

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА / THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43>

РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДАЧУ ВОЗДУХА В ГОРЕЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА

Научная статья

Горожанцев И.А.¹, Маликов Ю.К.^{2,*}, Мунц В.А.³¹ ORCID : 0009-0000-2264-3507;² ORCID : 0009-0009-4334-7526;^{1,2,3} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (uma66p[at]mail.ru)

Аннотация

Представлена методика стендовых испытаний по определению индивидуальных энергетических характеристик дутьевого комплекса РГ 2000, который состоит из вентилятора, двигателя и преобразователя частоты и является частью шахтного воздухонагревателя РГ 2000. Методика опробована при заводских испытаниях воздухонагревателя. Приводятся опытные данные по изменению удельного расхода электроэнергии и общего КПД комплекса при регулировании скорости вращения вентилятора и подачи первичного воздуха в диапазоне 1:10.

Установлено, что уменьшение подачи ведёт к снижению как удельного расхода электроэнергии, так и общего КПД комплекса. Удельный расход достигает минимума, когда подача и КПД комплекса снижаются соответственно до 16% и 30% от своих номинальных значений. Таким образом, управление с помощью частотно-регулируемого привода (ЧРП) обеспечивает экономию электроэнергии, но не обеспечивает эффективность преобразования энергии.

Ключевые слова: шахтный воздухонагреватель, удельный расход электроэнергии, дутьевой вентилятор, частотно-регулируемый привод.

ELECTRIC ENERGY INPUT FOR AIR SUPPLY TO BURNERS USING A VARIABLE FREQUENCY DRIVE

Research article

Gorozhantsev I.A.¹, Malikov Y.K.^{2,*}, Munts V.A.³¹ ORCID : 0009-0000-2264-3507;² ORCID : 0009-0009-4334-7526;^{1,2,3} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (uma66p[at]mail.ru)

Abstract

The procedure of bench tests for determining the individual energy characteristics of the blowing complex RG 2000, which consists of a fan, motor and frequency converter and is part of the RG 2000 mine air heater, is presented. The technique was tested during factory tests of the air heater. Experimental data are presented on changes in the specific electricity consumption and the overall efficiency of the complex when adjusting the fan speed and primary air supply in the range of 1:10.

It has been established that the reduction of feed leads to a decrease in both specific power consumption and overall efficiency of the complex. The specific consumption reaches a minimum when the supply and efficiency of the complex are reduced to 16% and 30% of their nominal values, respectively. Thus, control by means of a frequency-controlled drive (VFD) provides energy savings, but does not ensure energy conversion efficiency.

Keywords: mine air-heater, specific electricity consumption, forced draft fan, variable frequency drive.

Введение

Среди разнообразных тепловых энергоустановок, использующих природный газ в качестве топлива, существуют установки с расширенным до 1:10 диапазоном плавного регулирования мощности. Примером могут служить шахтные воздухонагреватели РГ 2000 [1]. Важной частью этих устройств являются дутьевые комплексы, состоящие из вентилятора высокого давления, асинхронного двигателя и преобразователя частоты (ПЧ). Дутьевой комплекс включает в себя средства автоматизации и может включать передачу мощности (трансмиссию), однако все большее распространение получают вентиляторы с прямым приводом [2].

Преимущества регулирования скорости вращения вентилятора с помощью ЧРП рассмотрены в [3]. О высокой эффективности ЧРП свидетельствуют многочисленные исследования, выполненные на дутьевых вентиляторах котельных установок.

В работе [4] приведены данные по годовому потреблению электроэнергии вентиляторами наддува и вентиляторами первичного воздуха на электростанции в Индонезии. Потребление без ЧРП составило 25 645 627 кВтч, а после использования ЧРП потребление снизилось до 17 412 053 кВтч, что соответствует экономии 32,1%. Аналогично, на электростанции в Турции использование ЧРП вместо дросселирования вентиляторов снизило потребление энергии на воздушное дутье на 17% [5]. На широко применяемых многорелочных водогрейных котлах ПТВМ использование группового регулируемого электропривода дутьевых вентиляторов обеспечило экономию газа

2% (в летний период до 4,8%) и электроэнергии до 30% [6]. Таким образом, накопленный за последние 25 лет фактический материал подтверждает теоретические представления о пользе регулируемого электропривода для решения множества разноплановых задач, объединенных общей целью ресурсо- и энергосбережения [7].

Успешное решение этих задач основывается на работе двигателя с неполной нагрузкой и на пониженной скорости, что влечет за собой дополнительные потери мощности как в двигателе, так и в ПЧ. Значительное падение КПД электропривода при снижении скорости вращения турбомеханизмов отмечено во многих работах [8], [9], [10].

Важным шагом к точному расчету потерь энергии и входной мощности дутьевых комплексов стал недавно опубликованный стандарт ГОСТ ИЕС 61800-9-1-2023 (Системы силовых приводов с регулируемой скоростью). В этом стандарте энергоэффективность электромашинного комплекса определяется по его математической модели, которая позволяет рассчитать потери энергии в рабочих точках частичной нагрузки.

Модель состоит из формул, переменных и параметров. Для расчета потерь в конкретном комплексе необходимо использовать реальные значения его параметров, которые должны быть установлены производителями оборудования в соответствии с ГОСТ ИЕС 61800-9-2-2021.

Потребуется значительное время, чтобы заместить существующий парк электродвигателей на новые, отвечающие требованиям ГОСТ ИЕС 61800-9-2021. Пока что, без дополнительных измерений, нельзя определить расчетным путем входную мощность дутьевого комплекса. Отсутствие опытных данных вынуждает использовать предположение о постоянстве КПД как при предварительных оценках эффективности ЧРП на этапе внедрения, так и при последующих энергоаудитах действующих дутьевых комплексов [5], [11], [12], [13].

