

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.07

УДК 62-83:62-712.3

**Р.П. Ижевский<sup>1</sup>, В.П. Метельков<sup>2</sup>**<sup>1</sup>АО «АМЗ «Вентпром», Артёмовский, Российская Федерация<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Шахтные вентиляторные установки являются одними из наиболее энергоемких потребителей в составе шахтного электрооборудования. На электропривод вентиляторов приходится до 10–12 % всей энергии, потребляемой добывающим предприятием, а годовая стоимость электроэнергии, потребляемой вентиляционной установкой, может составлять до 40 % ее стоимости. Это обстоятельство делает актуальной задачу поиска упрощенных методик расчета, обеспечивающих минимальные финансовые затраты на электропотребление при оптимальных режимах работы вентиляторной установки на стадии проектирования системы вентиляции, когда еще не известны все подробности конфигурации и параметры места расположения проектируемой установки, а также на стадии ее эксплуатации в условиях незначительных изменений газодинамики и аэродинамики шахтной сети. Техническая сторона оптимизационных моделей обеспечивается системой управления с частотно-регулируемым электроприводом, плавно изменяющей в широком диапазоне основные энергетические и аэродинамические характеристики вентиляторной установки. Для реализации программного обеспечения часто используется общеизвестный оптимизационный блок Excel, а также специализированное ПО SIMATIC. **Цель исследования:** решение оптимизационной задачи, позволяющей определить режим работы шахтной ВУ с частотно-регулируемым электроприводом, соответствующий условию минимизации финансовых затрат на электропотребление с учетом ограничений, определяющих допустимую область функционирования, на этапе как предварительного проектирования, так и эксплуатации. **Методы:** построение оптимизационной задачи на основе аэродинамической характеристики вентиляторной установки, пригодной для решения ее методом линейного программирования. **Результаты:** предложена достаточно простая методика поиска оптимальных, по финансовым затратам на электропотребление, технологических параметров вентиляторной установки и рассмотрен пример решения оптимизационной задачи на основе метода линейного программирования применительно к системе главного проветривания АВМ44.

**Ключевые слова:** шахтная вентиляторная установка, аэродинамическая характеристика, регулирование скорости вентилятора, частотно-регулируемый электропривод, экономия электроэнергии, оптимизационная задача, линейное программирование.

**R.P. Izhevskiy<sup>1</sup>, V.P. Metelkov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>AMZ Ventprom JSC, Artyomovskiy, Russian Federation

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

## **OPTIMIZATION OF THE MINE FAN INSTALLATION AERODYNAMIC CHARACTERISTICS PARAMETERS**

Mine fan installations are one of the most energy-intensive consumers as part of mine electrical equipment. The electric drive of fans accounts for up to 10–12 % of all energy consumed by a mining enterprise. The annual cost of electricity consumed by a ventilation unit can be up to 40 % of its cost. This circumstance makes the problem of searching for simplified calculation methods that provide minimal financial costs for power consumption under optimal operating modes of the fan installation at the stage of designing a ventilation system relevant, when all the details of the configuration and location parameters of the designed installation are not yet known, as well as at the stage of its operation in conditions of minor changes in the gas dynamics and aerodynamics of the mine network. The technical side of the optimization models is provided by a control system with a frequency-controlled electric drive, which smoothly changes the main energy and aerodynamic characteristics of the fan installation over a wide range. To implement the software, the well-known Excel optimization block is often used, as well as specialized SIMATIC software. **The purpose of the study:** Solving an optimization problem that allows you to determine the operating mode of a mine ventilation installation with a frequency-controlled electric drive, corresponding to the condition for minimizing the financial costs of power consumption, taking into account the restrictions that determine the allowable area of operation, at the stage of both preliminary design and operation. **Methods:** Construction of an optimization problem based on the aerodynamic characteristics of a fan installation, suitable for solving it by the linear programming method. **Results:** A fairly simple method for finding the optimal, in terms of financial costs for power consumption, technological parameters of a fan installation is proposed and an example of solving an optimization problem based on the linear programming method in relation to the main ventilation system AVM44 is considered.

**Keywords:** mine fan installation, aerodynamic characteristic, fan speed control, frequency-controlled electric drive, energy saving, optimization problem, linear programming.

### **Введение**

Современные шахтные системы главного проветривания используются для обеспечения воздухообмена в подземных горных выработках и создания в них атмосферных условий с заданными параметрами. Шахтные системы главного проветривания представляют собой сложный программно-инструментальный комплекс с большим количеством обрабатываемой информации, структурно состоящий из объекта управления и устройства управления (контроллера) (рис. 1).

Объектом управления является вентиляторная установка (ВУ), включающая частотный преобразователь, асинхронный электродвигатель, рабочее колесо вентилятора и другие вспомогательные устройства, обеспечивающие режимы работы ВУ.

