

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДУХОДУВНОЙ СТАНЦИИ

М.В. Вечеркин, vecherkin@inbox.ru
А.С. Сарваров, anvar@magtu.ru
И.П. Романова, romanova.irina.01@mail.ru
И.Ю. Богачева, bogachevirina@yandex.ru
С.В. Осолков, osolkov.sv@mail.ru

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

Аннотация. Представлена методика сравнения энергетической эффективности различных способов регулирования суммарной производительности воздуходувной станции. Показаны основные принципы электрического моделирования сетей воздуховодов для математического описания их свойств и характеристик. Приведены результаты сравнения энергоэффективности способов регулирования для одиночного вентилятора и группы из пяти вентиляторов, работающих на общую магистраль. Получен вывод о высокой энергоэффективности сочетания старт-стопного регулирования с плавным регулированием с помощью осевых направляющих аппаратов для воздуходувной станции из пяти вентиляторов в сравнении с одновременным частотным регулированием пяти вентиляторов.

Ключевые слова: вентилятор, воздуходувная станция, асинхронный электропривод, регулирование, энергоэффективность, осевой направляющий аппарат, электрическое моделирование

Для цитирования: Методика сравнения энергоэффективности способов регулирования производительности воздуходувной станции / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, И.П. Романова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 34–41. DOI: 10.14529/power220404

Original article
DOI: 10.14529/power220404

METHODOLOGY FOR COMPARING THE ENERGY EFFICIENCY OF METHODS FOR REGULATING THE PERFORMANCE OF A BLOWER STATION

M.V. Vecherkin, vecherkin@inbox.ru
A.S. Sarvarov, anvar@magtu.ru
I.P. Romanova, romanova.irina.01@mail.ru
I.Yu. Bogacheva, bogachevirina@yandex.ru
S.V. Oskolkov, osolkov.sv@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This article presents a method for comparing the energy efficiency of different methods of regulating the total productivity of a blower station. The basic principles for the electrical modeling of duct networks are shown for a mathematical description of their properties. The results of a comparison of the energy efficiency of regulating methods for a single fan and a group of five fans operating on a common line are presented. There is higher energy efficiency combining start-stop control with stepless control using axial guide vanes for a five-fan blower station compared to the simultaneous frequency control of five fans.

Keywords: fan, blower station, asynchronous electric drive, regulation, energy efficiency, axial guide vanes, electrical modelling

For citation: Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Romanova I.P., Bogacheva I.Yu., Oskolkov S.V. Methodology for comparing the energy efficiency of methods for regulating the performance of a blower station. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(4):34–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220404

Актуальность проблемы и постановка задачи

Воздуходувные станции представляют собой группу вентиляторов, параллельно работающих на общую магистраль в целях обеспечения воздухом различных технологических объектов.

В большинстве случаев вентиляторы оснащены высоковольтными асинхронными электроприводами. Такие приводы изначально проектируются как нерегулируемые, что не позволяет изменять производительность вентиляторов по потребностям производства. Это приводит к перерасходу электроэнергии, которая в некоторых случаях может достигать 30 % [1].

Снижение неоправданного расхода электроэнергии возможно при регулировании производительности вентиляторов в зависимости от потребностей производства. Рассмотрим вентиляторную станцию с пятью вентиляторными агрегатами, работающими на общую магистраль, и обеспечивающую воздухом трех однотипных потребителей (рис. 1) [2].