Точное значение входной мощности необходимо знать для прогнозирования расхода электроэнергии на дутье в зависимости от погодных условий. Кроме этого, потери мощности в дутьевом комплексе определяют потенциал энергосбережения, который может быть реализован как за счет модернизации устаревшего оборудования, так и за счет корректировки рабочего цикла существующего оборудования. Наконец, индивидуальные энергетические характеристики дутьевого комплекса могут использоваться при диагностике оборудования после монтажа и в процессе эксплуатации.

Целью работы является экспериментальное определение энергетических характеристик серийного образца дутьевого комплекса РГ 2000 при изменении подачи от 10% до 100%. Предложена и реализована в ходе заводских приемо-сдаточных испытаний методика измерения удельного расхода электроэнергии и КПД комплекса.

Объект исследования

В зимнее время свежий воздух для проветривания подземных выработок должен подогреваться, чтобы исключить обмерзание воздухоподающего ствола. Для этой цели на рудниках Урала широко применяют шахтные воздухонагреватели РГ 2000 [9]. В холодную пятидневку воздухонагреватель обеспечивает подогрев воздуха приблизительно на 40 °С (от минус 36 до +4 °С). Этим определяется его номинальная тепловая мощность. И только 5% номинальной мощности используется в межсезонье для подогрева наружного воздуха на 1 ... 3 °С (от ±1 до +2 °С).

Объектом настоящего исследования является серийный образец дутьевого комплекса, предназначенного для подачи первичного воздуха в горелочный блок воздухонагревателя РГ 2000. В зависимости от погодных условий подача первичного воздуха плавно изменяется в диапазоне 1:10 за счет изменения частоты электропитания двигателя дутьевого вентилятора в диапазоне 5:50 Гц. При необходимости, подачу при максимальной скорости вращения вентилятора ограничивают с помощью дроссельных шайб.

Для достижения стабильности регулирования соотношения газ/воздух на минимальных нагрузках, давление первичного воздуха перед горелочным блоком не может быть меньше 50 Па. Тогда номинальное давление воздуха перед горелкой (с учетом диапазона регулирования подачи 1:10 и квадратичной зависимости давления от расхода) должно быть не ниже 5000 Па.

В состав дутьевого комплекса РГ 2000 входит:

- Вентилятор ВР 120-28-6,3 (прямой привод) с номинальными параметрами: скорость вращения 2920 об/мин; подача 1,7 м³/с; полное давление 7200 Па; КПД = 75%.
- Электродвигатель А180М2 – 380В, 30 кВт, 2940 об/мин, КПД = 91,4%, класс энергоэффективности IE1.
- Преобразователь частоты VFD300CP43B-21 – 380В, 60А (47,8 кВА). Сертифицирован согласно стандарту ГОСТ ИЕС 61800-9-1-2023 с указанием потерь мощности в 8 опорных точках.
- Вспомогательное оборудование ПЧ: входной реактор YBACL-60A-EISA-0.234mH; высокочастотный ЭМС фильтр RFI4C65N16.

Энергетические характеристики дутьевого комплекса

Программа заводских испытаний воздухонагревателя РГ 2000 предусматривает снятие индивидуальных расходных характеристик горелочного блока. Существующий испытательный стенд был адаптирован для определения удельного расхода электроэнергии на подачу первичного воздуха:

$$e_K = E_K / G_K \quad (1)$$

и определения КПД дутьевого комплекса:

$$\eta_K = H_V / E_K = h_V / e_K, \quad (2)$$

$$H_V = Q_a \cdot p_V \cdot \beta_V \quad (3)$$

$$Q_a = G_V / \rho_a, \quad (4)$$

$$h_V = H_V / G_V = p_V \cdot \beta_V / \rho_a; \quad (5)$$

$$\beta_V = 1 - (0,5 - 0,143/\eta_V) \cdot p_V/\mathfrak{P}_a \quad (6)$$

$$\rho_a = \mathfrak{P}_a/(287 \cdot T_a) \quad (7)$$

Была предусмотрена возможность прямого подключения двигателя к сети 400В/50Гц для определения номинальных характеристик вентарегата ($V+M$). Полученные значения e_A^S, η_A^S использовались для сопоставления с энергетическими характеристиками дутьевого комплекса:

$$\lambda_K = (W_A^S/W_K^n)^2 \cdot e_K/e_A^S, \quad (8.1)$$

$$\alpha_K = \eta_K/\eta_A^S, \quad (8.2)$$

а также для определения КПД вентилятора при максимальной скорости вращения:

$$\eta_V^S = \frac{\eta_A^S}{\eta_M^S}. \quad (9)$$

Здесь: E – входная (потребляемая) мощность, Вт; W – скорость вращения; e и λ – удельный расход электроэнергии, Дж/г и его относительное значение; H – выходная (полезная) мощность, Вт; h – напор (удельная работа вентилятора), Дж/г; η и α – КПД и его относительное значение.

Верхние индексы: S – режим питания от сети 400В/50Гц; n – режим при частоте напряжения $F_M=50$ Гц на выходе ПЧ.

Нижние индексы: a – атмосферный воздух; A – вентарегат ($V+M$); D – преобразователь частоты; K – дутьевой комплекс ($V+M+D$); M – двигатель; V – вентилятор.

Параметры воздуха: G_V – массовый расход, г/с; P_a – абсолютное давление перед вентилятором, Па; β_V – полное (избыточное) давление после вентилятора, Па; T_a – температура перед вентилятором, К; Q_a – подача, м³/с; ρ_a – плотность перед вентилятором, г/м³; β_V – коэффициент учета сжимаемости в политропическом процессе (заранее неизвестный КПД вентилятора в формуле (6) уточняется простыми итерациями).