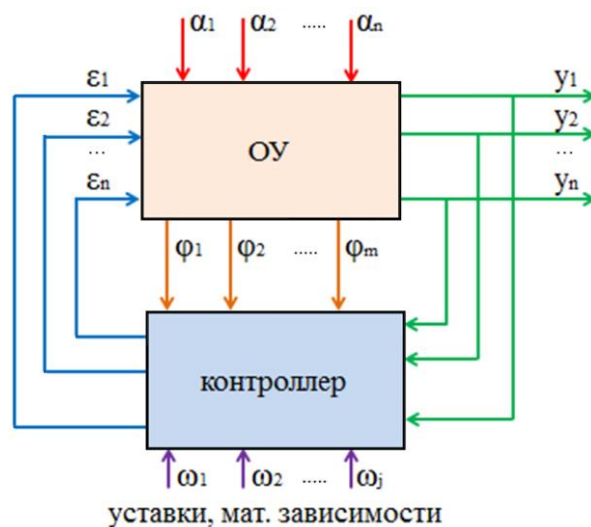


Рис. 1. Структурная схема контура управления ВУ

Вентиляторные установки находятся среди наиболее мощных электроустановок шахты и, соответственно, среди наиболее энергоемких потребителей. Из всего расхода электроэнергии, потребляемой добывающим предприятием, на электропривод вентиляторов приходится до 10–12 % всей энергии [1]. Годовая плата за электроэнергию на проветривание может составлять до 40 % стоимости главной вентиляторной установки [2]. Поэтому актуальной является задача поиска оптимальных режимов работы ВУ, обеспечивающих минимальные финансовые затраты на электропотребление как на стадии ее проектирования, так и в процессе эксплуатации.

Введение частотно-регулируемого привода в состав объекта управления позволило расширить возможности для оптимизации режимов работы с точки зрения ее энергетической эффективности за счет плавного изменения в широком диапазоне основных энергетических и аэродинамических характеристик ВУ [3–5], а также ее окупаемость в течение 9 месяцев [6, 7]. Это обстоятельство позволяет актуализировать задачу поиска упрощенных методик расчета, обеспечивающих минимальные финансовые затраты на электропотребление при оптимальных режимах работы ВУ по ее основному параметру – производительности. Решение такой задачи, кроме того, актуально на стадии проектирования установки для выбора целесообразного варианта приводного электродвигателя.

## **1. Постановка задачи**

Различные аспекты оптимизации с целью экономии электроэнергии в приводах шахтных вентиляторных установок неоднократно рассматривались в многочисленных публикациях. В [8] показано, как грамотное инженерное проектирование воздушных каналов и механических элементов вентиляционной установки может быть использовано для повышения ее производительности и эффективности. Показано, что при правильном проектировании система вентиляторов может работать с существенной экономией электроэнергии и эксплуатационных расходов. В работе [9] представлен подход, основанный на использовании динамической эмпирической модели шахтных вентиляционных систем, с целью оптимизации общего распределения воздуха. Предлагается использование динамической модели с измерением расхода воздуха для осуществления координированного управления вентиляторами в масштабе всей шахты.

В работе [10] описаны возможности разработки и внедрения программ управления вентиляцией шахты с целью снижения эксплуатационных расходов на ней при обеспечении соблюдения нормативных требований.

Зачастую при исследовании возможностей повышения эффективности вентиляционных систем используются весьма сложные подходы, например: генетические алгоритмы [11–14], 3D моделирование [15, 16], CFD (Computational Fluid Dynamics) [17–21], бионические алгоритмы [22], то есть решения, предъявляющие весьма высокие требования к вычислительной технике и специфические требования к уровню владения этими методами для инженерного персонала.

В работе ставится задача получения достаточно простого в использовании приближенного метода оптимизации количественных показателей параметров аэродинамической характеристики шахтной ВУ для получения оптимальной, по финансовым затратам на электропотребление, производительности вентиляторной установки. Здесь оговоримся, что не рассматриваем в данном случае вопрос энергетической оптимизации с точки зрения законов управления частотным электроприводом с целью минимизации потерь в самом двигателе (это отдельный вопрос, который подробно рассмотрен в специальной литературе, например, в [23]).

## **2. Конструкция и режим работы шахтной вентиляционной установки**

Рассмотрим задачу применительно к вентиляторной установке главного проветривания АВМ44 (рис. 2) для шахты Уральского ГОКа.