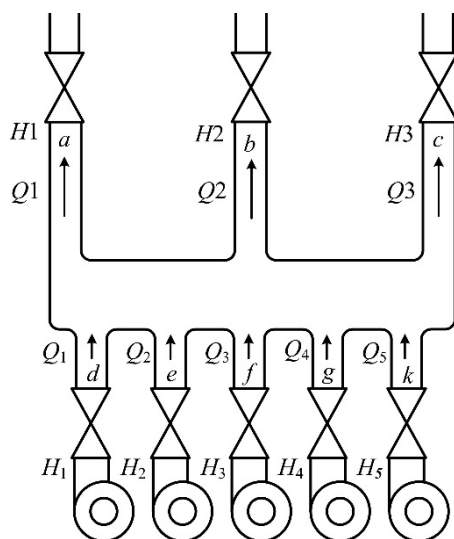


Рис. 1. Структура вентиляторной станции
Fig. 1. Structure of the fan station

Каждый вентилятор создает соответствующее давление H_1-H_5 и обеспечивает производительность Q_1-Q_5 . Из общей магистрали воздух распределяется по потребителям, каждый из которых имеет возможность индивидуального регулирования расхода воздуха вентилями. Перед вентилями каждого потребителя создаются давления $H1-H3$, значения которых должны обеспечивать функционирование каждого потребителя независимо от других. Таким образом, воздуходувная станция должна обеспечивать производительность в соответствии с требуемым суммарным расходом, а также создавать давление перед потребителями не менее установленных допустимых значений.

В общем случае возможны следующие способы регулирования суммарной производительности воздуходувной станции:

- 1) изменение сопротивления сети с помощью запорной арматуры на стороне нагнетания вентилятора – дросселирование;
- 2) изменение скорости вращения вентиляторов – частотное регулирование;
- 3) изменение числа работающих вентиляторов – старт-стопное регулирование;
- 4) изменение угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата (ОНА) вентиляторов;
- 5) сочетания двух различных способов – комбинированное регулирование.

Перечисленные способы регулирования неравнозначны между собой как по энергетической эффективности, так и по материальным затратам, требуемым для их реализации.

Наиболее энергоэффективным способом считается частотное регулирование вентиляторов. Для его реализации необходимо оснащение электроприводов вентиляторов преобразователями частоты (ПЧ). Однако высокая стоимость мощных высоковольтных ПЧ препятствует их широкому применению. Для вентиляторных станций в большинстве случаев срок окупаемости высоковольтных ПЧ превышает срок их службы [1].

Дросселирование является стандартным средством регулирования расхода воздуха для каждого отдельного потребителя. Однако при дросселировании вентиляторов этот способ имеет низкую энергоэффективность, что подтверждается многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями [1, 3, 4].

Изменение угла поворота ОНА является, по сути, дросселированием на стороне всасывания воздуха в вентилятор. При этом лопатки ОНА подкручивают поток воздуха, что обеспечивает лучшие регулировочные характеристики в сравнении с дросселированием на стороне нагнетания. Для автоматического регулирования производительности вентилятора необходимо оснащение ОНА исполнительными механизмами, обеспечивающими как угловое перемещение лопаток, так и контроль угла их поворота.

Старт-стопное регулирование позволяет изменять суммарную производительность ступенчато за счет изменения количества работающих вентиляторов. Реализация такого способа требует использования пусковых устройств, минимизирующих негативные последствия пусковых процессов мощных асинхронных двигателей [5].

Комбинированное регулирование может быть реализовано сочетанием различных способов: частотного и ОНА, старт-стопного и дросселирования и т. д.

Проблемой является выбор того или иного способа в каждом конкретном случае с учетом особенностей технологического объекта. В большинстве случаев экспериментальный путь выбора способа регулирования невозможен. Эту проблему рационально решать теоретически, на основе ис-

следований математической модели, описывающей работу вентиляторов и сети воздухопроводов.

Исследования

Для сравнения энергоэффективности регулирования вентиляторов можно выделить два основных подхода: графический метод и метод электрического моделирования.

Графический метод подробно разработан для одиночных вентиляторов [1, 3, 6]. Он позволяет по техническим характеристикам вентилятора и известным параметрам сети определить любую из необходимых для сравнительного анализа величин. Такими величинами являются: давление H и производительность Q каждого вентилятора; механическая мощность P на валу двигателя; коэффициент полезного действия η вентилятора. Достоинством графического метода является наглядность. Существенным недостатком метода является сложность его реализации применительно к группе из нескольких вентиляторов [3].

