

МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ С ОСЕВЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ АППАРАТОМ

Центробежные вентиляторы с высоковольтными асинхронными электроприводами потребляют значительную долю электроэнергии различных производственных объектов. При этом большинство вентиляторных установок работают с перерасходом электроэнергии. Снижение перерасхода электроэнергии возможно при регулировании производительности вентиляторов по потребностям производства. Выбор наиболее энергоэффективного способа требует исследования математической модели, учитывающей все значимые свойства объекта. В работе рассмотрена математическая модель центробежного вентилятора, построенная на основе его паспортных аэродинамических характеристик. Создание модели обусловлено необходимостью решения задачи оптимального управления мощными промышленными вентиляторами по критерию минимума потребления электроэнергии. Решение этой задачи требует теоретического исследования различных способов регулирования производительности вентиляторов и выбора наиболее энергоэффективного способа для данных условий эксплуатации. В работе обоснована необходимость модификации известных аппроксимирующих аэродинамические характеристики функций, которые не учитывают возможность регулирования производительности вентиляторов с помощью осевого направляющего аппарата. Представлено аналитическое описание аэродинамических характеристик мощного вентилятора с помощью степенных полиномов трех переменных, учитывающих возможность исследования энергоэффективности вентиляторов при частотном регулировании, дросселировании и регулировании с помощью осевого направляющего аппарата. Приведено описание модели в компактной матричной форме и указаны границы её применимости. Получена функция энергоэффективности, которая является целевой функцией для решения задачи оптимального управления производительностью вентиляторов. Максимум функции энергоэффективности определяет оптимальный режим работы вентилятора по критерию минимума потребления электроэнергии. Функция позволяет определять диапазон скорости вентилятора и угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата, соответствующих области энергоэффективного регулирования производительности вентилятора.

Ключевые слова: центробежный вентилятор, аэродинамические характеристики, энергоэффективность, регулирование производительности, осевой направляющий аппарат

ВВЕДЕНИЕ

Вентиляторы входят в широкий класс машин, называемых турбомеханизмами, и являются неотъемлемой частью многих технологических установок горнодобывающей, металлургической, химической промышленности и энергетики. Вентиляторы являются одним из главных потребителей всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Наибольшее распространение имеют центробежные вентиляторы, оснащенные асинхронными электроприводами. Актуальной проблемой является обеспечение режимов работы мощных вентиляторных агрегатов, обеспечивающих их энергоэффективную эксплуатацию. Это связано с тем, что асинхронные электроприводы вентиляторов обычно изначально проектируются как нерегулируемые, что не позволяет изменять производительность вентиляторов за счет регулирования скорости их вращения. Это приводит к перерасходу электроэнергии, который может достигать десятков процентов [1]. Особенно актуальна эта проблема для мощных промышленных вентиляторов, оснащенных высоковольтными асинхронными электроприводами.

Повышение энергоэффективности возможно за счет создания системы автоматизированного управления (САУ), обеспечивающей контроль ключевых параметров технологического участка и вырабатывающей управляющие сигналы для средств регулирования

производительности вентиляторов в зависимости от потребностей производства. Таким образом, функцией САУ является оптимизация работы вентиляторных агрегатов по критерию минимума потребления электроэнергии. Это требует создания математической модели объекта, которая с необходимой степенью достоверности отражает его основные свойства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В зависимости от условий эксплуатации возможны различные способы регулирования производительности вентиляторов [2]: частотное регулирование, дросселирование на стороне нагнетания, изменение угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата (ОНА), комбинация способов. При параллельной работе вентиляторов в составе воздуходувной станции дополнительно появляется возможность регулирования суммарной производительности за счет изменения количества работающих вентиляторов.

Задача выбора наиболее энергоэффективного способа не имеет решения в общем виде. Определение такого способа возможно только при проведении сравнительного анализа, учитывающего особенности работы вентиляторных установок в конкретных условиях эксплуатации [3, 4]. Сравнительный анализ рационально проводить, исследуя математические модели, отражающие значимые характеристики вентилятора и сети воздухопроводов [5]. При этом наибольшую ценность как для сравнительного анализа, так и для построения САУ имеют аналитические модели, в основе которых лежит теоретическое или эмпирическое описание объекта.

В работе решается задача создания аналитической математической модели вентилятора на основе достоверных и доступных исходных данных, а именно на паспортных параметрах и характеристиках вентилятора.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основные рабочие свойства вентилятора определяются его аэродинамическими характеристиками – экспериментальными графическими зависимостями давления H , мощности P и коэффициента полезного действия η от производительности Q при номинальной частоте вращения ω рабочего колеса [6]. На рис. 1 и 2 приведены типичные аэродинамические характеристики мощного центробежного вентилятора, оснащенного осевым направляющим аппаратом [7].

Установившийся режим вентилятора определяется положением рабочей точки на зависимости давления от производительности (см. рис. 1). Механическая мощность на валу вентилятора, требуемая для обеспечения рабочего режима, может быть определена по известной производительности из характеристик на рис. 2. На обеих характеристиках каждая кривая соответствует некоторому фиксированному углу поворота лопаток ОНА. Параметры рабочей точки однозначно определяют полезную мощность вентилятора, то есть мощность потока воздуха на выходе из вентилятора и его КПД. Далее по известным параметрам асинхронного электропривода могут быть определены потребляемая электрическая мощность, КПД двигателя и вентиляторного агрегата в целом [3].