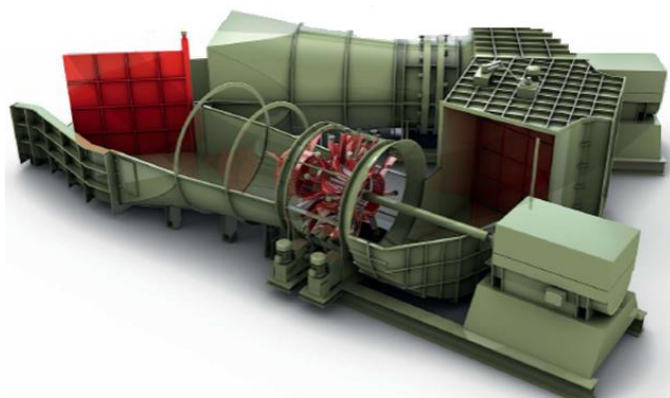


Рис. 2. Установка главного проветривания АВМ44

В состав этой вентиляторной установки входят:

– реверсивный осевой одноступенчатый вентилятор ВО-44/26,4АР в комплекте с входной коробкой, диффузором (входная коробка и диффузор с шумоглушением), спрямляющим аппаратом с электро-механическим приводом, трансмиссионным валом с пластинчатой необслуживаемой муфтой, электро-механическим колодочным тормозом и асинхронным электродвигателем главного привода с учетом 10 % запаса (3600 кВт, 750 об/мин, 6000 В), в количестве 2 шт.;

– маслостанция (для смазки подшипников ротора вентилятора), в количестве 2 шт.;

– система автоматического управления САУ-2ВО44-2ПЧ в комплекте с двумя частотными преобразователями и комплектом датчиков в количестве 1 комплект (датчики давления и расхода воздуха, датчик температуры и вибрации, светосигнальная аппаратура, контроллер S7-1200).

Рабочее колесо вентилятора при проектировании установки выбирается, исходя из требований заказчика по обеспечению шахты воздухом, имеющим химический состав, достаточно близкий к атмосферному. Однако в связи со стохастическим характером газодинамики и аэродинамики шахтной сети вентиляторную установку подбирают

с некоторым запасом давления (до 50 %) и, как следствие, с выходом на производительность, превышающую расчетную.

Для поддержания заданной величины производительности в системе САУ-2ВО44-2ПЧ реализован контур управления, представляющий собой два уровня иерархической структуры АСУ ТП (см. рис. 1).

Рабочий режим вентиляторной установки определяется рабочей точкой (РТ1), которая находится на пересечении графиков характеристик вентилятора и сети. Таким образом, рабочая точка выбирается из условия преодоления потоком воздуха вентилятора сопротивления сети (рис. 3).

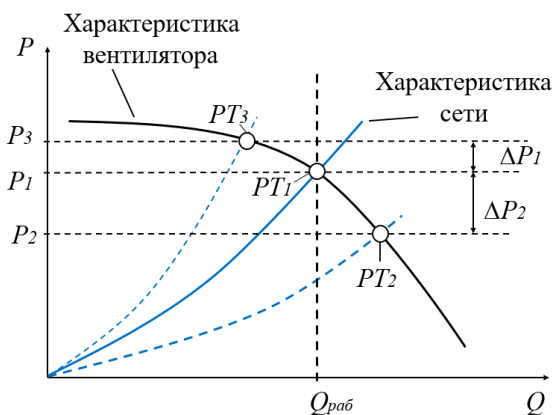


Рис. 3. К взаимосвязи расхода воздуха и сопротивления сети при различной скорости вращения рабочего колеса вентилятора

С учетом того, что процессы газодинамики носят стохастический характер, аэродинамическое сопротивление шахтной сети постоянно изменяется, что заставляет рабочую точку  $РТ1$  смещаться по кривой характеристике вентилятора, что в свою очередь приводит к перерасходу электроэнергии [24, 25]. Например, если давление в сети увеличилось на величину  $\Delta P_1$ , то рабочая точка  $РТ1$  сместится вверх до положения  $РТ3$ , при этом уменьшится производительность ВУ (см. рис. 3). Данная информация, измеренная датчиком, поступает в устройство управления, где по заданному алгоритму сравнивается с исходной ( $\omega_1$ ). По результату сравнения вырабатывается управляющее воздействие ( $\varepsilon_1$ ) на частотный преобразователь для компенсации отклонения. Частотный преобразователь изменяет частоту вращения рабочего колеса вентилятора, и рабочая точка перемещается в положения  $РТ1$ . При уменьшении давления на величину  $\Delta P_2$  рабочая точка  $РТ1$  сместится

вниз до положения РТ2, что приводит к увеличению производительности ВУ. Устройство управления аналогично отрабатывает задачу компенсации отклонения.

