



УДК 622.4:62–5

*О.Б. Шонин, В.С. Пронько*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК ШАХТ  
НА ОСНОВЕ МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ**

*O.B. Shonin, V.S. Pronko*

**ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF MINE  
MAIN FAN INSTALLATIONS BY MEANS  
OF THE MULTIPURPOSE CONTROL SYSTEM FOR VFD**

На базе анализа ресурсов энергосбережения в энергоемкой системе проветривания шахт обоснована многоцелевая система автоматического управления частотно-регулируемым приводом вентилятора главного проветривания, обеспечивающая минимизацию потерь в различных сечениях энергетического потока. На основе моделей вентиляторов и сети дана оценка энергетического эффекта от использования частотного способа регулирования. Для осевых вентиляторов предложена методика выбора оптимальных параметров комбинированного управления, позволяющая получить максимально возможный КПД.

ШАХТНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ; ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД; КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯТОРОМ.

The paper analyzes energy saving potentials in a mine ventilation system of high power consumption in order to substantiate multipurpose control system for a main fan adjustable speed drive to minimize energy losses at different cross-sections of an energy flow. Modes of mine fans at minimum energy losses due to frequency control application have been derived on the basis of modeling of fan operational characteristics and variation of equivalent ventilation system resistance during the life time of a ventilator. An iterative search method for choosing the optimal parameters of complex axial fan control has been proposed to achieve maximum available efficiency at the specific mode of fan operation.

MINE VENTILATION; ENERGY SAVING; VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES; COMBINED FAN CONTROL.

Проветривание подземных выработок — одна из энергоемких операций горного производства. Затраты на вентиляцию могут достигать до 50 % общей энергии, потребляемой горным предприятием, а доля этих затрат в себестоимости продукции — до 30 %. Годовая плата за электроэнергию на проветривание может составлять до 40 % стоимости главной вентиляционной установки (ГВУ). Одна из причин высоких затрат на проветривание — принятая практика работы ГВУ с постоянной производительностью без учета реальной потребности шахты в свежем воздухе. Другая причина — низкий эксплуатационный КПД вентиляторов главного проветривания

(ВГП), значение которого 30–40 % находится вне области промышленного использования [1, 2].

При существующих тенденциях роста цен на электроэнергию и увеличения глубины залегания разрабатываемых месторождений низкая энергетическая эффективность системы вентиляции шахт становится одним из основных факторов, влияющих на экономические показатели горного предприятия. Поэтому выявление возможностей по снижению затрат на проветривание и разработка соответствующих мер и средств — важная и актуальная задача по повышению рентабельности производства и конкурентоспособности предприятия. Оче-

видно, что меры по энергосбережению не должны противоречить регламентирующим документам [3].

Цель нашей работы — анализ ресурсов энергосбережения в системе шахтной вентиляции, разработка многоцелевой системы автоматического управления ВГП, обеспечивающей минимизацию потерь в различных сечениях энергетического потока, и рекомендаций по поддержанию оптимальных режимов ВГП на протяжении срока эксплуатации вентиляторов.

### Многоцелевая система автоматического управления ВГП

Повышение энергетической эффективности ГВУ прежде всего связано с реализацией схемы вентиляции в соответствии с реальными потребностями шахты в проветривании, которая бы исключала излишнее поступление воздуха в шахту [4]. Реализация такого подхода возможна на основе эффективной входящей в состав шахтной системы управления процессом добычи полезных ископаемых системы автоматического управления ГВУ, которая обеспечивает:

динамику проветривания в соответствии с потребностью шахты в свежем воздухе в за-

висимости от числа рабочих в шахте, особенностей ведения взрывных работ, длительности работы дизельного оборудования, проведения ремонтных работ, возникновения аварийных ситуаций и т.д.;

компенсацию возмущений, вносимых колебаниями температуры воздуха на поверхности, случайными изменениями, связанными с движением внутришахтного транспорта, открытием/закрытием дверей и перемычек;

эффективный режим проветривания в соответствии с изменением эквивалентного сопротивления вентиляционной сети шахты в процессе освоения разрабатываемого месторождения.