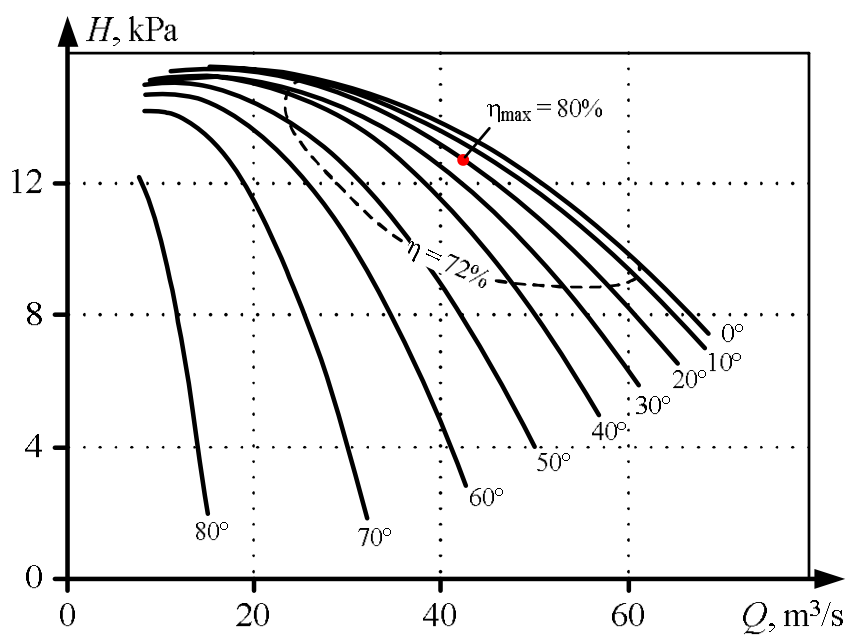


Рис. 1. Напорная характеристика вентилятора ВВН-20

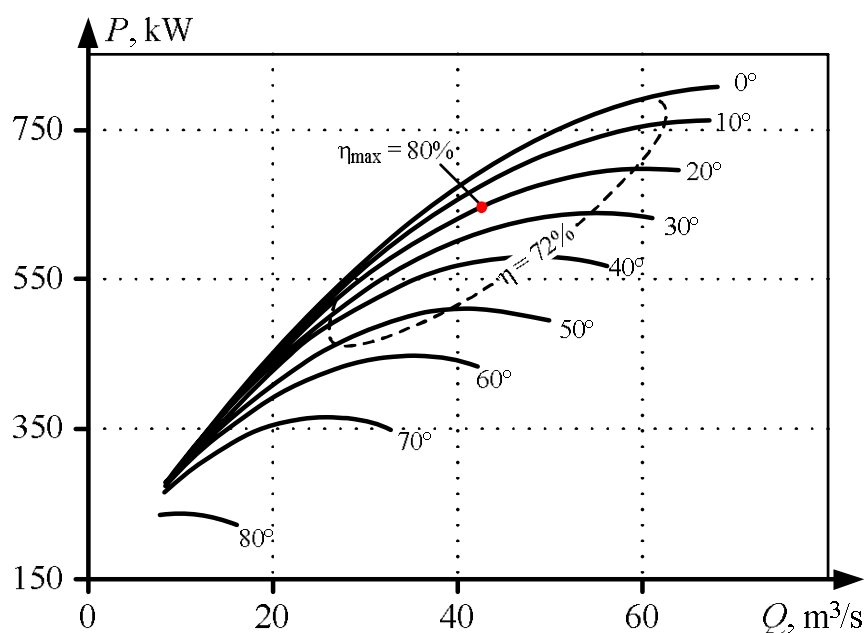


Рис. 2. Характеристика мощности вентилятора ВВН-20

Таким образом, аэродинамические характеристики являются первичными исходными данными для создания математической модели вентилятора, работающего в установившемся режиме. Значимость анализа установившихся режимов определяется тем, что для вентиляторов, как и для большинства турбомеханизмов, характерным является длительный режим работы с отсутствием перегрузок, реверсов и торможений. Поэтому именно установившийся режим определяет энергоэффективность вентиляторного агрегата.

Существуют различные подходы к моделированию характеристик турбомеханизмов и технологических систем, их включающих [8-11]. Наиболее наглядны и удобны для аналитического описания аэродинамических характеристик уравнения, которые выводятся из теории турбомеханизмов [12]:

$$H = a_1 Q^2 + b_1 \omega Q + c_1 \omega^2, \tag{1}$$

$$P = a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3, \tag{2}$$

где H – напор вентилятора, Па; Q – производительность, м³/с; P – механическая мощность на валу, Вт; ω – скорость вращения вентилятора, рад/с; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – размерные коэффициенты, постоянные для фиксированного угла поворота лопаток ОНА.

Приведенные уравнения позволяют с точностью, достаточной для инженерных расчетов, аппроксимировать графические характеристики турбомеханизмов, не имеющих седлообразного участка. Уравнения являются основой математической модели для анализа режимов работы турбомеханизмов при регулировании скорости вращения ω и дросселировании. Однако для мощных промышленных вентиляторов такая модель является неполной, поскольку не учитывает возможность регулирования производительности с помощью ОНА.

Одним из путей расширения границ применимости модели на основе выражений (1), (2) является представление коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ в виде функций угла поворота лопаток ОНА. В табл. 1 приведены значения коэффициентов уравнений (1), (2), полученные методом наименьших квадратов для каждой кривой напорной характеристики и характеристики мощности.

На рис. 3-8 показан характер изменения коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ в зависимости от угла поворота лопаток ОНА.