Процесс поддержания заданной величины производительности описывается следующими зависимостями:

- частота вращения ( $n$ ) пропорциональна частоте сети ( $f$ ):

$$n = k f ; \quad (1)$$

- производительность пропорциональна частоте вращения:

$$\frac{Q_{\text{НОМ}}}{Q} = \frac{n_{\text{НОМ}}}{n} ; \quad (2)$$

- мощность пропорциональна частоте вращения в третьей степени:

$$\frac{N_{\text{НОМ}}}{N} = \left( \frac{n_{\text{НОМ}}}{n} \right)^3 . \quad (3)$$

Для определения возможных условий функционирования проектируемой вентиляционной системы в заводской лаборатории АО «АМЗ «Вентпром», в соответствии с ГОСТ 10921-2017, были проведены испытания в различных режимах и построена полная аэродинамическая характеристика вентилятора (рис. 4).

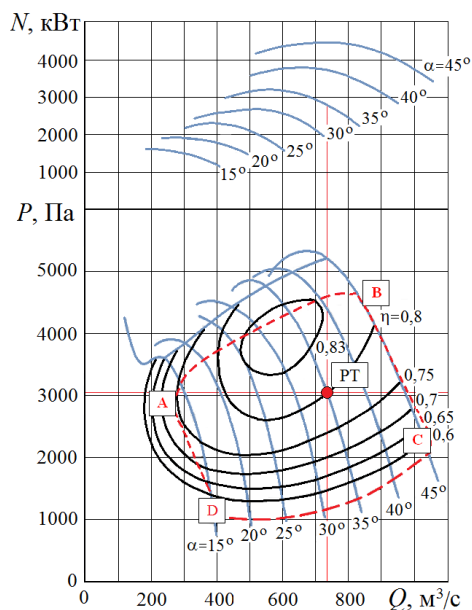


Рис. 4. Аэродинамическая характеристика вентиляторной установки при различной нагрузке

Аэродинамическая характеристика вентилятора представляет собой графическую зависимость между производительностью  $Q$ , полным давлением  $P$ , мощностью на валу  $N$ , коэффициентом полезного действия  $\eta$  при определенном диаметре рабочего колеса и известной плотностью перемещаемой среды. Каждому углу установки лопаток соответствуют определенные кривые  $Q - P$ ,  $Q - N$  и  $Q - \eta$ . Кривые сняты для диапазона углов установки лопаток от  $15^\circ$  до  $45^\circ$ .

Анализ аэродинамической характеристики показывает, что режим работы вентиляторной установки, с одной стороны, зависит от технических характеристик устройств, входящих в нее, а с другой – тесно связан с параметрами вентиляционной системы. При этом выбор и поддержание технических параметров устройств, входящих в ВУ, являются достаточно контролируемым процессом, а управление характеристикой вентиляционной сети и ее контроль – значительно сложнее.

Стохастический характер газодинамики и аэродинамики шахтной сети и производительность, превышающая расчетную, приводят к снижению эффективности функционирования системы. С другой стороны, каждому значению максимума параметров ( $P$ ,  $N$ ,  $\eta$ ) соответствует свое значение производительности. В этой ситуации возникает необходимость поиска оптимальной производительности ВУ, обеспечивающей минимальные финансовые затраты на электропотребление с учетом ограничений, определяющих допустимую область функционирования.

### **3. Задача оптимизации**

С учетом практики применения вентиляторных устройств на аэродинамической характеристике выделяется зона рабочего использования вентилятора ABCD (см. рис. 4, табл. 1), являющаяся зоной экономичной работы. Верхняя граница этой зоны (линия АВ) строится из условия обеспечения устойчивой работы вентилятора при возможных изменениях шахтной вентиляционной сети. Верхнюю границу рекомендуется строить из расчета запаса давления в 50 % от расчетной величины. Нижняя граница зоны (линия CD) строится из условия минимальной экономичной работы вентилятора и соответствует статическому КПД  $\eta = 0,6$ .

Поскольку ВУ должна быть подобрана с некоторым запасом давления, то и заданная по техническим условиям производительность превышает расчетную и составляет  $730 \text{ м}^3/\text{с}$ .



Таблица 1

Показатели аэродинамической характеристики в расчетном диапазоне проектируемой вентиляционной сети для угла поворота лопаток  $35^\circ$

Производительность, м <sup>3</sup> /с ( $Q$ )	Давление, Па ( $P$ )	Мощность, кВт ( $N$ )
450	4660	3050
475	4830	3150
500	4860	3180
525	4845	3215
550	4825	3220
575	4660	3240
<b>600</b>	<b>4500</b>	<b>3210</b>
625	4325	3200
650	4115	3115
675	3865	3030
<b>700</b>	<b>3515</b>	<b>2970</b>
725	3240	2865
750	2864	2785
775	2470	2650
<b>800</b>	<b>2000</b>	<b>2490</b>

Боковые границы зоны соответствуют предельным углам установки лопаток рабочего колеса, рекомендованным для данного вентилятора (минимальный угол  $15^\circ$ , максимальный  $45^\circ$ ).