Другая составляющая повышения эффективности ГВУ связана с выявлением ресурсов энергосбережения и разработкой мер по минимизации потерь во всех элементах системы передачи и преобразования энергии «распределительная сеть — преобразователи частоты — двигатель — вентилятор — вентиляционная сеть» [5, 6]. Для решения этой задачи рассматривается система многоцелевого управления частотно-регулируемым приводом ВГП, показанная на рис. 1.

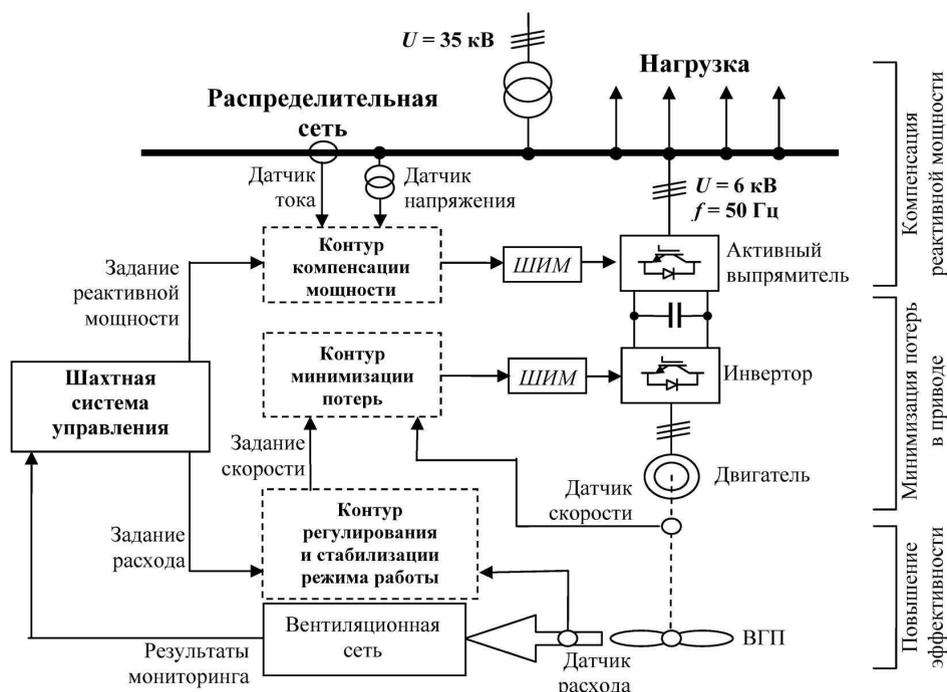


Рис. 1. Структура многоконтурной системы управления частотно-регулируемым вентилятором главного проветривания

Привод центробежного или осевого вентилятора осуществляется высоковольтным асинхронным двигателем, который питается от многоуровневых преобразователей частоты. Входной преобразователь выполнен по топологии активного выпрямителя и подключен непосредственно к сети 6 кВ без согласующего трансформатора. В пределах пропускной способности установки активный выпрямитель используется для коррекции показателей качества энергии сети в соответствии с сигналами контура компенсации возмущений в сети. Активный выпрямитель может выполнять функции компенсатора реактивной мощности, активного фильтра для подавления высших гармоник, компенсатора асимметрии и провалов напряжения [7]. Режим проветривания задается шахтной системой управления в соответствии с текущим состоянием технологического процесса. Режим реализуется системой скалярного частотного управления приводом, в которой используются энергосберегающие алгоритмы, обеспечивающие минимизацию потерь энергии в преобразователе частоты и двигателе.

Наиболее значимый энергосберегающий эффект дает минимизация потерь в ВГП за счет учета в системе управления многих факторов, влияющих на эксплуатационный КПД и его изменение в течение срока службы вентилятора [8]. К таким факторам относятся: тип вентилятора, максимальная производительность, координаты точки с наибольшим КПД, способ регулирования производительности вентилятора, траектория движения рабочей точки в системе координат «давление — производительность» в пределах срока службы вентилятора. Ниже дан сравнительный анализ энергетической эффективности способов управления центробежными вентиляторами серии ВЦД и осевыми вентиляторами серии ВОД.