Таблица 1
Коэффициенты уравнений аэродинамических характеристик

α , град	$a_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}^7}$	$b_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$c_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}}$	$a_2, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$b_2, \frac{\text{кг}}{\text{м}}$	$c_2, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
0°	-2,959	0,6247	0,5937	-0,8412	0,7730	0,03159
10°	-2,927	0,5294	0,6067	-0,8826	0,7599	0,03337
20°	-3,364	0,5810	0,6047	-0,9846	0,7589	0,03386
30°	-4,442	0,8665	0,5741	-1,080	0,7510	0,03417
40°	-5,666	1,036	0,5715	-1,247	0,7602	0,0339
50°	-7,359	1,061	0,5711	-1,355	0,7186	0,03628
60°	-11,18	1,457	0,5489	-1,559	0,6944	0,03778
70°	-23,26	2,709	0,4978	-2,135	0,6961	0,03734
80°	-113,8	7,509	0,4015	-2,469	0,3044	0,05158

Приведенные зависимости существенно нелинейны. Наиболее точным способом их представления является аппроксимация кубическими сплайнами [13]. Такое представление обеспечивает полное совпадение с исходными дискретными точками табл. 1 и высокую точность интерполяции промежуточных значений зависимостей на рис. 3-8.

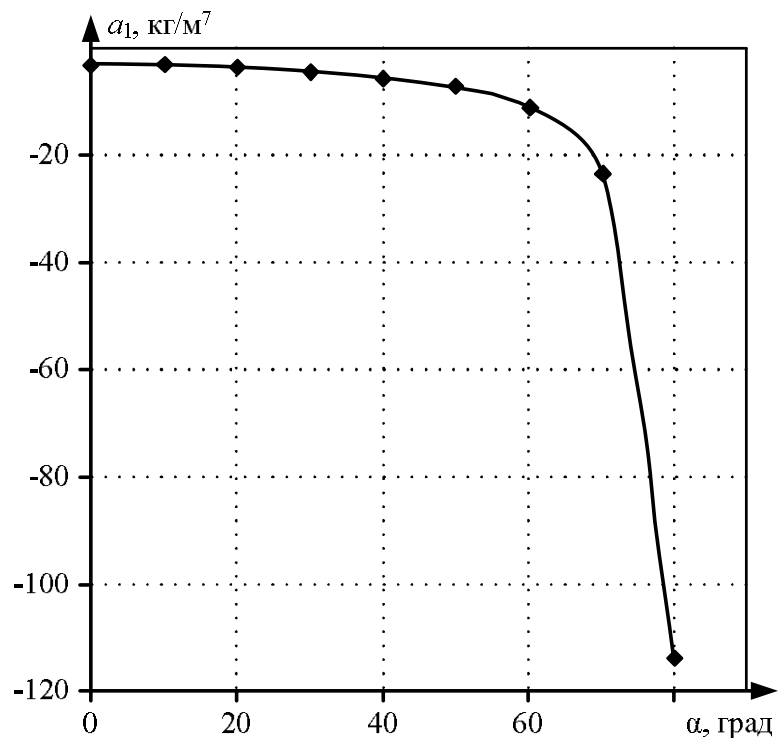


Рис. 3. Зависимость коэффициента a_1 от угла α

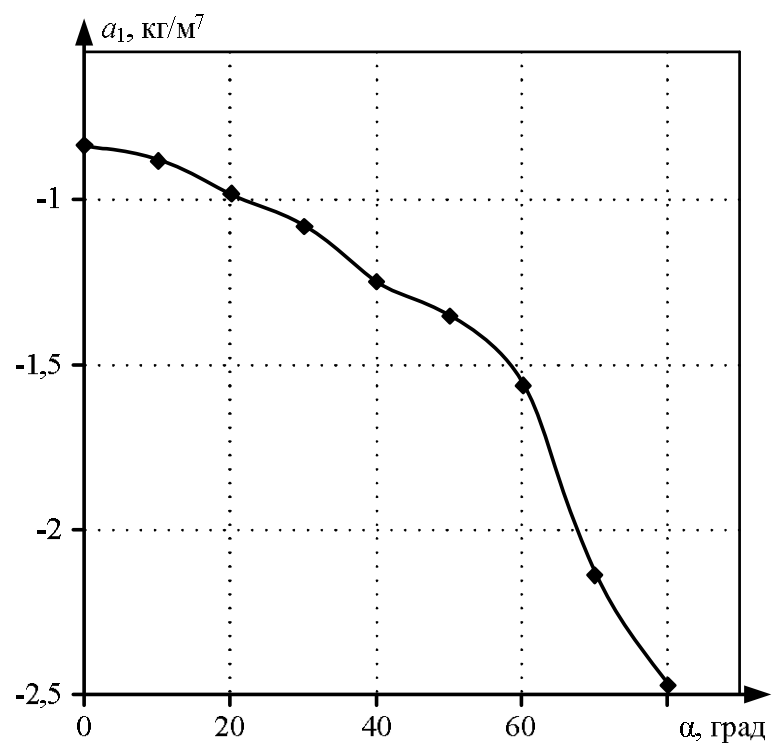


Рис. 4. Зависимость коэффициента a_2 от угла α

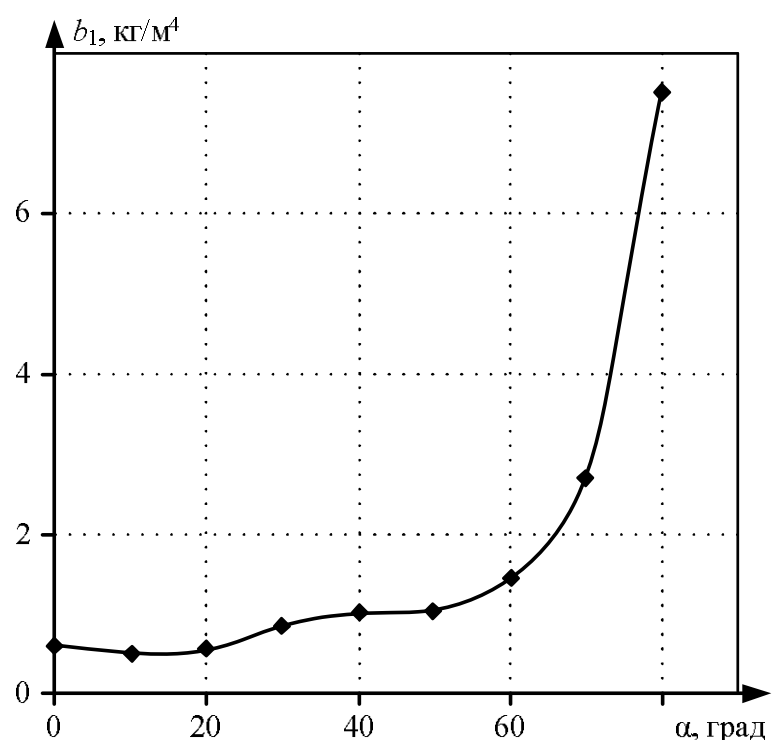


Рис. 5. Зависимость коэффициента b_1 от угла α

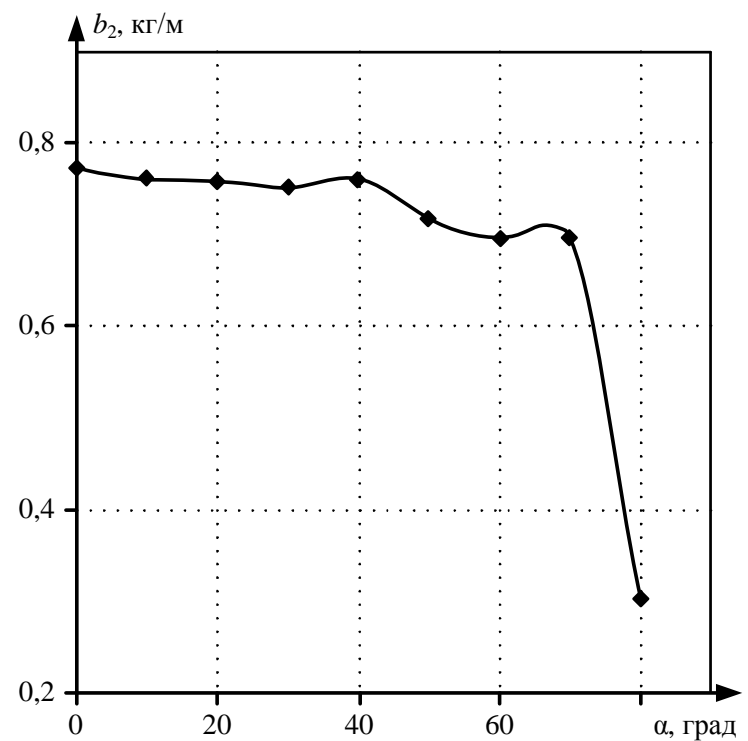


Рис. 6. Зависимость коэффициента b_2 от угла α

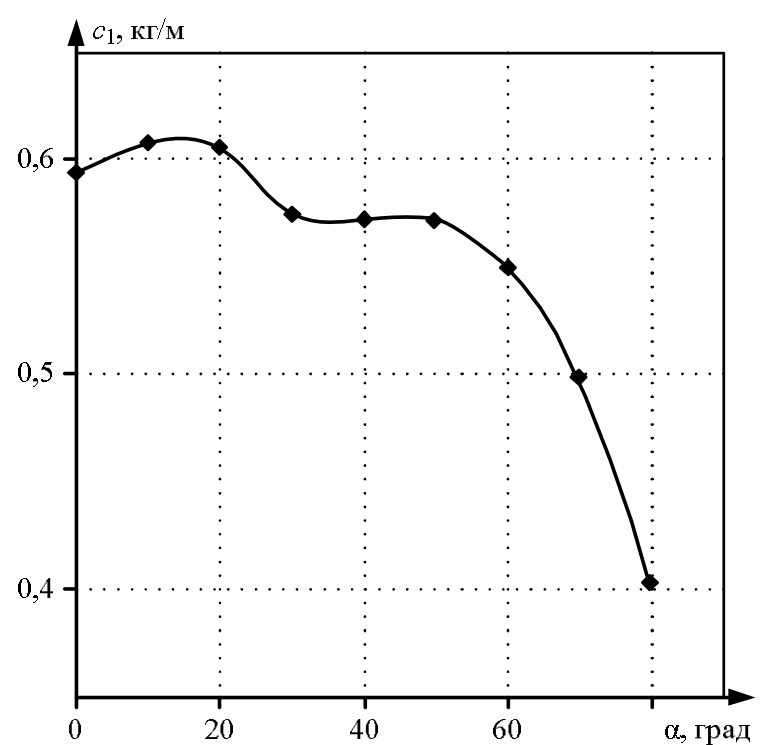


Рис. 7. Зависимость коэффициента c_1 от угла α