Методика стендовых испытаний

Испытания вентиляторов по ГОСТ 10921-2017 (Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний) предусматривают определение аэродинамической характеристики $h_V(Q_a)$ при условно постоянной скорости вращения рабочего колеса. Регулирование подачи Q_a в серии стандартных испытаний производится с помощью сменных дросселей, которые изменяют характеристику присоединенной к вентилятору сети.

Обработка результатов испытаний в числах подобия позволяет обобщить их в виде графиков безразмерных характеристик вентилятора. Последующая аппроксимация опытных данных приводит к уравнению подобия:

$$\psi = F(\varphi) \quad (10)$$

где критерии подобия процессов сжатия и перемещения (далее – процесс дутья) воздуха определяется как:

$$\varphi = 4Q_a/\pi D^2 u, \quad (11)$$

$$\psi = (2h_V)/u^2, \quad (12)$$

$$u = \pi D W_V. \quad (13)$$

Здесь: φ – коэффициент подачи; ψ – коэффициент давления; W_V – скорость вращения вентилятора, об/с; $D = 0,63$ м – диаметр колеса вентилятора, м; u – окружная скорость, м/с.

Полученное для определенной скорости вращения вентилятора уравнение подобия (10) можно применять при небольших отклонениях этого параметра от наблюдаемых в опыте значений. Для распространения (10) на расширенный до 1:10 диапазон изменения W_V требуются дополнительные испытания и соответствующий метод обработки опытных данных.

Рассмотрим теперь частичные испытания по определению энергетических характеристик дутьевого комплекса. Они проводятся при условно постоянной характеристике присоединенной к вентилятору сети. Подача регулируется изменением частоты напряжения на выходе ПЧ. Такой порядок испытаний будем называть сопряженными, чтобы подчеркнуть его отличие от стандартного по ГОСТ 10921—2017.

Серия сопряженных испытаний состоит из сходных режимов с условно одинаковыми значениями коэффициентов (11), (12). Этим режимам должна соответствовать одна точка на графике безразмерной характеристики вентилятора (10). Разброс опытных точек может быть вызван как ошибками измерений, так и отклонениями параметров реального процесса от законов подобия вентиляторов.

Метод первичной обработки опытных данных

Описанный ниже метод минимальных невязок (ММН) предназначен для предварительной обработки наблюдаемых параметров дутья:

$$\{W_{V,j}, h_{V,j}, Q_{a,j}\}, j = 1, 2 \dots J, \quad (14)$$

здесь: нижним индексом j отмечены параметры, которые относятся к j -му сопряженному испытанию; J – число испытаний в серии.

Целью обработки является оценка степени соответствия массива опытных данных (14) законам подобия вентиляторов. Оценка основывается на аппроксимации табличных данных (14) формулами, конструкция которых отвечает законам подобия. Погрешность аппроксимации рассматривается как показатель «степени соответствия».

В качестве аппроксимирующих формул в методе ММН используется формулы пересчёта размерных аэродинамических характеристик геометрических подобных вентиляторов на другие скорости вращения. В качестве независимой безразмерной переменной принимается относительная подача:

$$q = Q_a / Q_a^* \quad (15)$$

Тогда:

$$\tilde{W}_{V,j} = q_j \cdot W_V^* \quad (16)$$

$$\tilde{h}_{V,j} = q_j^2 \cdot h_V^* \quad (17)$$

где значком «тильда» отмечены значения аппроксимирующих функций.

Уравнения (15), (16), (17) определяют характеристический луч в пространстве состояний вентилятора. Этот луч лежит на характеристической поверхности, которая образована однопараметрическим семейством напорных характеристик вентилятора $h_V = h_V(Q_a)$ при $W_V = idem$. Точка (h_V^*, Q_a^*, W_V^*) расположена на некоторой, заранее неизвестной, напорной характеристике $h_V(Q_a^*)$, которая соответствует скорости вращения $W_V = W_V^*$. Эту точку и эту характеристику будем называть опорными.

Координаты опорной точки (h_V^*, Q_a^*) в формулах (15), (17) подбираются по критерию наилучшего совпадения опытных и расчётных данных.

Определим относительные невязки аппроксимации (16), (17):

$$\delta\omega_j = (W_{V,j} - \tilde{W}_{V,j}) / W_V^* \quad (18)$$

$$\delta h_j = (h_{V,j} - \tilde{h}_{V,j}) / h_V^* \quad (19)$$

Для любого значения опорной скорости W_V^* квадратичная норма невязок (18) и (19) достигает минимума при следующих значениях варьируемых параметров:

$$Q_a^* = \left(\sum_j Q_{a,j}^2 \right) / \left(\sum_j \omega_j \cdot Q_{a,j} \right); \quad (20)$$

$$h_V^* = \left(\sum_j h_{V,j}^2 \right) / \left(\sum_j q_j^2 \cdot h_{V,j} \right), \quad (21)$$

где:

$$\omega_j = W_{V,j} / W_V^* \quad (22)$$

Показатели подобия сопряжённых режимов работы вентилятора можно определить следующим образом. Подобие скоростей (ω – подобие):

$$S\omega = 1 - \left[\left(\sum_j \delta\omega_j^2 \right) / J \right]^{0,5} \quad (23)$$

подобие напоров (h-подобие):

$$Sh = 1 - \left[\left(\sum_j \delta h_j^2 \right) / J \right]^{0,5} \quad (24)$$

В дальнейшем будем считать, что опорная скорость вращения вентилятора равна

$$W_V^* = 50 \text{ об/сек} \quad (25)$$

Тогда, без учёта небольшого скольжения двигателя, частота напряжения на выходе ПЧ будет равна

$$F_M = q \cdot F_M^S, \quad (26)$$

где $F_M^S = 50$ Гц – частота напряжения сети.