С целью исключения неустойчивой работы вентилятора его рабочие режимы должны располагаться на нисходящей прямолинейной ветви аэродинамической характеристики, т.е. депрессия вентилятора не должна превышать 70 % от максимального значения. С точки зрения экономичности рабочий режим должен обеспечивать КПД вентилятора более 70 % от максимального значения.

В этой ситуации возникает вопрос, какой должна быть оптимальная производительность, удовлетворяющая наиболее благоприятным техническим требованиям как к вентиляционной сети, так и требованиям к энергосбережению? Ответ на этот вопрос может быть получен в результате решения оптимизационной задачи, позволяющей определить оптимальную производительность при минимальных финансовых затратах на электропотребление.

В соответствии с техническими условиями для проектируемой вентиляционной системы угол поворота лопаток рабочего колеса выбран  $\alpha = 35^\circ$ . Для данного угла зависимость основных показателей аэродинамической характеристики ( $Q, P, N$ ) показана на рис. 4.

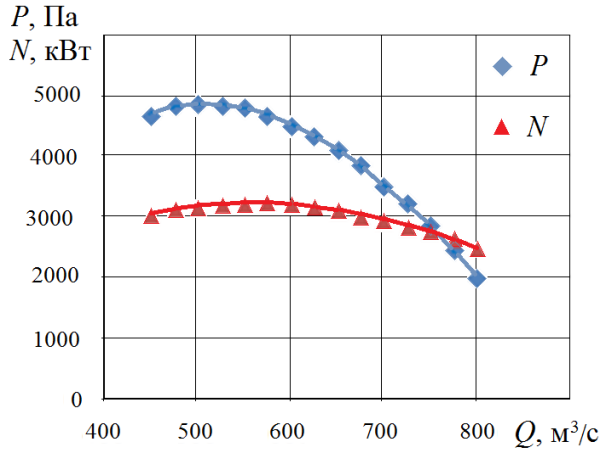


Рис. 5. Зависимость основных показателей аэродинамической характеристики ( $Q, P, N$ ) при  $\alpha = 35^\circ$

Зная максимальную производительность ( $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и максимальную скорость вращения рабочего колеса ( $750 \text{ об/мин}$ ), находим скорость вращения рабочего колеса для заданной производительности:  $n = kQ = 0,75 \cdot 730 = 547,5 \text{ об/мин}$ , где  $k = 0,75$  – коэффициент, рассчитанный как отношение максимальной скорости вращения ( $750 \text{ об/мин}$ ) к максимальной производительности ( $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Частотный преобразователь при этом формирует частоту:  $f = n/15 = 36,5 \text{ Гц}$ .

Для измеренных и рассчитанных значений выберем область определения задачи, которая представляет некоторый диапазон изменения основных параметров, в пределах которого производительность должна быть оптимальной (от  $600$  до  $800 \text{ м}^3/\text{с}$ ). В качестве ограничений выбраны граничные показатели для выбранных условий и требований к сети (табл. 2).

В качестве целевой функция  $Y$  представляется целесообразным задать стоимость электроэнергии, которая должна быть минимальной при оптимальной производительности:

$$Y = C \cdot X^T \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $C$  – вектор стоимостей электроэнергии,  $C = [c_1, c_2, c_3]$  при трех различных производительностях  $Q_1, Q_2$  и  $Q_3$ ;  $X$  – вектор произвольных начальных приближений,  $X = [x_1, x_2, x_3]$ .

Ограничения в форме системы линейных алгебраических неравенств можем представить следующим образом:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{X}^T \leq P_{lim}, \quad (5)$$

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{X}^T \leq N_{lim}, \quad (6)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X}^T \leq \alpha_{lim}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{X}^T \leq \eta_{lim}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, P_3]$ ,  $\mathbf{N} = [N_1, N_2, N_3]$ ,  $\mathbf{A} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]$  и  $\mathbf{B} = [\eta_1, \eta_2, \eta_3]$  – векторы значений давления, мощности, угла установки лопаток и КПД, соответствующие значениям производительности  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$ , а  $P_{lim}$ ,  $N_{lim}$ ,  $\alpha_{lim}$ , и  $\eta_{lim}$  – граничные значения этих показателей, определяющие допустимую область функционирования.

Исходный опорный план для решения рассматриваемой оптимизационной задачи применительно к установке главного проветривания АВМ44 при значениях производительности 600, 700, 800 м<sup>3</sup>/с и скорости вращения рабочего колеса 450, 525, 600 об/мин соответственно представлен в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры для различной производительности

Параметры	Производительность			Граничные значения
	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	
$P$ , давление, Па	4500	3515	2000	$\leq 4100$
$N$ , мощность на валу ВУ, кВт	3210	2970	2490	$\leq 3100$
$\alpha$ , угол поворота лопаток рабочего колеса, град	35	35	35	$\leq 35$
$\eta$ , КПД	0,83	0,82	0,65	$\geq 0,83$
Стоимость электроэнергии, тыс. руб	11	13	14	

Числовые значения, входящие в целевую функцию (стоимость электроэнергии, которая должна быть минимальной при оптимальной производительности), выбраны формально как с точки зрения описания методики, так и из коммерческих соображений.