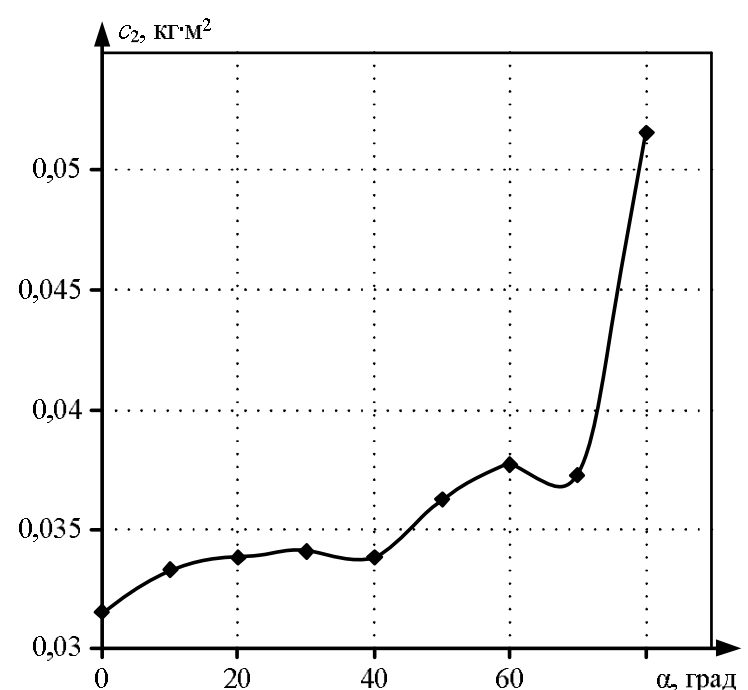


Рис. 8. Зависимость коэффициента c_2 от угла α

Современные промышленные контроллеры ведущих фирм-производителей имеют модули расширения, позволяющие реализовывать сплайн-интерполяцию на уровне непосредственного управления технологическим процессом [14]. Однако представление графических характеристик сплайнами лишает их наглядности и ограничивает возможности теоретического анализа аналитических уравнений.

Стандартным решением является аппроксимация нелинейных графических зависимостей степенными полиномами различных порядков. Исследования показывают, что зависимости на **рис. 3-8** не могут быть аппроксимированы таким способом с приемлемой точностью во всем диапазоне изменения угла поворота лопаток ОНА [15]. Решением проблемы является ограничение диапазона изменения угла α до значений, соответствующих области энергоэффективной работы вентилятора. Эта область определяется действующими нормами [16], которые ограничивают диапазон регулирования производительности вентиляторов условием энергоэффективности:

$$\eta \geq 0,9\eta_{\max}, \quad (3)$$

где η – КПД вентилятора при эксплуатации; η_{\max} – максимальный паспортный КПД вентилятора.

Зависимость КПД от производительности относится к паспортным характеристикам вентилятора и может быть приведена отдельно в виде семейства кривых $\eta = f(Q)$. Чаше информация о КПД вентилятора представляется в виде линий равных значений η , которые совмещаются с напорной характеристикой и характеристикой мощности [5]. В пределах контура, ограниченного линией, значение КПД больше некоторого установленного граничного значения.