Метод электрического моделирования основан на аналогии физических процессов протекания электрического тока в разветвленных цепях и движения воздуха в сетях воздухопроводов. При этом различные участки вентиляционной сети представляются в виде эквивалентных электрических элементов [7]. Это позволяет представлять сколь угодно сложную сеть воздухопроводов в виде электрической схемы замещения и воспользоваться для ее анализа уравнениями, сходными по форме с законами Кирхгофа.

В работе за основу взят метод электрического моделирования. Основные принципы электрического моделирования вентиляционных сетей изложены в специальной литературе [8]. Производительность вентилятора или расход воздуха Q является эквивалентом электрического тока, давление H – эквивалентом напряжения, аэродинамическое сопротивление сети R – эквивалентом электрического сопротивления. В основе метода лежат два очевидных условия: баланс расходов в узлах и баланс потерь давления по замкнутым контурам. Эти условия для сети без противодействия в общем виде записываются так:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = 0; \\ \sum_{j=1}^m H_j = \sum_{k=1}^l R_k Q_k^2, \end{cases} \quad (1)$$

где Q_i – расход воздуха через участок сети; R_i – аэродинамическое сопротивление участка; H_j – давление, создаваемое вентилятором в замкнутом контуре; n – количество узлов в схеме; m – количество вентиляторов, действующих в замкнутом контуре; l – количество участков с потерями давления в контуре.

Отличием уравнений (1) от законов Кирхгофа является то, что во втором уравнении расход Q (эквивалент тока) входит во второй степени.

На основании сказанного выше сеть воздухопроводов на рис. 1 можно представить эквивалентной схемой замещения рис. 2. Резисторы на схеме моделируют аэродинамические сопротивления участков сети, переменные резисторы – вентили, источники напряжения – вентиляторы.

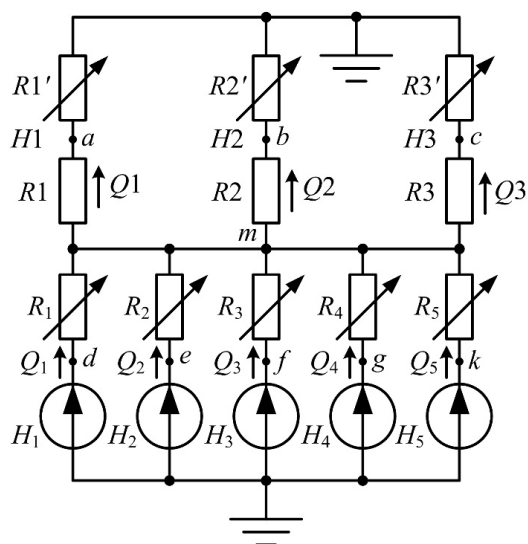


Рис. 2. Электрическая схема замещения воздухопроводной станции
Fig. 2. Electrical replacement circuit of the blower station

Эквивалентной схеме замещения на рис. 2 соответствует система уравнений, составленная согласно условиям (1):

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_1 + Q_2 + Q_3; \\ Q_1^2 R_1 - Q_2^2 R_2 = H_1 - H_2; \\ Q_2^2 R_2 - Q_3^2 R_3 = H_2 - H_3; \\ Q_3^2 R_3 - Q_4^2 R_4 = H_3 - H_4; \\ Q_4^2 R_4 - Q_5^2 R_5 = H_4 - H_5; \\ Q_1^2 R_1 + Q_1^2 R_1 = H_1 - H_1; \\ Q_2^2 R_2 + Q_1^2 R_1 = H_1 - H_2; \\ Q_3^2 R_3 + Q_4^2 R_4 = H_4 - H_3; \\ Q_1^2 R_1 + Q_5^2 R_5 = H_5 - H_1; \\ Q_2^2 R_2 - Q_3^2 R_3 = H_3 - H_2. \end{cases} \quad (2)$$

В реальных сетях часто известны давления воздуха в отдельных участках, которые определяются по показаниям приборов. Обычно контролируют давления перед вентилями в точках a , b и c (см. рис. 1), что необходимо для функционирования систем учета и автоматического управления. Поэтому в системе уравнений (2) падение давления на вентилях заменены соответствующими значениями давления перед вентилями H_1 , H_2 , H_3 .