В соответствии с этим можем записать:  $\mathbf{P} = [4500, 3515, 2000]$ ,  $\mathbf{N} = [3210, 2970, 2490]$ ,  $\mathbf{A} = [35, 35, 35]$ ,  $\mathbf{B} = [0,83, 0,82, 0,65]$ ,  $\mathbf{C} = [11, 13, 14]$ ,  $P_{lim} = 4100$ ,  $N_{lim} = 3100$ ,  $\alpha_{lim} = 35$ ,  $\eta_{lim} = 0,83$ .

В рассматриваемой постановке оптимизационную задачу не представляет сложности решить с использованием стандартных средств,

предоставляемых различными программными пакетами, например, методом линейного программирования в среде прикладного пакета Microsoft Excel. В табл. 3 показаны результаты решения с использованием симплекс метода в среде прикладного пакета Microsoft Excel.

Таблица 3

### Результат оптимизации

Параметры	Результат оптимизации
Давление, Па	4100
Мощность, КВт	3081,24
угол $\alpha$ , град	35,00
КПД	0,83
Скорость вращения рабочего колеса, об/мин	484,5
частота на выходе ЧП, Гц	<b>32,3</b>
Стоимость электроэнергии, тыс. руб.	<b>11,96</b>
Расчетная оптимальная производительность, м <sup>3</sup> /с	<b>646</b>

### Заключение

Таким образом, предложена достаточно простая методика поиска оптимальной производительности ВУ, обеспечивающей минимальные финансовые затраты на энергопотребление с учетом ограничений, определяющих допустимую область функционирования. Определены соответствующие технические параметры скорости вращения рабочего колеса и частоты на выходе частотного преобразователя в статических условиях газодинамики и аэродинамики шахтной сети для работы САУ.

Поиск такого оптимального, по финансовым затратам на электропотребление, режима работы вентиляторной установки весьма важен на этапе создания электропривода для нее. Это обусловлено тем, что результаты такого расчета выступают в роли «базового» набора данных, на основе которого можно выбрать наиболее подходящий электродвигатель либо сформировать исходные требования к его параметрам в случае, когда возможно проектирование электродвигателя непосредственно для проектируемой вентиляторной установки.

### Библиографический список

1. Сайт Ventilator.PRO [Электронный ресурс]. – URL: <https://ventilator.pro/ventilatory/Classification/shahtnye/> (дата обращения: 11.12.2023).

2. Шонин, О.Б. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотнорегулируемым приводом / О.Б. Шонин, В.С. Пронько // Научно-технические ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. – 2014. – № 2 (195). – С. 49–57.

3. Пронько, В.С. Энергосбережение в стационарных установках горных предприятий на основе экстремального управления частотно-регулируемым приводом / В.С. Пронько, О.Б. Шонин // Технические науки: современные проблемы и перспективы развития: тр. I Междунар. науч.-практ. конф. – Йошкар-Ола, Россия, 2013. – С. 87–89.

4. Shonin, O.B. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive / O.B. Shonin, V.S. Pronko // ANNUAL of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski». – 2013. – Vol. 56, Part III. – P. 163–169.

5. Plessis, G.E.D. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems / G.E.D. Plessis, L. Liebenberg, E.H. Mathews // Applied Energy. – 2013. – Vol. 111. – P. 16–27. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.061

6. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный привод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

7. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines / A.J.H. Nel, D.C. Arndt, J.C. Vosloo, M.J. Mathews // Journal of cleaner production. – 2019. – № 232. – P. 379–390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.376

8. De Souza, E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages / E. De Souza // Applied Thermal Engineering. – 2015. – № 90. – P. 1092–1097. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.048

9. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption / S. Sjöström, E. Klintenäs, P. Johansson, J. Nyqvist // International Journal of Mining Science and Technology. – 2020. – Vol. 30, iss. 4. – P. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016

10. De Souza, E. Application of ventilation management programs for improved mine safety / E. De Souza // International journal of mining science and technology. – 2017. – Vol. 27. – № 4. – P. 647–650. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.018

11. The application of genetic algorithms to multiple period ventilation systems for multilevel mine operations / E. Acuña, S. Hardcastle, R. Maynard, L. Fava, S. Hall, P. Dunn // *Proceedings Orebody Modelling and Strategic Mine Planning (March 2009)*. – Melbourne, Australia, 2009. – P. 265–270.

12. Lowndes, I.S. The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: The influence of coding method and population size / I.S. Lowndes, T. Fogarty, Z.Y. Yang // *Soft Computing*. – 2005. – Vol. 9. – P. 493–506.

