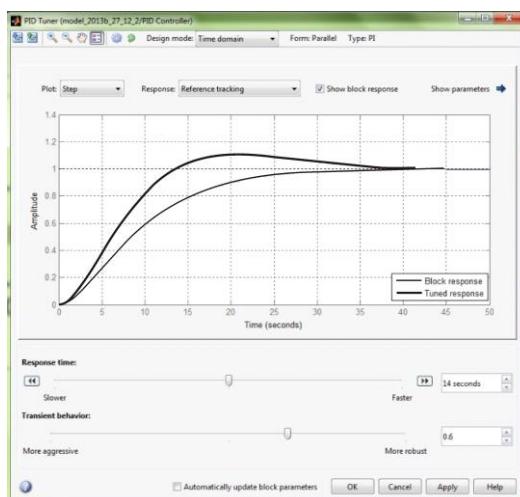


Рис. 3. Диалоговое окно настройки желаемого вида переходного процесса

**Шаг 7.** Запускается расчет системы и контролируется вид переходного процесса по блоку “Scope”. После проверки выполнения требований к переходному процессу считаются числовые значения коэффициентов пропорциональной и интегральной частей ПИР САУП ТВ. Для графического нахождения коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора выполняются расчеты при постоянных времени двигателя  $T_{ДВ}$  и объекта  $T_A$ , отличных от заданных ( $T_{ДВ} = 3-48$  с,  $T_A = 0.55-8.8$  с). Значения  $K_P$  и  $K_I$  для обеспечения требуемого расхода вентилятора  $27$  м<sup>3</sup>/с при интенсивности движения поездов 12 пар / ч приведены в таблице.

Коэффициенты пропорциональной  $K_P$  и интегральной  $K_I$  частей регулятора

$T$ , с	$K_P$	$K_I$
$T_{ДВ} = 3$	0.0345	0.0093
$T_{ДВ} = 6$	0.0441	0.00757
$T_{ДВ} = 12$	0.0779	0.00678
$T_{ДВ} = 24$	0.1867	0.00791
$T_{ДВ} = 48$	0.378	0.008
$T_A = 0.55$	0.1277	0.0107
$T_A = 1.1$	0.0847	0.00767
$T_A = 2.2$	0.0779	0.00678
$T_A = 4.4$	0.0784	0.0058
$T_A = 8.8$	0.0915	0.00512

Для удобства практического использования результатов расчетов коэффициентов ПИР построены зависимости их изменения от постоянной времени двигателя и объекта (рис. 4).

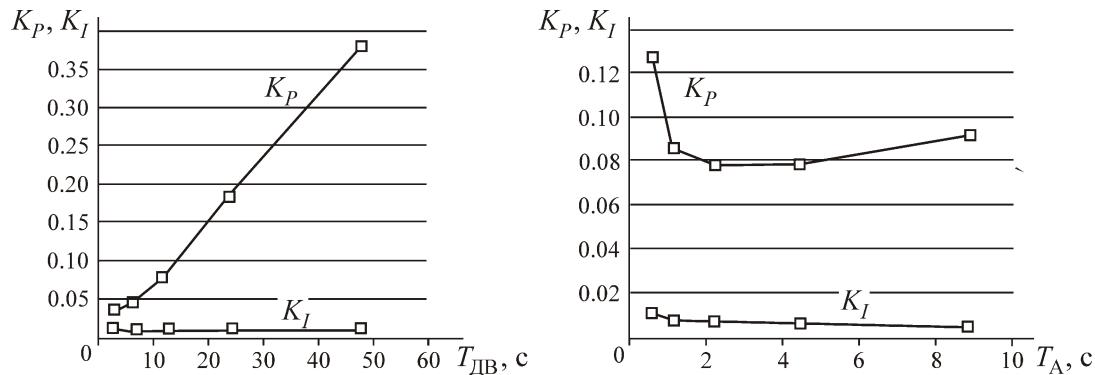


Рис. 4. Изменение рассчитанных коэффициентов пропорционально-интегрального регулятора в зависимости от постоянной времени двигателя и объекта

## ВЫВОДЫ

Коэффициент пропорциональной части пропорционально-интегрального регулятора увеличивается при возрастании значения постоянной времени двигателя и достигает минимума при изменении постоянной времени аэродинамического объекта. Коэффициент интегральной части регулятора производительности вентилятора изменяется незначительно и в исследуемом рабочем диапазоне значений может быть принят постоянным.