#### Аэродинамический и частотный способы управления режимом вентилятора

Характеристики центробежных вентиляторов представляют собой зависимости давления  $H$  и мощности  $P_s$  на валу от производительности  $Q$  при различных положениях лопаток рабочего колеса или различных углах наклона лопаток направляющего аппарата  $\alpha$ . Для аналитических расчетов использовались полиномиальные аппроксимации экспериментальных данных

$$H(Q) = a_0 Q^2 + a_1 Q + a_2; \quad P_s(Q) = b_0 Q^2 + b_1 Q + b_2; \\ \eta(Q) = H \cdot Q / P_s. \quad (1)$$

Коэффициенты полиномов принимают разные значения в зависимости от угла  $\alpha$  наклона лопаток, который изменяется в диапазоне  $0; 10; \dots 70^\circ$ . Полученные характеристики соответствуют номинальной скорости вращения вала вентилятора.

Для получения характеристик частотного способа управления вентилятором воспользуемся формулами подобия [9]

$$Q = Q_0 \bar{\omega}; \quad H = H_0 \bar{\omega}^2; \quad P = P_0 \bar{\omega}^3, \quad (2),$$

где  $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$ ,  $P_0$ ,  $H_0$ ,  $Q_0$  — параметры режима при номинальной скорости вращения  $\omega_0$ .

При заданном значении угла  $\alpha$  имеем

$$H(Q, \bar{\omega}) = a_0 Q^2 + a_1 Q \bar{\omega} + a_2 \bar{\omega}^2; \\ P_s(Q, \bar{\omega}) = b_0 Q^2 \bar{\omega} + b_1 Q \bar{\omega}^2 + b_2 \bar{\omega}^3. \quad (3)$$

Для центробежного вентилятора ВЦД-32М с координатами номинального режима  $\alpha = 0^\circ$ ,  $H_0 = 4200$  Па,  $Q_0 = 200$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{s0} = 1,2$  МВт,  $\eta_0 = 84\%$  коэффициенты полиномов принимают значения  $a_0 = -0,08$ ,  $a_1 = 13,3$ ,  $a_2 = 4920$  и  $b_0 = -9,42 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_1 = 4,64$ ,  $b_2 = 487,5$ .

Характеристики вентилятора, построенные по формулам (1) при постоянной частоте вращения и различных углах наклона лопаток, показаны на рис. 2. Характеристики вентилятора при частотном регулировании производительности в соответствии с формулой (3) представлены на рис. 3.

Из графика зависимости КПД вентилятора от производительности (рис. 2, в) видно, что при аэродинамическом способе регулирования режима проветривания увеличение угла наклона приводит к падению КПД за счет роста аэродинамических потерь. При частотном способе регулирования (рис. 3, в) максимальное значение КПД вентилятора (84%) остается неизменным во всем диапазоне регулирования.

При известном аэродинамическом сопротивлении  $R$  вентиляционной сети режим работы вентилятора определяется точкой пересечения характеристики вентилятора с характеристикой сети. Угол наклона лопаток, обеспечивающий требуемый режим проветривания, находится из уравнения

$$a_0(\alpha)Q^2 + a_1(\alpha)Q + a_2(\alpha) = RQ^2, \\ \omega = \omega_0 = \text{const}. \quad (4)$$

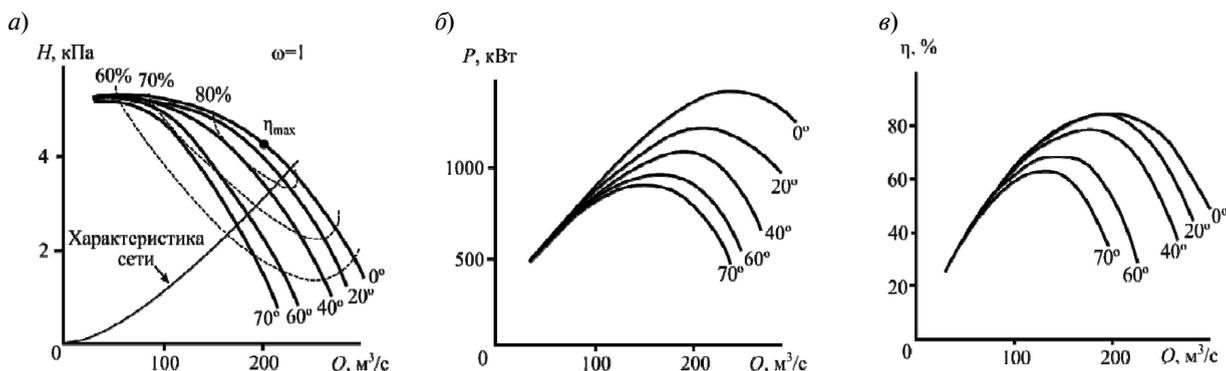


Рис. 2. Характеристики центробежного вентилятора ВЦД-32М при аэродинамическом способе регулирования: давление (а), мощность на валу (б) и КПД вентилятора (в)