Приведенная система (2) не может быть решена в общем виде. Для реализации численных методов расчета необходимо задать значения рас-

хода воздуха потребителями Q_1, Q_2, Q_3 , аэродинамические сопротивления всех участков сети R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 , давления перед вентилями каждого потребителя H_1, H_2, H_3 . Неизвестными величинами являются производительности Q_1-Q_5 и давления H_1-H_5 каждого вентилятора.

Система нелинейных уравнений (2) имеет множество решений, большинство которых являются неприемлемыми. Такими являются, например, решения с отрицательными значениями производительности вентиляторов или расхода воздуха потребителями. Для исключения подобных решений необходимо задать условие равенства производительностей вентиляторов:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5. \quad (3)$$

Задание этого условия обеспечивает единственное решение системы (2), соответствующее одинаковым положительным значениям производительности всех вентиляторов. Кроме этого, условие (3) облегчает поиск оптимальных, по критерию минимума энергопотребления, режимов работы вентиляторов.

Производительность и давление вентилятора являются главными параметрами, определяющими режим его работы. С помощью аэродинамических характеристик можно определить все основные энергетические параметры вентилятора: полезную мощность, механическую мощность на валу двигателя, КПД вентилятора.

Аэродинамические характеристики представляют собой графические зависимости давления от производительности, механической мощности на валу вентилятора от производительности и КПД вентилятора от производительности [9]. Эти характеристики с достаточной для инженерных расчетов точностью могут быть аппроксимированы функциями [4]:

$$H = a_1 Q^2 + b_1 \omega Q + c_1 \omega^2; \quad (4)$$

$$P = a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3; \quad (5)$$

$$\eta = \frac{QH}{P} = \frac{a_1 Q^3 + b_1 \omega Q^2 + c_1 \omega^2 Q}{a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3}, \quad (6)$$

где H – полное давление вентилятора; Q – производительность; P – мощность на валу; ω – скорость двигателя; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – коэффициенты, зависящие от угла поворота лопаток ОНА.

Для получения функций, дающих возможность анализа для всех способов регулирования, необходимо учесть зависимость коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ от угла поворота лопаток ОНА. Эти зависимости могут быть представлены в виде аналитических функций или средствами сплайн-интерполяции данных [10].

Таким образом, система уравнений (2) совместно с условием (3) и аппроксимирующими выражениями (4)–(6) представляют собой математическую модель, позволяющую анализировать различные режимы работы воздухоудвн станции в

широком диапазоне изменения производительности при различных способах регулирования.

Результаты

На основе представленной математической модели создана методика сравнения энергоэффективности способов регулирования. Сущность методики заключается в следующем.

1. По чертежам сети воздухоудвн создается эквивалентная электрическая схема замещения. По справочным данным определяются параметры каждого элемента схемы.

2. Составляется система уравнений, описывающая электрическую схему замещения, согласно правилам (1).

3. По известным аэродинамическим характеристикам вентиляторов определяются коэффициенты полиномов (4)–(6) и их зависимость от их угла поворота лопаток ОНА: $a_1(\alpha), b_1(\alpha), c_1(\alpha), a_2(\alpha), b_2(\alpha), c_2(\alpha)$.

4. Задаются значения расхода воздуха каждого потребителя Q_1, Q_2, Q_3 и соответствующие им давления H_1, H_2, H_3 , исходя из реальных потребностей технологического объекта.

5. Находится решение системы уравнений (2) численными методами. Неизвестными в системе являются давления H_1-H_5 и производительности Q_1-Q_5 , которые определяют рабочие точки вентиляторов на расходно-напорных характеристиках.