Описание экспериментальной установки

При заводских испытаниях воздухонагревателя РГ 2000, дутьевой комплекс соединяется с горелочным блоком с помощью сварного нагнетательного воздуховода, который оснащен датчиком ДРГ.М-10000 для измерения расхода воздуха. При определении энергетических характеристик дутьевого комплекса использовался этот же воздуховод, но горелочный блок заменялся сменными дросселями для регулирования коэффициента подачи (12).

Для целей настоящего исследования существующий испытательный стенд был дополнительно оснащен автоматизированной системой измерения и регистрации параметров воздушного дутья. Схема расположения точек измерения показана на рис.1. Состав средств измерения приведен в табл. 1. Все датчики опрашиваются с одинаковым интервалом 2 с. При дальнейшей математической обработке сигналов используется скользящее среднее по 30-ти точкам. Время выхода на стационарный режим принято равным 15 мин.

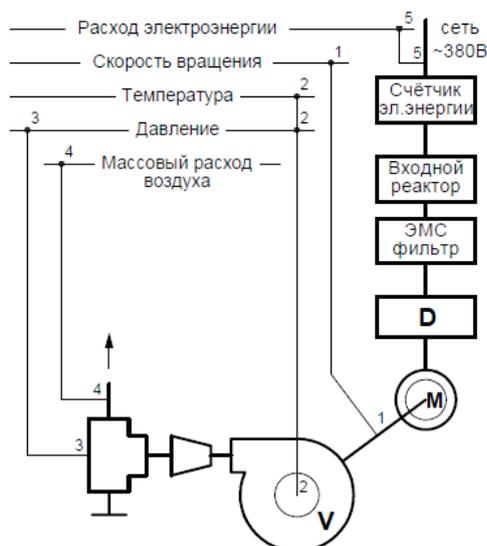


Рисунок 1 - Схема расположения точек измерения параметров дутьевого комплекса:
D – преобразователь частоты; *M* – двигатель; *V* – вентилятор
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.1>

Таблица 1 - Состав и характеристика средств измерений

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.2>

Наименование параметра	Обозначение	Точка по рис. 1	Средство измерения
1. Температура окружающего воздуха	t_a	2	Термометр сопротивления Pt100 (-50...+150 °С)
2. Давление окружающего воздуха	P_a	2	Зонд-20-АД (80...106 кПа)
3. Давление в контрольной точке	P_k	3	Зонд-20-ДД (0...10 кПа)
4. Давление в контрольной точке	P_k	3	Зонд-20-ДД (0...4 кПа)
5. Давление в контрольной точке	P_k	3	Зонд-20-ДД (0...250 Па)
6. Массовый расход воздуха	G_v	4	Расходомерный узел на базе ДРГ.М-10000
7. Расход электроэнергии на дутьевой комплекс (V+M+D)	E_k	5	Меркурий 236 ART-02 PQRS трёхфазный
8. Скорость вращения вентилятора	W_v	1	Тахометр RM-1500 (0,2...2000 об/с)

Полезная мощность вентилятора (3) определяется по полному давлению. Этот параметр не поддается прямому измерению из-за закрутки и неоднородности потока после вентилятора, а также из-за неизбежных аэродинамических потерь в элементах стенда. Принятая в данной работе компоновка узла измерения давления вентилятора показана на рис. 2. После короткого диффузора создаваемая вентилятором струя ударяется в стенку тройника под углом 90 град. Точка отбора давления располагается по оси струи.

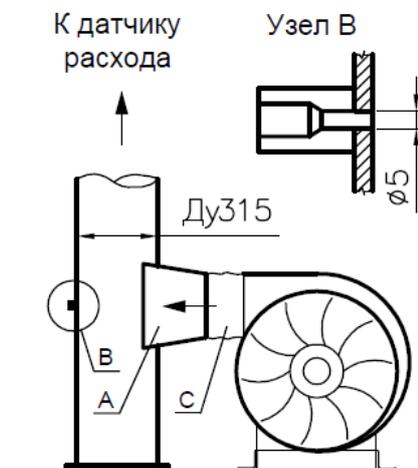


Рисунок 2 - Схема соединения вентилятора с воздухопроводом испытательного стенда:
 А - пирамидальный диффузор 1:1,8, угол 16°; В - отбор полного давления; С - гибкая вставка
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.3>

В этом случае измеряется избыточное давление торможения, которое отличается от создаваемого вентилятором полного давления на величину потерь в диффузоре:

$$p_V = p_K + l_V \cdot \varepsilon_V \cdot p_V^D \quad (27)$$

где динамическое давление p_V^D определяется без учёта сжимаемости по среднерасходной скорости:

$$p_V^D = 0,5 \cdot \rho_a \cdot (Q_a / f_2)^2 \quad (28)$$

Здесь: $f_2 = 0,0476 \text{ м}^2$ – площадь выхода из вентилятора; ε_V – коэффициент учёта сжимаемости, который вычисляется по формулам (16), (37) ГОСТ 10921-2017 (Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний); $l_V = 0,32$ – коэффициент сопротивления для пирамидального диффузора (рис. 2, узел А) с углом 16° и степенью диффузности 1:1,8 (см. п. 6.3.2.1, [16]).

Создаваемое вентилятором давление определяли по показаниям одного из трех датчиков (см. табл. 1) с подходящими пределами измерения. Относительная погрешность измерения этого параметра, изменяющегося в диапазоне 1:100, не превышает 2%.

Учитывая отсутствие противодействия, для управления вентилятором использовали экономичный закон частотного регулирования:

$$U_M = 10 + 0,151 \cdot F_M \cdot (F_M - 1) \quad (29)$$

Таким образом, подаваемое на двигатель линейное напряжение изменялось от 13 до 380 В при изменении частоты от 5 до 50 Гц. Частота коммутации, которая также влияет на потери мощности в ЧРП, задавалась равной 6 кГц.