На **рис. 1, 2** отмечена точка, соответствующая максимальному значению η_{\max} вентилятора. Пунктирной линией одинакового КПД обозначена область энергоэффективного регулирования, в пределах которой выполняется условие (3). Как видно из графиков, область определения зависимостей на **рис. 3** можно ограничить диапазоном значений

$$\alpha \in [0; \alpha_{\max}], \quad (4)$$

где α_{\max} – максимальный угол поворота ОНА, соответствующий аэродинамическим характеристикам, лежащим в области энергоэффективного регулирования. Для характеристик на **рис. 1, 2** можно принять угол $\alpha_{\max} = 50^\circ$.

В диапазоне (4) зависимости на **рис. 3** могут быть аппроксимированы полиномами пятой степени:

$$a_1 = a_{1,5}\alpha^5 + a_{1,4}\alpha^4 + a_{1,3}\alpha^3 + a_{1,2}\alpha^2 + a_{1,1}\alpha + a_{1,0};$$

$$b_1 = b_{1,5}\alpha^5 + b_{1,4}\alpha^4 + b_{1,3}\alpha^3 + b_{1,2}\alpha^2 + b_{1,1}\alpha + b_{1,0}; \quad (5)$$

$$c_1 = c_{1,5}\alpha^5 + c_{1,4}\alpha^4 + c_{1,3}\alpha^3 + c_{1,2}\alpha^2 + c_{1,1}\alpha + c_{1,0};$$

$$a_2 = a_{2,5}\alpha^5 + a_{2,4}\alpha^4 + a_{2,3}\alpha^3 + a_{2,2}\alpha^2 + a_{2,1}\alpha + a_{2,0};$$

$$b_2 = b_{2,5}\alpha^5 + b_{2,4}\alpha^4 + b_{2,3}\alpha^3 + b_{2,2}\alpha^2 + b_{2,1}\alpha + b_{2,0}; \quad (6)$$

$$c_2 = c_{2,5}\alpha^5 + c_{2,4}\alpha^4 + c_{2,3}\alpha^3 + c_{2,2}\alpha^2 + c_{2,1}\alpha + c_{2,0},$$

где $a_{1,5} \dots a_{1,0}$, $b_{1,5} \dots b_{1,0}$, $c_{1,5} \dots c_{1,0}$, $a_{2,5} \dots a_{2,0}$, $b_{2,5} \dots b_{2,0}$, $c_{2,5} \dots c_{2,0}$ – постоянные коэффициенты.

Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов приведены в **табл. 2**. Подстановка значений коэффициентов в аппроксимирующие выражения (5) и (6) дает аналитическое описание зависимостей на **рис. 3**

с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Таблица 2
Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов

	Значение коэффициентов при степени угла поворота α^n					
	$n = 5$	$n = 4$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 0$
$a_{1,n}$	$-1,237 \cdot 10^{-7}$	$1,515 \cdot 10^{-5}$	$-6,282 \cdot 10^{-4}$	$7,751 \cdot 10^{-3}$	$-2,544 \cdot 10^{-2}$	$-2,959$
$b_{1,n}$	$6,313 \cdot 10^{-8}$	$-8,134 \cdot 10^{-6}$	$3,448 \cdot 10^{-4}$	$-4,862 \cdot 10^{-3}$	$1,212 \cdot 10^{-2}$	$0,6247$
$c_{1,n}$	$-1,275 \cdot 10^{-8}$	$1,567 \cdot 10^{-6}$	$-6,443 \cdot 10^{-5}$	$9,515 \cdot 10^{-4}$	$-3,207 \cdot 10^{-3}$	$0,5937$
$a_{2,n}$	$2,960 \cdot 10^{-8}$	$-3,570 \cdot 10^{-6}$	$1,514 \cdot 10^{-4}$	$-2,792 \cdot 10^{-3}$	$1,191 \cdot 10^{-2}$	$-0,8412$
$b_{2,n}$	$-1,121 \cdot 10^{-8}$	$1,299 \cdot 10^{-6}$	$-5,302 \cdot 10^{-5}$	$9,097 \cdot 10^{-4}$	$-6,291 \cdot 10^{-3}$	$0,7730$
$c_{2,n}$	$4,273 \cdot 10^{-10}$	$-4,903 \cdot 10^{-8}$	$2,060 \cdot 10^{-6}$	$-4,036 \cdot 10^{-5}$	$4,206 \cdot 10^{-4}$	$0,03159$

Конечные выражения для описания аэродинамических характеристик достаточно громоздки, поэтому их рационально представить в матричной форме.

Зададим матрицы коэффициентов полиномов (5) и (6) соответственно:

$$K_1 = \begin{bmatrix} a_{1,5} & a_{1,4} & a_{1,3} & a_{1,2} & a_{1,1} & a_{1,0} \\ b_{1,5} & b_{1,4} & b_{1,3} & b_{1,2} & b_{1,1} & b_{1,0} \\ c_{1,5} & c_{1,4} & c_{1,3} & c_{1,2} & c_{1,1} & c_{1,0} \end{bmatrix};$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} a_{2,5} & a_{2,4} & a_{2,3} & a_{2,2} & a_{2,1} & a_{2,0} \\ b_{2,5} & b_{2,4} & b_{2,3} & b_{2,2} & b_{2,1} & b_{2,0} \\ c_{2,5} & c_{2,4} & c_{2,3} & c_{2,2} & c_{2,1} & c_{2,0} \end{bmatrix}.$$

Матрица-столбец переменного угла поворота лопаток:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha^5 \\ \alpha^4 \\ \alpha^3 \\ \alpha^2 \\ \alpha^1 \\ \alpha^0 \end{bmatrix},$$

где $\alpha^0 = 1$ соответствует множителю при свободных членах уравнений (5), (6).

Матрица-строка переменных напорной характеристики:

$$X = [Q^2 \quad \omega^2 Q \quad \omega^3].$$

Матрица-строка переменных характеристики мощности:

$$Y = [\omega Q^2 \quad \omega^2 Q \quad \omega^3].$$

Итоговое представление аэродинамических характеристик в компактной матричной форме:

$$H = X \cdot (K_1 \cdot A); \quad (7)$$

$$P = Y \cdot (K_2 \cdot A). \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) являются функциями трех переменных: производительности Q , скорости ω и угла поворота лопаток α . Важной задачей является получение области определения производительности Q для любых произвольных значений скорости ω и угла α при реали-

зации энергоэффективных режимов регулирования.

Получим область определения Q исходя из условия (3). Для этого представим КПД вентилятора формулой

$$\eta = \frac{QH}{P}, \quad (9)$$

где QH – полезная мощность потока воздуха на выходе из вентилятора; P – механическая мощность, подводимая к валу вентилятора.

Примем для простоты, что угол α имеет некоторое фиксированное значение и, соответственно, коэффициенты $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ постоянны. Подставив (1) и (2) в (9), с учетом условия энергоэффективности (3), получим:

$$\frac{a_1 Q^3 + b_1 \omega Q^2 + c_1 \omega^2 Q}{a_2 \omega Q^3 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3} \geq 0,9\eta_{\max}.$$

После элементарных преобразований получим новую форму записи условия энергоэффективности:

$$a_1 Q^3 + (b_1 - 0,9\eta_{\max} a_2) \omega Q^2 + (c_1 - 0,9\eta_{\max} b_2) \omega^2 Q - 0,9\eta_{\max} c_2 \omega^3 \geq 0. \quad (10)$$

Левая часть неравенства (10) является целевой функцией трех переменных, которую в дальнейшем будем называть функцией энергоэффективности вентилятора:

$$F(Q, a, \omega) = a_1 Q^3 + (b_1 - 0,9\eta_{\max} a_2) \omega Q^2 + (c_1 - 0,9\eta_{\max} b_2) \omega^2 Q - 0,9\eta_{\max} c_2 \omega^3 \geq 0. \quad (11)$$

Для получения области определения Q необходимо решить уравнение $F(Q, a, \omega) = 0$ при фиксированных значениях угла a и скорости ω . В энергоэффективной области уравнение имеет два положительных корня. Третий, отрицательный корень не имеет смысла, поскольку соответствует движению воздушного потока в направлении, противоположном требуемому. Положительные корни Q_{\min} и Q_{\max} задают границы области определения производительности при энергоэффективном регулировании:

$$Q \in [Q_{\min}; Q_{\max}]. \quad (12)$$

Корни уравнения могут быть получены аналитически, численно или графически. Область определения (12) может быть получена для любого сочетания угла α и скорости ω . Отсутствие положительных корней определяет невозможность энергоэффективной работы вентилятора.