6. Рассчитываются соответствующие рабочим точкам параметры регуляторов для различных способов регулирования производительности:

а) аэродинамическое сопротивление дроссельной заслонки (при номинальной скорости вентилятора и открытом ОНА);

б) скорость вращения вентилятора (при открытой дроссельной заслонке и открытом ОНА) как положительный корень уравнения (4)

$$\omega = \frac{-b_1 Q + \sqrt{(b_1 Q)^2 - 4c_1(a_1 Q^2 - H)}}{2c_1};$$

в) угол поворота лопаток ОНА (при номинальной скорости вентилятора и открытой дроссельной заслонке).

7. По известным рабочим точкам вентиляторов и параметрам регуляторов рассчитываются потребляемая мощность (5) и КПД (6) для каждого способа регулирования производительности.

8. Пункты 4–7 повторяются для различных значений расхода воздуха потребителями.

9. По результатам расчетов строятся следующие зависимости:

а) графики зависимости суммарной мощности, потребляемой воздухоудвн станцией, от суммарного расхода воздуха потребителями;

б) графики зависимости КПД от производительности для каждого вентилятора.

10. Производится сравнительный анализ потребляемой мощности и КПД для рабочих режи-

мов вентиляторов, делается вывод о преимуществе того или иного способа регулирования с точки зрения энергоэффективности, оцениваются границы допустимых диапазонов производительности вентиляторов. Границы диапазонов определяются значением минимально допустимого КПД, который для вентиляторов равен

$$\eta_{\min} = 0,9\eta_{\max}, \quad (7)$$

где $\eta_{\max}$ – максимальный КПД вентилятора, соответствующий номинальной производительности.

Рассмотрим возможности данной методики применительно к работе одиночного вентилятора на сеть без противодействия с неизменными параметрами. Вентилятор имеет высоковольтный асинхронный электропривод с номинальной мощностью 800 кВт и аэродинамические характеристики, типичные для центробежных вентиляторов [8]. На рис. 3 в относительных единицах приведены расчетные зависимости потребляемой мощности (рис. 3а) и КПД вентилятора (рис. 3б) при различных способах его регулирования (P – мощность, потребляемая вентиляторной установкой для создания производительности Q ; P_n – мощность, соответствующая номинальной производительности Q_n). График для частотного регулирования представлен с учетом типового значения КПД частотного преобразователя, равного 0,95.

Расчетные зависимости на рис. 3 показывают, что для одиночного вентилятора частотное регулирование имеет преимущество перед другими способами в широком диапазоне производительности. Эти результаты совпадают с многочисленными теоретическими и экспериментальными ис-

следованиями, что подтверждает работоспособность методики.

Частотное регулирование и регулирование ОНА сравнимы по энергоэффективности при небольшом диапазоне регулирования вблизи номинальных значений производительности. При этом достоинством частотного регулирования является постоянный КПД вентилятора во всем рабочем диапазоне производительности (см. рис. 3а). Дросселирование слабо влияет на КПД вентилятора (см. рис. 3б), однако существенно проигрывает другим способам по потребляемой мощности.

Однако результаты, полученные для одиночного вентилятора, не могут быть обобщены на случаи параллельной работы группы вентиляторов на общую магистраль. На рис. 4 представлены графики для частотного регулирования пяти вентиляторов и комбинированного регулирования за счет изменения количества работающих вентиляторов в сочетании с регулированием ОНА. Графики построены для случая одновременного регулирования вентиляторов при соблюдении условия (3).

Из графиков видно, что при одновременном регулировании пяти вентиляторов частотное регулирование не имеет преимущества перед регулированием ОНА по потребляемой мощности. Преимущество регулирования ОНА возрастает при комбинированном регулировании при малых значениях суммарной производительности. Выключение части вентиляторов приводит как к снижению потребляемой мощности (рис. 4а), так и к увеличению КПД работающих вентиляторов (рис. 4б).