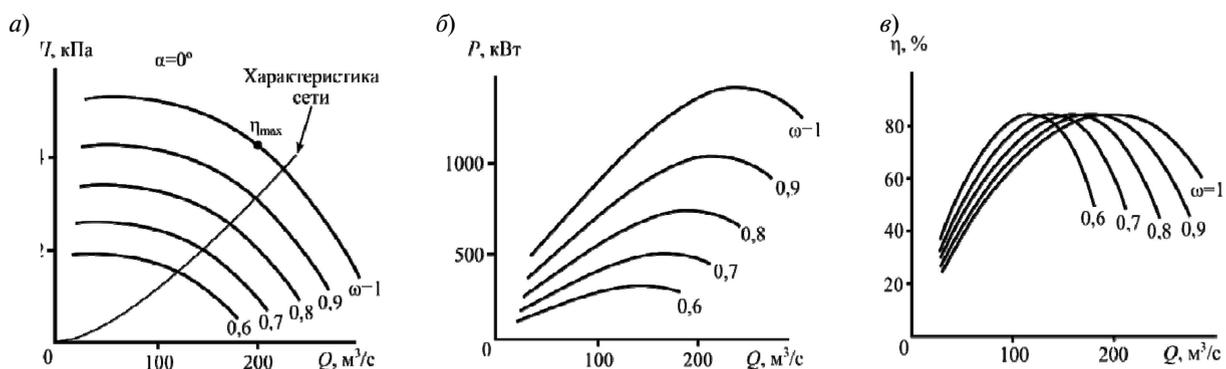


Рис. 3. Характеристики центробежного вентилятора ВЦД-32М при частотном способе регулирования: давление (а), мощность на валу (б) и КПД вентилятора (в)

Как правило, при аэродинамическом регулировании вентилятор из-за конструктивных особенностей имеет несколько фиксированных положений лопаток без возможности плавного регулирования. В таком случае не всегда возможно точно установить необходимый режим проветривания, и вентилятору приходится работать с завышенной производительностью.

При частотном регулировании требуемая скорость определяется из уравнения

$$a_0 Q^2 + a_1 Q \omega + a_2 \omega^2 = R Q^2, \quad \alpha = \text{const.} \quad (5)$$

Изменение режима проветривания при механическом способе управления достигается перемещением рабочей точки вдоль характеристики сети за счет варьирования угла наклона лопаток (см. рис. 2, а). При частотном способе управления перемещение рабочей точки осуществляется за счет изменения частоты вращения (см. рис. 3, а). В первом случае регулирование сопровождается изменением

КПД вентилятора, во втором случае КПД в соответствии с формулами подобия (2) остается постоянной величиной.

Если стоит задача поддержания требуемого значения потока  $Q_a$  при изменении сопротивления сети  $R = R_a \pm \Delta R$ , то стабилизация режима может быть осуществлена путем коррекции частоты вращения в пределах  $\omega = \omega_a \pm \Delta\omega$ , как показано на рис. 4. Приращение частоты  $\Delta\omega$  находится из уравнения

$$a_2 \Delta\omega^2 + \Delta\omega (2\omega_a a_2 + a_1 Q_a) - \Delta R Q_a^2 = 0. \quad (6)$$

Стабилизация потока осуществляется системой управления приводом (см. рис. 1) по сигналу ПИ-регулятора, вырабатывающего сигнал управления при появлении ошибки  $\Delta Q = Q - Q_a$  между действительным  $Q$  и требуемым  $Q_a$  значениями производительности.