Результаты испытаний

Представленные на рис. 3 энергетические характеристики дутьевого комплекса получены в серии из 12 испытаний при различной частоте напряжения на выходе ПЧ ($F_M = 5; 8,35; 10; 15; 20; 25; 30; 33,35; 35; 40; 45; 50$ Гц) и условно постоянном коэффициенте расхода, близком к номинальному значению $\varphi = 0,055$. В процессе испытаний плотность воздуха перед вентилятором сохраняла почти постоянное значение $\rho_a = 1,18 \pm 0,01 \text{ кг/м}^3$. Требуемый коэффициент расхода поддерживался с помощью специально подобранной дроссельной шайбы, установленной на выходе из нагнетательного воздуховода. В табл.2 сопоставлены номинальные режимы дутьевого комплекса (V+M+D), когда $F_M = 50$ Гц, и вентагрегата (V+M), когда двигатель подключен к сети 400В/50Гц. Видно, что при номинальном режиме вентилятора, управление с помощью ЧРП приводит к росту удельного расхода электроэнергии на 3%.

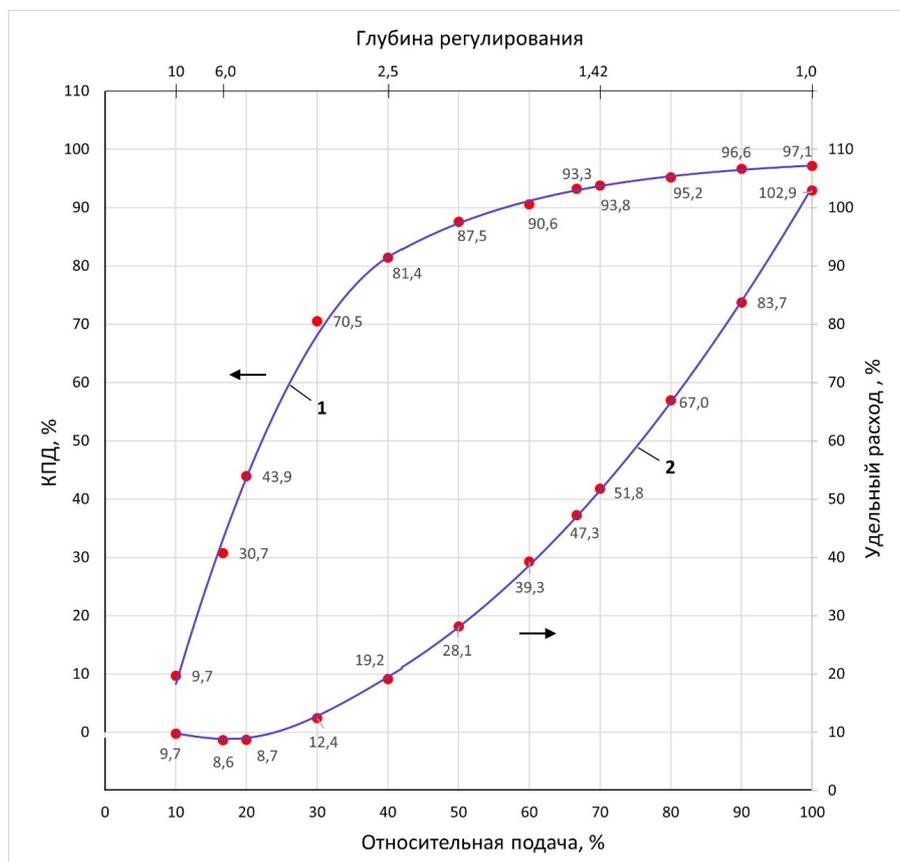


Рисунок 3 - Энергетические характеристики дутьевого комплекса РГ 2000 при номинальном коэффициенте подачи = 0,055:

1 – относительный КПД комплекса, формула (8.1); 2 – относительный удельный расход электроэнергии на подачу первичного воздуха, формула (8.2)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.4>

Таблица 2 - Показатели дутьевого комплекса и вентагрегата при максимальной подаче

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.5>

Наименование параметра	Размерность	Дутьевой комплекс (V+M+D)	Вентагрегат (V+M)
Скорость вращения вентилятора	об/с	49,66	49,72
Полезная мощность вентилятора	кВт	12,80	12,74
Мощность, потребляемая от сети	кВт	20,33	19,63
Полный КПД установки	%	63,0	64,9
Удельный расход электроэнергии	Дж/г	10,3	10,0

После обработки опытных данных получены следующие координаты опорной точки модели ММН (15), (16), (17): $h_v^* = 6,57$ Дж/г; $Q_a^* = 1,69$ м³/с; $W_v^* = 50$ об/с.

Показатели подобия (23), (24) исследованных режимов работы вентилятора близки единице. Подобие скоростей: $S_\omega = 0,996$, максимальная относительная невязка между моделью ММН и опытными данными не превышает 0,6% (см. рис. 4, а). Подобие напоров: $Sh = 0,997$, максимальная невязка не превышает 0,6% (см. рис. 4, б). Поэтому можно считать, что для всех исследованных режимов КПД вентилятора имеет одно и то же значение.