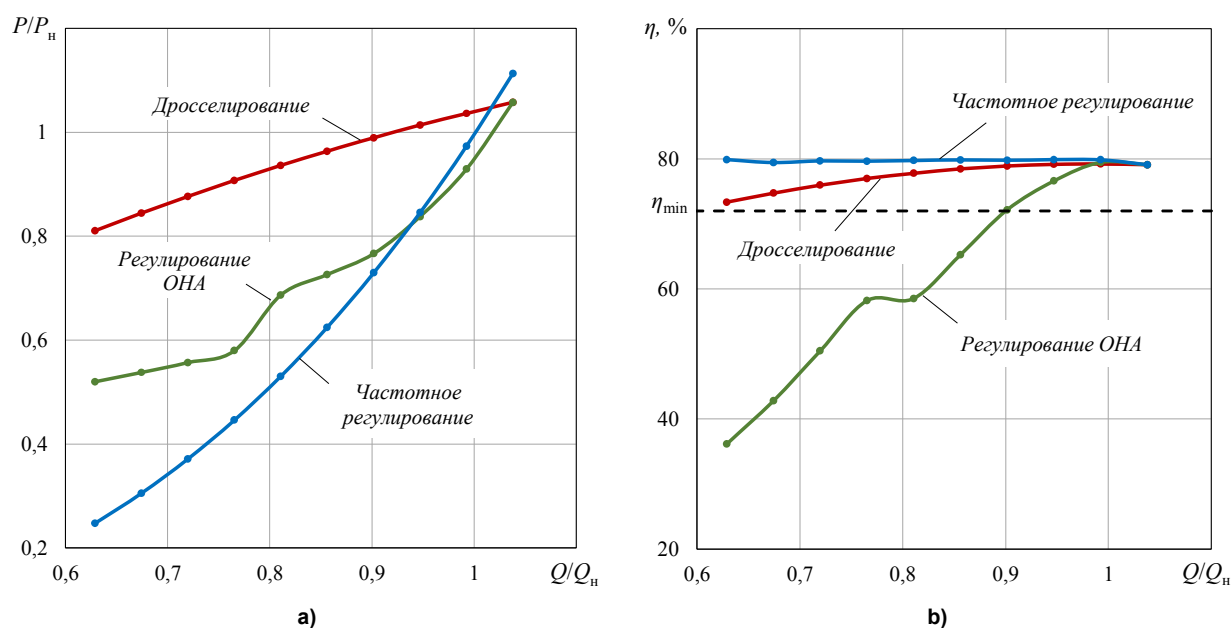


Рис. 3. Расчетные энергетические характеристики при работе одиночного вентилятора: а – относительная мощность вентилятора от относительной производительности; б – КПД вентилятора от относительной производительности
Fig. 3. Calculated energy characteristics during operation of a single fan: a – relative fan power from relative productivity; b – fan efficiency from relative performance