13. Lowndes I.S. The application of GA optimization method to the design of practical ventilation systems for multi-level metal mine operation / I.S. Lowndes, Z.Y. Yang // *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Mining Technology*. – 2004. – № 113 (1). – P. 43–58. DOI: 10.1179/037178404225004283

14. Li, J. Genetic algorithm for optimization of mine ventilation network / J. Li, K.Y. Chen, B.Q. Lin // *Journal of China University of Mining and Technology*. – 2007. – № 36 (6). – P. 789–793.

15. Аристова, П.С. Трехмерное геометрическое моделирование и визуализация в задачах проектирования систем шахтной вентиляции / П.С. Аристова // *Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал)*. – 2014. – № 12. – С. 233–239.

16. Feng, W. The use of 3D simulation system in mine ventilation management / W. Feng, F. Zhu, H. Lv // *Procedia Engineering*. – 2011. – № 26. – P. 1370–1379. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2313

17. Dziurzynski W. Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling / W. Dziurzynski, A. Krach, T. Pałka // *Energies*. – 2017. – № 10. – P. 1451. DOI: 10.20944/preprints201707.0050.v1

18. Calibration of mine ventilation network models using the non-linear optimization algorithm / G. Xu, J. Huang, B. Nie, D. Chalmers, Z. Yang // *Energies*. – 2018. – №. 11. – P. 31. DOI: 10.3390/en11010031

19. An efficient mine ventilation solution method based on minimum independent closed loops / D. Zhong, L.Wang, J. Wang, M. Jia // *Energies*. – 2020. – № 13. – P. 5862. DOI: 10.3390/en13225862

20. Kurnia J.C. CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces / J.C. Kurnia,

A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar // *Applied Mathematical Modelling*. – 2014. – Vol. 38 (14). – P. 3467–3484. DOI: 10.1016/j.apm.2013.11.067

21. Mine face ventilation: A comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation / A.M. Wala, S. Vytla, C.D. Taylor, G. Huang // *Mining Engineering*. – 2007. – № 59 (10). – P. 49–55.

22. Gao, W. Optimization of mine ventilation system based on bionics algorithm / W. Gao // *Procedia Engineering*. – 2011. – № 26. – P. 1614–1619.

23. Поляков, В.Н. Экстремальное управление электрическими двигателями / В.Н. Поляков, Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. – 420 с.

24. Петров, Н.Н. Управление воздухоподачей для технологических нужд как источник энергосбережения / Н.Н. Петров, Д.В. Зедгенизов // *Промышленная энергетика*. – 2000. – № 11. – С. 42–49.

25. Зедгенизов Д.В. Анализ способов регулирования режима работы тоннельных осевых вентиляторов / Д.В. Зедгенизов, А.М. Красюк, Н.А. Попов // *Метро*. – 2000. – № 5-6. – С. 23–27.

## References

1. Ventilyator.PRO, available at: <https://ventilyator.pro/ventilyatory/Classification/shahtnye/> (accessed 11 December 2023).

2. Shonin O.B., Pron'ko V.S. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti glavnykh ventilyatornykh ustanovok shakht na osnove mnogotselevoi sistemy upravleniia chastotnoreguliruемым приводом [Increasing the energy efficiency of main mine fan installations based on a multi-purpose variable frequency drive control system]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 2 (195), pp. 49-57.

3. Pron'ko V.S., Shonin O.B. Energoberezhenie v statsionarnykh ustanovkakh gornykh predpriatii na osnove ekstremal'nogo upravleniia chastotno-reguliruемым приводом [Energy saving in stationary installations of mining enterprises based on extreme control of variable frequency drive]. *Tekhnicheskie nauki: sovremennye problemy i perspektivy razvitiia. Trudy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ioshkar-Ola, Rossiia, 2013, pp. 87-89.

4. Shonin O.B., Pronko V.S. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive. ANNUAL of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 2013, vol. 56, part III, pp. 163-169.

5. Plessis G.E.D., Liebenberg L., Mathews E.H. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems. *Applied Energy*, 2013, vol. 111, pp. 16-27. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.061

6. Braslavskii I.Ia., Ishmatov Z.Sh., Poliakov V.N. Energoberegaiushchii asinkhronnyi privod [Energy-saving asynchronous drive]. Moscow: Akademiia, 2004, 256 p.