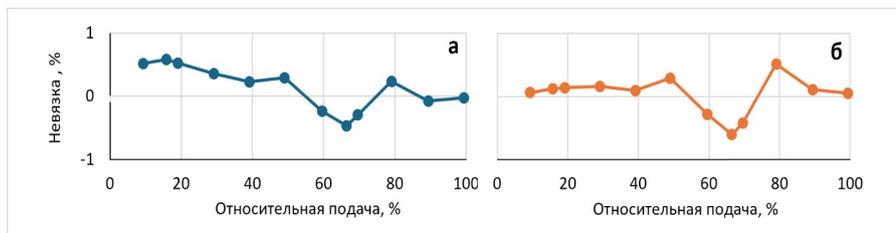


Рисунок 4 - Оценка степени соответствия опытных данных законам подобия вентиляторов:
 а – относительная невязка аппроксимации скорости (18); б – относительная невязка аппроксимации напора (19)
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.6>

Обсуждение полученных результатов

Исследуемый вентилятор имеет рабочее колесо с диаметром $D = 0,63 > 0,5$ м. При номинальной скорости вращения $W_x = 2920$ об/мин, число Рейнольдса вентилятора равно $4,07 \cdot 10^6$. На нижней границе рассматриваемого диапазона регулирования этот параметр равен $Re = 4 \cdot 10^5$, что больше, чем $2 \cdot 10^5$. Значит, при изменении скорости вращения рабочего колеса в диапазоне 1:10 будут выполняться указанные в ГОСТ 10921-2017 условия подобия аэродинамических характеристик вентилятора.

По этой причине очень хорошее соответствие между моделью ММН и опытными данными для сопряженной серии испытаний является ожидаемым. Однако развитый в данной работе метод ММН дает количественную оценку соответствия измеряемых параметров дутья законам подобия вентиляторов. Кроме этого, метод ММН вносит необходимую однозначность в выборе опорной точки, через которую проходит характеристический луч (15), (16), (17). В конечном счете это позволяет отобразить результаты нескольких серий частичных испытаний на единую опорную характеристику вентилятора.

Как видно из табл. 2, при питании от сети рабочая точка двигателя имеет параметры: линейное напряжение $U_M = 400$ В; синхронная частота $F_M = 50$ Гц; коэффициент загрузки $K_M = 19,63 \cdot 0,914 / 30 = 0,6$. В этой рабочей точке КПД двигателя приблизительно на 0,35% ниже номинального значения 0,914 [17].

Приняв $\eta_M^S = 0,91$, находим по формуле (9) КПД вентилятора при номинальной скорости вращения и номинальной подаче:

$$\eta_V^S = 64,9 / 0,91 = 71,3\% \quad (30)$$

Опытное значение КПД вентилятора на 3,7% меньше заявленного производителем номинального значения 75%, что укладывается в требования ГОСТ Р 58641—2019 (Вентиляторы радиальные общего назначения. Общие технические условия). В п. 6.1.6 этого стандарта указано, что отличие фактического КПД вентилятора от паспортного в меньшую сторону не должно превышать 4%.

Поскольку КПД вентилятора является условно постоянной величиной, то опытные значения относительного КПД дутьевого комплекса совпадают со значениями относительного КПД ЧРП. Проведённые стендовые испытания показали сильную зависимость этих КПД от глубины регулирования $z = 1 / q$ (верхняя шкала на рис. 3). Для количественной оценки изменчивости КПД рассмотрим три характерных значения параметра z .

Значение $z = 1$ соответствует максимальной подаче. Частотное регулирование в этой точке приводит к дополнительным потерям энергии, которые составляют 2,9% от мощности, потребляемой дутьевым комплексом (см. табл. 2).

Значение $z = 2,5$ характерно для котлов, работающих на жидком и газообразном топливе. При такой глубине регулирования котлы должны обеспечивать заявленные изготовителем показатели энергоэффективности. Это требование ГОСТ 10617-83 (Котлы отопительные теплопроизводительностью от 0.1 до 3,15 МВт, п.2.6) является обязательным. КПД ЧРП при $z = 2,5$ составит лишь 81% от КПД электродвигателя, подключенного к сети 400В/50Гц. Другими словами, потери на управление тягодутьевыми машинами котлов при использовании ЧРП достигают 20% от потребляемой мощности.

Значение $z = 6$ характерно для тепловых энергоустановок с широким диапазоном регулирования теплопроизводительности. При такой глубине регулирования относительный КПД ЧРП падает до 30%, то есть на управление затрачивается 70% от потребляемой мощности.

При оценке энергетических характеристик электромеханических комплексов необходимо учитывать две составляющие энергоэффективности – технологическую эффективность (удельный расход электроэнергии) и эффективность преобразования энергии (КПД).

При снижении расхода первичного воздуха происходит быстрое ($\sim q^2$) снижение аэродинамического сопротивления присоединенной к вентилятору сети. Технологические затраты мощности на перемещение воздуха падают $\sim q^3$, что влечет за собой снижение удельного расхода электроэнергии на дутье, как показано на рис. 3. Одновременно снижается эффективность преобразования энергии и падает КПД дутьевого комплекса. Эти два разнонаправленных процесса формируют общую энергоэффективность воздушного дутья при управлении с помощью ЧРП. Минимальный удельный расход электроэнергии 0,863 Дж/г достигается, когда подача $q = 16\%$ от номинального значения. В этой точке КПД ЧРП составляет лишь 30% от номинального значения. Таким образом, управление с помощью ЧРП обеспечивает экономию электроэнергии, но не обеспечивает эффективность преобразования энергии [18], [19].

Заключение

Представлены методика, схема автоматизации и аппаратное обеспечение стендовых испытаний по определению индивидуальных энергетических характеристик дутьевого комплекса РГ 2000, состоящего из вентилятора, двигателя и преобразователя частоты.

Методика опробована в ходе заводских приемо-сдаточных испытаний. Установлена возможность достаточно точного измерения потребляемой ПЧ мощности с помощью традиционного счетчика электроэнергии.

Предложен расчетно-экспериментальный метод минимальных невязок (ММН) для количественной оценки соответствия измеряемых параметров дутья законам подобия вентиляторов. Метод позволяет отобразить опытные данные, полученные в серии частичных испытаний, в точку на общей опорной характеристике вентилятора.