Графическое построение дает наиболее наглядное представление о свойствах функции энергоэффективности (рис. 9).

Имеющийся в пределах диапазона (12) максимум позволяет сформулировать цель оптимального управления по критерию минимума потребления электроэнергии: при реализации любого из способов регулирования вентилятора (или сочетания способов), необходимо стремиться к тому, чтобы функция энергоэффективности приближалась к своему максимальному значению в заданной области определения:

$$F(Q, a, \omega) \rightarrow \max.$$

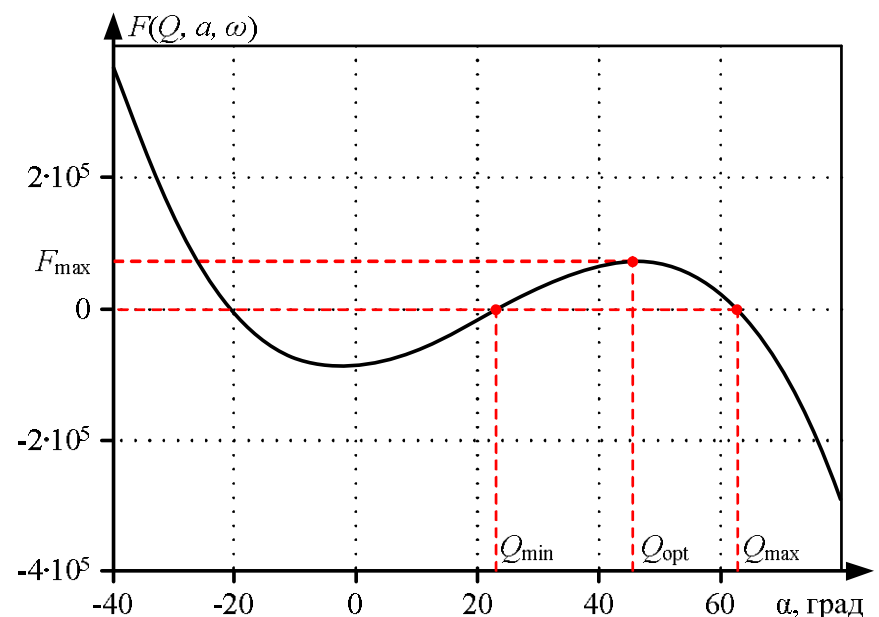


Рис. 9. Функция энергоэффективности вентилятора при $\alpha=0$ и номинальной скорости вращения

Очевидно, что оптимальный режим работы вентилятора соответствует максимуму значению функции F_{\max} , определяемому значением производительности Q_{opt} . Очевидно, что значение Q_{opt} соответствует максимальному КПД вентилятора.

С помощью функции энергоэффективности можно также определить область определения скорости и угла поворота лопаток ОНА, которые соответствуют области энергоэффективного регулирования производительности вентилятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выражения (7) и (8) являются аналитической моделью аэродинамических характеристик в пределах ограничений (4) и (12), накладываемых условием энергоэффективности (3). Целевая функция энергоэффективности (11) является удобным инструментом для поиска оптимальных режимов и определения допустимых диапазонов производительности Q , скорости вращения ω и угла поворота лопаток α при регулировании центробежных вентиляторов

Список источников

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Вахвахов Г.Г. Работа вентиляторов в сети. М.: Стройиздат, 1975. 101 с.
3. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
4. Крупников А.В., Ваняшов А.Д., Январев И.А. Определение энергоэффективности установок воздушного охлаждения на базе аппаратов с различным числом вентиляторов // Омский научный вестник. 2010. №3 (93). С. 173-176.
5. Вечеркин М.В., Сарваров А.С. Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2006. №4. С. 34-38.
6. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
7. Сайт АО «Чебоксарский электромеханический завод». URL: <https://www.emz74.ru/catalog/?id=1361> (дата обращения 02.10.2022)
8. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.

- 368 с.
9. Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии: дис. ... канд. техн. наук. 05.15.13 / Костышин Владимир Степанович. Ивано-Франковск, 2003.
 10. Лохов С.П., Бузов А.А., Лохов А.С. Поиск электромеханических моделей турбомеханизмов // Вестник ЮУрГУ. 2001. №4. С. 100-105.
 11. Глебов Р.С., Туманов М.П., Антюшин С. С. Практические аспекты идентификации математической модели вентиляционной установки // Естественные и технические науки. 2012. № 2(58). С. 330-340.
 12. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
 13. Свечко М.В., Питолин В.Е. Метод сплайн-аппроксимации и интерполяции графических характеристик сложных энергетических объектов в расчетных моделях // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. 2007. №3. С. 85-89.
 14. Сайт интернет-магазина техники автоматизации SIEMENS. URL: <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-SA01/5000511/info/> (дата обращения 02.10.2022).
 15. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов // Электротехнические системы и комплексы. 2006. №14. С 11-15.
 16. ГОСТ 10616-2015. Вентиляторы радиальные и осевые. Размеры и параметры. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.