Произведем сравнительную оценку эффективности методов управления на примере 10-летнего цикла работы вентилятора на одной

из шахт объединения «Воркутауголь». В течение срока службы ГВУ происходит значительное увеличение числа и глубины горных выработок, что приводит к росту требуемой производительности вентилятора. Вентилятор выбирается так, чтобы в конце срока службы он вышел на номинальную производительность. В связи с этим большую часть времени ГВУ работает с неполной нагрузкой.

Годовые рабочие точки получим, усреднив требуемый режим работы вентилятора за год. Движение таких точек для рассматриваемого примера показано на рис. 5. Из рисунка видно, что максимальная эффективность ГВУ достигается в том случае, когда траектория движения рабочих точек за время срока службы вентилятора совпадает с линией максимального КПД. На практике такие случаи встречаются редко и возможны, как правило, при проектировании специального вентилятора.

На рис. 6, а приведены результаты расчета мощности  $P_s$  на валу вентилятора ВЦД-32М при аэродинамическом (кривая 1) и частотном (кривая 2) способе управления. Расчет выполнен для случая, когда режим проветривания в конце срока службы соответствует рабочей точке вентилятора с максимальным значением КПД.

Выбор двигателя для привода осуществляется исходя из максимальной расчетной мощности на валу  $P_s = 1025$  кВт с коэффициентом запаса  $K_p = 1,1$ . В случае аэродинамического способа регулирования принят синхронный двигатель, позволяющий обеспечивать коэффициент мощности  $\chi = \cos \phi = 1$ . При использовании частотного регулирования использован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, обладающий конструктивной простотой и большей надежностью. Из-за высокого уровня напряжения 6 кВ преобразователь частоты выполнен по многоуровневой структуре [10]. Основным недостатком асинхронного привода — низкий коэффициент мощности — устраняется за счет использования активного выпрямителя.

Энергосберегающий эффект от применения частотного способа рассчитывался с учетом зависимости КПД привода от режима работы. В выбранном синхронном электроприводе СДВ 15–64–10 1250 кВт при изменении нагрузки в диапазоне регулирования КПД практически не

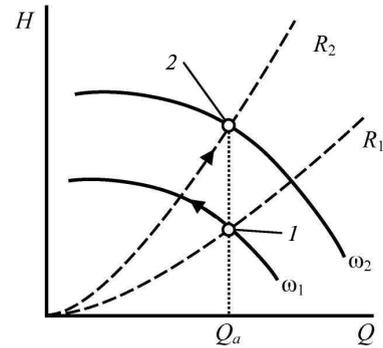


Рис. 4. Стабилизация потока при флуктуациях сопротивления сети

изменяется и остается равным номинальному значению 95 %.

В асинхронном электроприводе НХР 560LU10 1230 кВт фирмы АВВ с уменьшением частоты вращения до  $0,6\omega_0$  происходит падение КПД с 97 до 87 % [11]. На рис. 6, б показано изменение общего КПД ВГП  $\eta$ , равного произведению КПД двигателя и КПД вентилятора. Энергосберегающий эффект за весь срок службы составляет

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) dt \approx 13,5 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\Delta P = P_a(1/\eta_1 - 1/\eta_2); P_a = HQ.$$

Здесь индекс 1 относится к аэродинамическому способу управления, индекс 2 — к регулированию производительности изменением скорости вращения вала вентилятора.

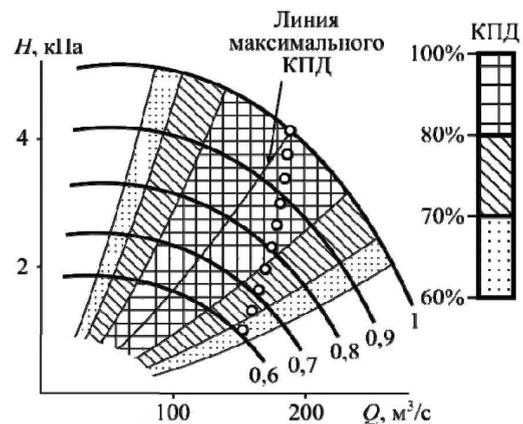


Рис.5. КПД вентилятора ВЦД-32М при частотном управлении и изменение рабочих точек проветривания за время эксплуатации вентилятора