В результате испытаний серийного образца получены значения КПД дутьевого комплекса и удельного расхода электроэнергии при изменении подачи и скорости вращения вентилятора диапазоне 1:10.

Показано, что при частотном регулировании потребление энергии при максимальной подаче становится больше, чем при прочих способах регулирования. Дополнительные потери составляют 2,9% от потребляемой мощности.

Установлено существенное влияние глубины регулирования на энергетические характеристики комплекса. При уменьшении подачи первичного воздуха происходит одновременное снижение общего КПД комплекса и удельного расхода электроэнергии на воздушное дутье. Удельный расход достигает минимума, когда подача и КПД комплекса снижаются соответственно до 16% и 30% от своих номинальных значений. Таким образом, управление дутьевым вентилятором с помощью ЧПП обеспечивает экономию электроэнергии, но не обеспечивает эффективность преобразования энергии [18], [19].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Борисов А.Н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.7>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Borisov A.N., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.43.7>

Список литературы / References

1. Саплин А.В. Надежность и безопасность газифицированных пунктов нагрева шахтного воздуха / А.В. Саплин, А.А. Титаев, З.Р. Гибадуллин [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 7. — С. 54–59.
2. Meredith D. A Closer Look At Fan Efficiency Metrics / D. Meredith, J. Harshaw // Trane Engineers Newsletter. — 2014. — Vol. 43-3. — P. 1–7.
3. Медведев В.Н. Технологическая востребованность и оценка эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов на объектах тепловой электростанции / В.Н. Медведев // Вестник ИГЭУ. — 2012. — Вып. 6. — С. 1–6.
4. Wibowo P.M. Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive / P.M. Wibowo, M. Haddin, A. Marwanto // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. Yogyakarta. — 2021. — Vol. 12. — P. 2059–2069.
5. Cagman S. Energy Efficiency Research In Fans and Experimental Investigation of the Effect of Motor Frequency / S. Cagman, A. Yıldız, A. Güven [et al.] // Kocaeli Journal of Science and Engineering. — 2023. — Vol. 6. — № 1. — P. 26–34. — DOI 10.34088/kojose.1134625.
6. Панышин А.С. Система автоматического регулирования режима горения газа в котлах типа ПТВМ / А.С. Панышин, Ю.А. Крылов // Промышленная энергетика. — 2000. — № 6. — С. 37–39.
7. Онищенко Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. — М.: Энергия, 1972. — 240 с.
8. Казакбаев В.М. Экспериментальная оценка энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода насоса / В.М. Казакбаев, М.О. Боровских, А.В. Нечаев [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 16—19 декабря 2014 г.): в 2-х томах. — 2015. — Т. 1. — С. 129–132.
9. Шабанов В.А. Исследование зависимости КПД электродвигателя и преобразователя частоты от коэффициента загрузки и частоты вращения / В.А. Шабанов, Э.Ф. Хакимов, А.Р. Калимгулов [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2019. — Т. 15. — № 4. — С. 83–90. — DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-83-90.
10. Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency // US DOE, Washington DC 20585-0121. — 2012. — P. 1. — URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_tip_sheet11.pdf (accessed: 11.11.2024).
11. Радионов А.А. Оценка ресурса энергосбережения в электроприводе дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным электродвигателем / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин [и др.] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2014. — Т. 14. — № 3. — С. 61–70.
12. Усачев А.А. Методика оценки эффективности частотного регулирования производительности насосных агрегатов КНС / А.А. Усачев // Водоснабжение и санитарная техника. — 2020. — № 1. — С. 42–51.
13. Sadek M. Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: case study / M. Sadek, R. Maghraby, M. Fathy // Chem. Ind. Chem. Eng. — 2023. — Vol. 29. — № 2. — P. 111–118.