7. Nel A.J.H., Arndt D.C., Vosloo J.C., Mathews M.J. Achieving energy efficiency with medium voltage variable speed drives for ventilation-on-demand in South African mines. *Journal of cleaner production*, 2019, no. 232, pp. 379-390. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.376

8. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblies. *Applied Thermal Engineering*, 2015, no. 90, pp. 1092-1097. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.048

9. Sjöström S., Klintenäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, vol. 30, iss. 4, pp. 533-539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016

10. De Souza E. Application of ventilation management programs for improved mine safety. *International journal of mining science and technology*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 647-650. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.018

11. Acuña E., Hardcastle S., Maynard R., Fava L., Hall S., Dunn P. The application of genetic algorithms to multiple period ventilation systems for multilevel mine operations. *Proceedings Orebody Modelling and Strategic Mine Planning (March 2009)*. Melbourne, Australia, 2009, pp. 265-270.

12. Lowndes I.S., Fogarty T., Yang Z.Y. The application of genetic algorithms to optimize the performance of a mine ventilation network: The influence of coding method and population size. *Soft Computing*, 2005, vol. 9, pp. 493-506.

13. Lowndes I.S., Yang Z.Y. The application of GA optimization method to the design of practical ventilation systems for multi-level metal mine operation. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Mining Technology*, 2004, no. 113 (1), pp. 43-58. DOI: 10.1179/037178404225004283

14. Li J., Chen K.Y., Lin B.Q. Genetic algorithm for optimization of mine ventilation network. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, no. 36 (6), pp. 789-793.



15. Aristova, P.S. Trekhmernoe geometricheskoe modelirovanie i vizualizatsiia v zadachakh proektirovaniia sistem shakhtnoi ventilatsii [Three-dimensional geometric modeling and visualization of mine ventilation systems]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2014, no. 12, pp. 233-239.

16. Feng W., Zhu F., Lv H. The use of 3D simulation system in mine ventilation management. *Procedia Engineering*, 2011, no. 26, pp. 1370-1379. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2313

17. Dziurzynski W., Krach A., Pałka T. Airflow sensitivity assessment based on underground mine ventilation systems modeling. *Energies*, 2017, no. 10, 1451 p. DOI: 10.20944/preprints201707.0050.v1

18. Xu G., Huang J., Nie B., Chalmers D., Yang Z. Calibration of mine ventilation network models using the non-linear optimization algorithm. *Energies*, 2018, no. 11, 31 p. DOI: 10.3390/en11010031

19. Zhong D., Wang L., Wang J., Jia M. An efficient mine ventilation solution method based on minimum independent closed loops. *Energies*, 2020, no. 13, 5862 p. DOI: 10.3390/en13225862

20. Kurnia J.C., Sasmito A.P., Mujumdar A.S. CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, vol. 38 (14), pp. 3467-3484. DOI: 10.1016/j.apm.2013.11.067

21. Wala A.M., Vytla S., Taylor C.D., Huang G. Mine face ventilation: A comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. *Mining Engineering*, 2007, no. 59 (10), pp. 49-55.

22. Gao W. Optimization of mine ventilation system based on bionics algorithm. *Procedia Engineering*, 2011, no. 26, pp. 1614-1619.

23. Poliakov V.N., Shreiner R.T. Ekstremal'noe upravlenie elektricheskimi dvigateliami [Extreme control of electric motors]. Ekaterinburg: UGTU-UI, 2006, 420 p.

24. Petrov N.N., Zedgenizov D.V. Upravlenie vozdukhopodachei dlia tekhnologicheskikh nuzhd kak istochnik energosberezheniia [Air supply control for technological needs as a source of energy saving]. *Promyshlennaiia energetika*, 2000, no. 11, pp. 42-49.

25. Zedgenizov D.V., Krasiuk A.M., Popov N.A. Analiz sposobov regulirovaniia rezhima raboty tonnel'nykh osevykh ventilatorov [Analysis of methods for regulating the operating mode of tunnel axial fans]. *Metro*, 2000, no. 5-6, pp. 23-27.

### Сведения об авторах

**Ижевский Роман Павлович** (Артёмовский, Российская Федерация) – начальник Управления систем автоматизации АО «АМЗ «Вентпром», Артёмовский.

**Метельков Владимир Павлович** (Екатеринбург, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрический привод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: v.p.metelkov@urfu.ru).

### About the authors

**Roman P. Izhevskiy** (Artyomovskiy, Russian Federation) – Head of Automation Systems Department of AMZ Ventprom JSC, Artyomovskiy.

**Vladimir P. Metelkov** (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of “Electric Drive and Automation of Industrial Installations” Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Yekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: v.p.metelkov@urfu.ru).

Поступила: 18.12.2023. Одобрена: 04.03.2024. Принята к публикации: 20.04.2024.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

**Вклад авторов.** Оба автора сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ижевский, Р.П. Оптимизация параметров аэродинамической характеристики шахтной вентиляторной установки / Р.П. Ижевский, В.П. Метельков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 49. – С. 137–154. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.07

Please cite this article in English as:

Izhevskiy R.P., Metelkov V.P. Optimization of the mine fan installation aerodynamic characteristics parameters. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 49, pp. 137-154. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.1.07