Поступила в редакцию 12 сентября 2022 г.

Принята к печати 4 октября 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELING THE AERODYNAMIC PARAMETERS OF CENTRIFUGAL FANS WITH AN AXIAL DISTRIBUTOR

Maksim V. Vecherkin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, vecherkin@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, anvar.magtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, ig_samarina@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

Irina P. Romanova

Undergraduate Student, Department of Computer Science and Information Security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, romanova.irina.01@mail.ru

Irina Yu. Bogacheva

Assistant Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, bogachevirina@yandex.ru

Centrifugal fans with high-voltage asynchronous drives consume a large proportion of the electricity at various production facilities. The majority of the fan installations, however, operate with excessive energy consumption. This can be reduced by adapting the performance of the fans to the operation needs. Selecting the most energy-efficient method requires the investigation of a mathematical model that takes all relevant site characteristics into account. The authors review a mathematical model of the centrifugal fan based on its rated aerodynamic parameters. This model is necessary to solve the optimal control problem for high-power industrial fans using the minimum power consumption criterion. Solving this problem requires a theoretical research of various fan output control methods and selecting the most energy-efficient method for the given operating conditions. This work rationalizes the modification of the known approximating functions of the aerodynamic parameters that do not account for the fan output control using the axial distributor. The authors provide an analytical description of aerodynamic parameters of a high-power fan using a power polynomial of three variables fit for the researching of fan energy efficiency under frequency control, throttling, and axial-distributor control. The article describes the model in a compact matrix form and sets forth the limitations of its applicability. The authors obtain a target function to solve the optimal control problem for fans. The maximum energy efficiency function determines the optimum mode of fan

operation according to the criterion of minimum energy consumption. The function determines the range of fan speed and blade angle of the axial distributor that corresponds to the energy-efficient control range of the fan performance.

Keywords: centrifugal fan, aerodynamic parameters, energy efficiency, output control, axial distributor

REFERENCES

1. Leznov B.S. *Energosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnyh i vozduhoduvnyh ustanovkah* [Energy saving and controlled drives in pumping and blowing plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 360 p. (In Russian)
2. Vakhvakhov G.G. *Rabota ventilyatorov v seti* [Network operation of fans]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 101 p. (In Russian)
3. Vakhvakhov G.G. *Energosberezhenie i nadezhnost ventilyatornyh ustanovok* [Energy saving and fan unit reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 176 p. (In Russian)
4. Krupnikov A.V., Vanyashov A.D., Yanvarev I.A. Determining the energy efficiency of air cooling units based on systems with various numbers of fans. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2010, no. 3 (93), pp. 173–176. (In Russian)
5. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S. Researching the output control methods for the LPTs-10 fan station at Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij*.

- Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 34-38. (In Russian)
6. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. *Centrobezhnye ventilyatory. Aerodinamicheskie skhemy i harakteristiki* [Centrifugal fans. Aerodynamic designs and parameters: A handbook]. Moscow, Machine building Publ., 1980. 176 p. (In Russian)
 7. AO «Cheboksarskiy elektromekhanicheskiy zavod» (JSC Cheboksary Electromechanical Plant). Available at: <https://www.emz74.ru/catalog/?id=1361> (accessed 02 October 2022)
 8. Glikman B.F. *Matematicheskie modeli pnevmogidravlicheskikh sistem* [Mathematical models of pneumatic hydraulic systems]. Moscow, Science, Physics and Maths chief editorial board Publ., 1986. 368 p. (In Russian)
 9. Kostyshin V.S. *Modelirovanie rezhimov raboty centrobezhnykh nasosov na osnove elektrogidravlicheskoj analogii*. Kand. Diss. [Modeling the operating modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Kand. Diss.] Ivano-Frankivsk, 2000. 163 p. (In Russian)
 10. Lokhov S.P., Buzov A.A., Lokhov A.S. Searching for the electromechanical models of turbine mechanisms. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2001, no. 4, pp. 100-105. (In Russian)
 11. Glebov R.S., Tumanov M.P., Antyushin S.S. Practical aspects of the identification of a mathematical model for a fan unit. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2012, no. 2 (58), pp. 330-340. (In Russian)
 12. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. *Elektroprivod turbomekhanizmov* [Electric drives of turbine mechanisms]. Moscow, Energy Publ., 1972. 240 p. (In Russian)
 13. Svechko M.V., Pitolin V.E. The spline approximation and graphic parameter interpolation method for complex power facilities in computing models. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Polotsk State University. Series S, Fundamental Sciences], 2007, no. 3, pp. 85-89. (In Russian)
 14. *Sayt internet-magazina tekhniki avtomatizatsii SIEMENS* (Website of the online store of SIEMENS automation equipment)ю Available at: <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/5000511/info/> (accessed 02 October 2022)
 15. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. Modeling the aerodynamic performance of centrifugal fans. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2006, no. 14, pp. 11-15. (In Russian)
 16. GOST 10616-2015. Radial and axial Fans. Dimensions and parameters. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p. (In Russian)

Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов с осевым направляющим аппаратом / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, И.Г. Самарина, И.П. Романова, И.Ю. Богачева // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 69-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-69-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-69-75)

Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Samarina I.G., Romanova I.P., Bogacheva I.Yu. Modeling the Aerodynamic Parameters of Centrifugal Fans with an Axial Distributor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 69-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-69-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-69-75)