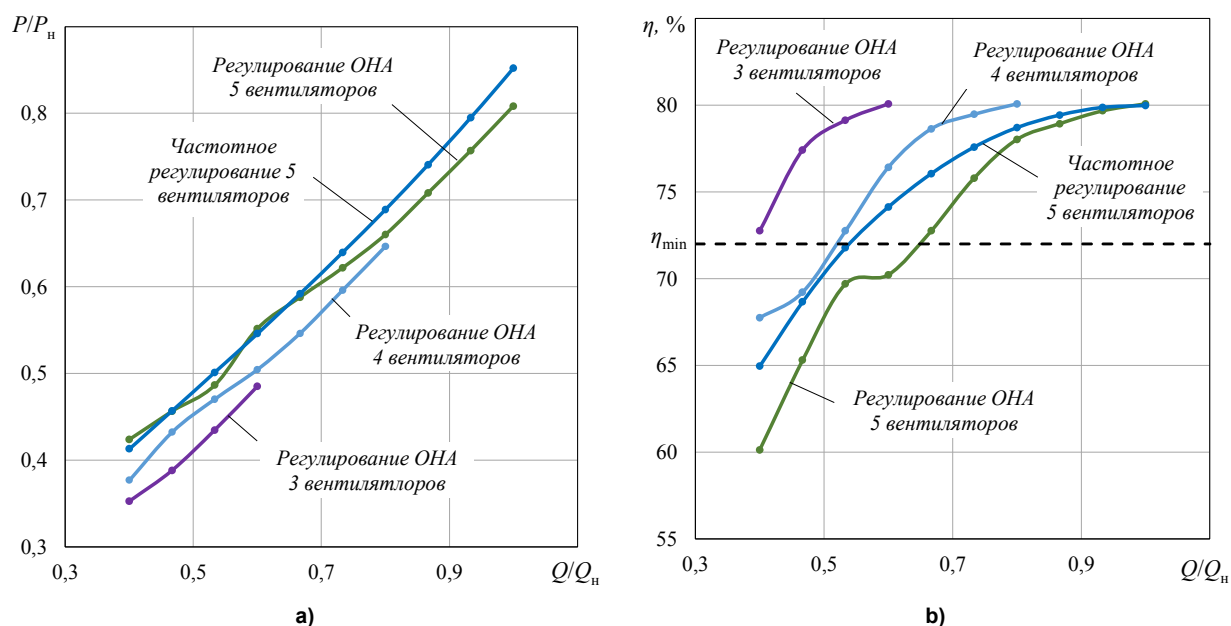


Рис. 4. Расчетные энергетические характеристики при работе группы вентиляторов: а – относительная суммарная мощность воздуходувной станции от относительной суммарной производительности; б – КПД одного вентилятора от относительной производительности одного вентилятора

Fig. 4. Calculated energy characteristics during the operation of a group of fans: а – the relative total power of the blower station from the relative total capacity; б – the efficiency of one fan from the relative performance of one fan

Выводы

Метод электрического моделирования является эффективным средством анализа вентиляционных сетей. Математическая модель, построенная на основе эквивалентной электрической модели и математическом описании вентиляторов, является мощным инструментом для поиска энергоэффективных режимов работы воздуходувных станций.

Приведенная методика моделирования позволяет решать широкий спектр задач, связанных с работой вентиляторов в разветвленных сетях: анализ энергоэффективности различных способов производительности; выбор вентиляторов для сети с заданными параметрами; определение значений давления и расхода в отдельных участках; оптимизация работы вентиляционной сети [11] и т. д.

Примеры применения методики показывают, что сложившиеся представления о преимуществе частотного регулирования асинхронных электроприводов не всегда верны для группы параллельно работающих вентиляторов. Для рассмотренного случая частотное регулирование проигрывает в энергоэффективности комбинированному способу регулирования. Данный вывод не является общим для всех воздуходувных станций. Для каждого случая необходим анализ математической модели с учетом всех значимых свойств исследуемого объекта [12].

Представленная методика может быть адаптирована и для других энергоемких технологических объектов: компрессорных, газодувных [13] и насосных станций с учетом особенностей данных объектов.

Список литературы

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. 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. 63–67.
3. Вахвахов Г.Г. Работа вентиляторов в сети. М.: Стройиздат, 1975. 101 с.
4. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
5. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Макаров А.В. Методика расчета частоты плавных пусков инерционных асинхронных электроприводов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2018. № 1. С. 59–64. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.059-064
6. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
7. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука, 1986. 368 с.

8. Абрамов Ф.А., Фролов Н.А. Электрическое моделирование вентиляционных сетей угольных шахт. М.: Углетехиздат, 1957. 135 с.
9. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: справ. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
10. Свечко М.В., Питолин В. Е. Метод сплайн-аппроксимации и интерполяции графических характеристик сложных энергетических объектов в расчетных моделях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2007. № 3. С. 85–89.
11. Himla J.W. Optimized fan control in variable air volume HVAC systems using static pressure resets: strategy selection and savings analysis. Texas A&M university, 2009. 70 p.
12. Крупников А.В., Ванышов 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.
13. Kryachuk V.M., Vecherkin M.V., Shpon'ko A.A. Diagnostics of gas blowers at OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" coke plant // Coke and Chemistry. 2011. Vol. 54, no. 12. P. 484–488. DOI: 10.3103/S1068364X11120052