Проведенные исследования позволили разработать методику определения коэффициентов настройки преобразователя частоты тока электродвигателя тоннельного вентилятора, которая впервые учитывает время регулирования расхода воздуха для каждой интенсивности движения поездов. При этом время регулирования определяется по условию завершения текущего переходного процесса до начала следующего и не должно превышать 1/3 от фактического интервала движения поездов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Krasyuk A. M. and Lugin I. V.** Ventilation of subways, Novosibirsk, Nauka, 2019, 316 pp. [Красюк А. М., Лугин И. В. Вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2019. — 316 с.]
2. **Krasyuk A. M.** Tunnel ventilation of subways, Novosibirsk, Nauka, 2006, 164 pp. [Красюк А. М. Тоннельная вентиляция метрополитенов. — Новосибирск: Наука, 2006. — 164 с.]
3. **SP 32-105-2004.** Code of rules for design and construction. Undergrounds, Moscow, FGUP CPP, 2004, 18 pp. [СП 32-105-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Метрополитены. — М.: ФГУП ЦПП, 2004. — 18 с.]
4. **Tsodikov V. J.** Ventilation and heat supply of subways, Moscow, Nedra, 1975, 568 pp. [Цодиков В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов. — М.: Недра, 1975. — 568 с.]
5. **Gromov V. N.** Features of ensuring the microclimate of subways, Transport planning and modeling, Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, 2017, pp. 96–103. [Громов В. Н. Особенности обеспечения микроклимата метрополитенов // Транспортное планирование и моделирование: сб. трудов II Междунар. науч.-практ. конф. — 2017. — С. 96–103.]
6. **Netushil A. V., Baltrushevitch A. V., and Burliaevel V. V.** Automatic control theory: Nonlinear control systems under random influences, Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 432 pp. [Нетушил А. В., Балтрушевич А. В., Бурляев В. В. Теория автоматического управления: Нелинейные системы управления при случайных воздействиях / Учебник для вузов. — М.: Высш. школа, 1983. — 432 с.]
7. **Zedgenizov D. V.** The results of an experimental study of underground tunnel's rotor speed control, Fundamental and Applied Mining Science, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 11–14. [Зедгенизов Д. В. Результаты экспериментального исследования процесса регулирования частоты вращения ротора тоннельного вентилятора метрополитена // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 1. — С. 11–14.]
8. **Krasyuk A. M. and Lugin I. V.** Study of the dynamics of air flows from the disturbing action of trains in the subway, Journal of Mining Science, 2007, no. 6, pp. 101–108. [Красюк А. М., Лугин И. В. Исследование динамики воздушных потоков от возмущающего действия поездов в метрополитене // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 101–108.]
9. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Pavlov S. A.** On the effect of circulation rings and their influence on air distribution in shallow metro, Journal of Mining Science, 2010, no. 4, pp. 75–82. [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.]
10. **Krasyuk A. M., Khosih P. V., and Russkii E. Y.** Influence of air flow disturbances from the piston action of trains on tunnel fans of subways, Journal of Mining Science, 20014, no. 2, pp. 144–153. [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.]
11. **Andreev A. I.** Energy-efficient automated electric drive for underground ventilation, Scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region, Collection of scientific papers, Novosibirsk, 2014, pp. 37–39. [Андреев А. И. Энергоэффективный автоматизированный электропривод для вентиляции метрополитена // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сб. науч. трудов. — Новосибирск, 2014. — С. 37–39.]
12. **Yurkevich V. D.** PI/PID Control for nonlinear systems via singular perturbation technique, Advances in PID Control, Publisher in Tech., 2011, pp. 113–142.
13. **Langeman E. G. and Khalugin M. V.** Metro ventilation system automation, Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East, Collection of Scientific Papers 2013, no. 2, pp. 310–314. [Лангеман Э. Г., Калугин М. В. Автоматизация вентиляционной системы метрополитена // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока: сб. науч. трудов. — 2013. — № 2. — С. 310–314.]
14. **Shishova M. A. and Petrunkina P. V.** Controlling the ventilation system of the subway using fuzzy logic, Scientific potential of students and young scientists of the Novosibirsk region, Collection of scientific papers Novosibirsk, 2016, pp. 165–167. [Шишова М. А., Петрунькина П. В. Управление вентиляционной системой метрополитена с помощью нечеткой логики // Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области: сб. науч. трудов. — Новосибирск, 2016. — С. 165–167.]

15. **Zedgenizov D. V.** Substantiation of quality requirements for automatic control of ventilation of subways, Fundamental and Applied Mining Science, 2019, no. 2, vol. 6, pp. 108 – 112. [Зедгенизов Д. В. Обоснование требований к качеству автоматического управления проветриванием метрополитенов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 108 – 112.]
16. **Ledovskih A. V.** Development of control algorithms for station and distillation fans in a laboratory bench made in the form of a metro station, The science. Technologies. Innovations, Materials of the all-Russian scientific conference of young scientists, 2014, pp. 90 – 93. [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.]
17. **Girivoi D. V. and Russkii E. Y.** Synthesis of algorithms for automatic control of the ventilation of a metro station, Science. Industry. Defense, Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Technical Conference, 2017, pp. 141 – 145. [Гиривой Д. В., Русский Е. Ю. Синтез алгоритмов автоматического управления проветриванием станции метрополитена // Наука Промышленность Оборона: труды XVIII Всерос. науч.-техн. конф. — 2017. — С. 141 – 145.]
18. **Zedgenizov D. V. and Popov N. A.** Improving of underground's tunnels fans control efficiency, Journal of Mining Science, 2018, no. 4, pp. 123 – 133. [Зедгенизов Д. В., Попов Н. А. О повышении эффективности управления тоннельными вентиляторами метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 123 – 133.]
19. **Petrunkina P. D., Shishova M. A., and Ogneva T. D.** ACS TP ventilation of the Novosibirsk metro, Science. Technologies. Innovations, Materials of the all-Russian scientific conference of young scientists 2015, pp. 157 – 159. [Петрунькина П. Д., Шишова М. А., Огнева Т. Д. АСУ ТП вентиляции Новосибирского метрополитена // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. — 2015. — С. 157 – 159.]
20. **Khosov N. V. and Zaharkhina S. V.** Automatic control system for ventilation units of the subway, Innovative development of engineering and technology in industry (Intex-2020), Collection of materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation, 2020, pp. 90 – 92. [Косов Н. В., Захаркина С. В. Система автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитена // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (Интекс-2020): сб. материалов Всерос. науч. конф. молодых исследователей с международным участием, 2020. — С. 90 – 92.]
21. **Tetior L. N. and Daurov I. M.** Automatic control systems for ventilation units in subways, Journal Metro and Tunnels, 2017, no. 5-6, pp. 32 – 33. [Тетиор Л. Н., Дауров И. М. Системы автоматического управления вентиляционными агрегатами метрополитенов // Метро и тоннели. — 2017. — № 5-6. — С. 32 – 33.]