14. Лисиенко В.Г. Безопасные и энергоэффективные тепловые режимы шахтных систем нагрева воздуха / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев [и др.] // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 2. — С. 81–87.
15. Белова Е.М. Особенности работы вентилятора с переменным числом оборотов в вентиляционной сети / Е.М. Белова, В.Г. Караджи // Системные технологии. — 2022. — № 42. — С. 146–154.
16. Караджи В.Г. Вентиляционное оборудование. Технические рекомендации для проектировщиков и монтажников / В.Г. Караджи, Ю.Г. Московко. — М: АВОК-ПРЕСС, 2010. — 431 с.
17. Воробей В.В. Оценка целесообразности замены малонагруженных асинхронных нерегулируемых приводов / В.В. Воробей // Актуальные проблемы энергетики. Материалы СНТК-69. — Минск: БНТУ, 2014. — С. 127–130.
18. Фаттахов Р.Б. Сложные вопросы «простого» ЧРП / Р.Б. Фаттахов, М.А. Абрамов, В.М. Гилязов // Инженерная практика. — 2013. — № 06. — С. 149–152.
19. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный привод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. — М.: АСАДЕМА, 2004. — 202 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Saplin A.V. Nadezhnost' i bezopasnost' gazificirovannykh punktov nagreva shahtnogo vozduha [Reliability and safety of the gasified mine air heating points] / A.V. Saplin, A.A. Titaev, Z.R. Gibadullin [et al.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2021. — № 7. — P. 54–59. [in Russian]
2. Meredith D. A Closer Look At Fan Efficiency Metrics / D. Meredith, J. Harshaw // Trane Engineers Newsletter. — 2014. — Vol. 43-3. — P. 1–7.
3. Medvedev V.N. Tehnologicheskaja vostrebovannost' i ocenka jeffektivnosti vnedrenija chastotno-reguliruemyyh jelektroprivodov na ob'ektah teplovoj jelektrostantsii [Technological Demand and Efficiency Assessment of Implementation of Variable-Frequency Electric Drives on Thermal Power Plants] / V.N. Medvedev // Vestnik IGJeU [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University]. — 2012. — Iss 6. — P. 1–6. [in Russian]
4. Wibowo P.M. Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive / P.M. Wibowo, M. Haddin, A. Marwanto // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. Yogyakarta. — 2021. — Vol. 12. — P. 2059–2069.
5. Cagman S. Energy Efficiency Research In Fans and Experimental Investigation of the Effect of Motor Frequency / S. Cagman, A. Yıldız, A. Güven [et al.] // Kocaeli Journal of Science and Engineering. — 2023. — Vol. 6. — № 1. — P. 26–34. — DOI 10.34088/kojose.1134625.
6. Pan'shin A.S. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya rezhima gorenija gaza v kotlah tipa PTVM [System of automatic regulation of gas combustion mode in PTVM type boilers] / A.S. Pan'shin, Ju.A. Krylov // Promyshlennaja jenergetika [Industrial Energy]. — 2000. — № 6. — P. 37–39. [in Russian]
7. Onishhenko G.B. Jelektroprivod turbomehanizmov [Electric drive of turbo-mechanisms] / G.B. Onishhenko, M.G. Jun'kov. — М.: Jenergija, 1972. — 240 p. [in Russian]
8. Kazakbaev V.M. Jeksperimental'naja ocenka jenergojeffektivnosti chastotno-reguliruemogo jelektroprivoda nasosa [Experimental evaluation of energy efficiency of frequency-controlled electric pump drive] / V.M. Kazakbaev, M.O. Borovskih, A.V. Nechaev [et al.] // Jenergo- i resursoberezenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenerгии: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem (Ekaterinburg, 16–19 dekabrja 2014 g.) : v 2-h tomah [Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources: materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation (Yekaterinburg, December 16-19, 2014). – in 2 volumes]. — 2015. — Vol. 1. — P. 129–132. [in Russian]
9. Shabanov V.A. Issledovanie zavisimosti KPD jelektroprivoditelja i preobrazovatelja chastoty ot koefficienta zagruzki i chastoty vrashhenija [Research of dependence of electric motor efficiency and frequency converter on loading rate and rotation frequency] / V.A. Shabanov, Je.F. Hakimov, A.R. Kalimgulov [et al.] // Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy [Electrical Engineering and Information Complexes and Systems]. — 2019. — Vol. 15. — № 4. — P. 83–90. — DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-83-90. [in Russian]
10. Adjustable Speed Drive Part-Load Efficiency // US DOE, Washington DC 20585-0121. — 2012. — P. 1. — URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_tip_sheet11.pdf (accessed: 11.11.2024).
11. Radionov A.A. Ocenka resursa jenergosberezenija v jelektroprivode dut'evogo ventiljatora s dvuhkorostnym asinhronnym jelektroprivoditelem [Evaluation of energy saving resource in electric drive of blower fan with two-speed induction motor] / A.A. Radionov, A.S. Karandaev, R.R. Hramshin [et al.] // Vestnik JuUrGU. Serija «Jenergetika» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»]. — 2014. — Vol. 14. — № 3. — P. 61–70. [in Russian]
12. Usachev A.A. Metodika ocenki jeffektivnosti chastotnogo regulirovaniya proizvoditel'nosti nasosnyh agregatov KNS [Method of evaluating the effectiveness of frequency regulation of the performance of sewage pumping units] / A.A. Usachev // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika [Water Supply and Sanitary Engineering]. — 2020. — № 1. — P. 42–51. [in Russian]
13. Sadek M. Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: case study / M. Sadek, R. Maghraby, M. Fathy // Chem. Ind. Chem. Eng. — 2023. — Vol. 29. — № 2. — P. 111–118.
14. Lisenko V.G. Bezopasnye i jenergojeffektivnye teplovyje rezhimy shahtnyh sistem nagreva vozduha [Safe and energy-efficient thermal modes of mine air heating systems] / V.G. Lisenko, Ju.K. Malikov, A.A. Titaev [et al.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2022. — № 2. — P. 81–87. [in Russian]
15. Belova E.M. Osobennosti raboty ventiljatora s peremennym chislom oborotov v ventiljacionnoj seti [Features of work of the fan with variable speed in the ventilation network] / E.M. Belova, V.G. Karadzi // Sistemnye tehnologii [System Technologies]. — 2022. — № 42. — P. 146–154. [in Russian]

16. Karadzhi V.G. Ventiljacionnoe oborudovanie. Tehnicheskie rekomendacii dlja proektirovshhikov i montazhnikov [Ventilation equipment. Technical recommendations for designers and installers] / V.G. Karadzhi, Ju.G. Moskovko. — M: AVOK-PRESS, 2010. — 431 p. [in Russian]
17. Vorobej V.V. Ocenka celesoobraznosti zameny malonagruzhennyh asinhronnyh nereguliruemyh privodov [Assessment of the feasibility of replacing low-load asynchronous unregulated drives] / V.V. Vorobej // Aktual'nye problemy jenergetiki. Materialy SNTK-69 [Current Problems of Energy. Materials SNTK-69]. — Minsk: BNTU, 2014. — P. 127–130. [in Russian]
18. Fattahov R.B. Slozhnye voprosy «prostogo» ChRP [Complex issues of a "simple" VFD] / R.B. Fattahov, M.A. Abramov, V.M. Giljazov // Inzhenernaja praktika [Energy-saving asynchronous drive]. — 2013. — № 06. — P. 149–152. [in Russian]
19. Braslavskij I.Ja. Jenergosberegajushhij asinhronnyj privod [Energy-saving asynchronous drive] / I.Ja. Braslavskij, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Poljakov. — M.: ACADEMA, 2004. — 202 p. [in Russian]