References

1. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and variable drive in pump and blower installations]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2006. 360 p. (In Russ.)
2. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S. [Study of methods to regulate the productivity of the fan station of Sheet Rolling Mill No. 10 of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works"]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2006;(4):63–67. (In Russ.)
3. Vakhvakhov G.G. *Rabota ventilyatorov v seti* [Operation of the fans in the network]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1975. 101 p. (In Russ.)
4. Onishchenko G.B., Yun'kov M.G. *Elektroprivod turbomekhanizmov* [Turbomachinery electric drive]. Moscow: Energiya Publ.; 1972. 240 p. (In Russ.)
5. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarov A.V. A procedure of calculating the permissible number of soft starts for induction electric drives with a high moment of inertia. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2018;1:59–64. (In Russ.) DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.059-064
6. Vakhvakhov G.G. *Energoberezheniye i nadezhnost' ventilyatornykh ustanovok* [Energy saving and reliability of fan systems]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1989. 176 p. (In Russ.)
7. Glikman B.F. *Matematicheskiye modeli pnevmogidravlicheskiykh sistem* [Mathematical models of pneumohydraulic systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1986. 368 p. (In Russ.)
8. Abramov F.A., Frolov N.A. *Elektricheskoye modelirovaniye ventilyatsionnykh setey ugol'nykh shakht* [Electrical modeling of ventilation networks in coal mines]. Moscow: Ugletekhizdat Publ.; 1957. 135 p. (In Russ.)
9. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. *Tsentrobezhnyye ventilyatory. Aerodinamicheskiye skhemy i kharakteri-stiki: spravochnik* [Centrifugal fans. Aerodynamic diagrams and characteristics: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1980. 176 p. (In Russ.)
10. Svehko M.V., Pitolin V.E. [The spline approximation and graphic parameter interpolation method for complex power facilities in computing models]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*. 2007;(3):85–89. (In Russ.)
11. Himla J.W. *Optimized fan control in variable air volume HVAC systems using static pressure resets: strategy selection and savings analysis*. Texas A&M university; 2009. 70 p.
12. Krupnikov A.V., Vanyashov A.D., Yanvaryov I.A. Analysis of efficiency of air coolers on the basis of units with various number of fans. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2010;3(93):173–176. (In Russ.)
13. Kryachuk V.M., Vecherkin M.V., Shpon'ko A.A. Diagnostics of gas blowers at OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" coke plant. *Coke and Chemistry*. 2011;54(12):484–488. DOI: 10.3103/S1068364X11120052

Информация об авторах

Вечеркин Максим Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; vecherkin@inbox.ru.

Сарваров Анвар Сабулханович, д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; anvar@magtu.ru.

Романова Ирина Павловна, студент кафедры информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; romanova.irina.01@mail.ru.

Богачева Ирина Юрьевна, старший преподаватель кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; bogachevirina@yandex.ru.

Осколков Сергей Васильевич, старший преподаватель кафедры теплотехнических и энергетических систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; oskolkov.sv@mail.ru.

Information about the authors

Maxim V. Vecherkin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; vecherkin@inbox.ru.

Anvar S. Sarvarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; anvar@magtu.ru.

Irina P. Romanova, Student of the Department of Informatics and Information Security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; romanova.irina.01@mail.ru.

Irina Yu. Bogacheva, Senior Lecturer, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; bogachevirina@yandex.ru.

Sergey V. Oskolkov, Senior Lecturer of the Department of Heat Engineering and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; oskolkov.sv@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.07.2022; одобрена после рецензирования 20.08.2022; принята к публикации 10.09.2022.

The article was submitted 27.07.2022; approved after review 20.08.2022; accepted for publication 10.09.2022.