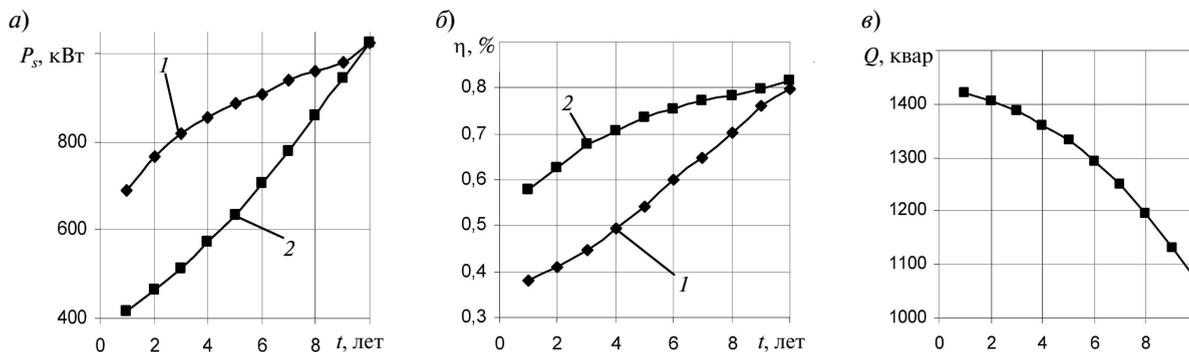


Рис. 6. Изменение мощности вентилятора (а), КПД ГВУ (б) и ресурса реактивной мощности, генерируемой активным выпрямителем, (в) при механическом (1) и частотном управлении (2)

Из закона подобия (2) следует, что при диапазоне регулирования скорости 0,6–1 привод вентиляционной установки загружен на начальном этапе эксплуатации незначительно, до уровня 25 % от номинальной мощности. Для полного использования установленной мощности входной преобразователь целесообразно применять не только для питания привода, но и для коррекции показателей качества напряжения питающей сети, в частности для компенсации реактивной мощности других потребителей. С этой целью в качестве входного преобразователя привода следует использовать активный выпрямитель. Ресурс реактивной мощности  $Q_{VAR}(t) = \sqrt{S^2 - P(t)^2}$ , которую способен генерировать активный выпрямитель при расчетной полной мощности электропривода  $S = 1,5$  МВА, показан на рис. 6, в. Реализация высоковольтных преобразователей на основе многоуровневой структуры позволяет отказаться от согласующе-

го трансформатора и обеспечить тем самым дополнительный экономический эффект.

### Комбинированный способ регулирования

Для центробежных вентиляторов точка с максимальным значением КПД находится на кривой  $H(Q)$ , соответствующей начальному значению угла направляющего аппарата  $\alpha_m = 0^\circ$  при изменении угла в пределах 0; 10; ... 70° (см. рис. 2, а). Для осевых вентиляторов эта точка лежит на характеристике  $H(Q)$ , соответствующей среднему значению угла наклона лопаток рабочего колеса ( $\alpha_m = 50^\circ$ ) при изменении этого параметра в пределах 30; 35; ... 65°.

Указанная особенность характеристик осевых вентиляторов показывает, что для получения максимального значения КПД целесообразно использовать комбинированный способ управления, при котором оптимальный режим достигается при определенном сочетании регулируемых параметров  $\alpha$  и  $\omega$ .

Сравнение частотного и комбинированного методов управления режимом проветривания производилось на примере осевого вентилятора ВО-22 со следующими координатами точки максимального КПД:  $\eta_0 = 88\%$ ,  $H_0 = 2500$  Па,  $Q_0 = 100$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{s0} = 800$  кВт. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов (1), (3) при угле  $\alpha = 50^\circ$  принимают значения:  $a_0 = -0,066$ ,  $a_1 = 12,124$ ,  $a_2 = -263,6$  и  $b_0 = -0,055$ ,  $b_1 = 12,04$ ,  $b_2 = -279,3$ . Характеристики осевого вентилятора ВО-22  $H(Q)$  для значений угла  $\alpha = 30; 35; \dots 65^\circ$  представлены на рис. 7. На том же рисунке показаны зоны постоянного КПД при частотном способе регулирования и положение годовых рабочих точек за 10-летний цикл работы.

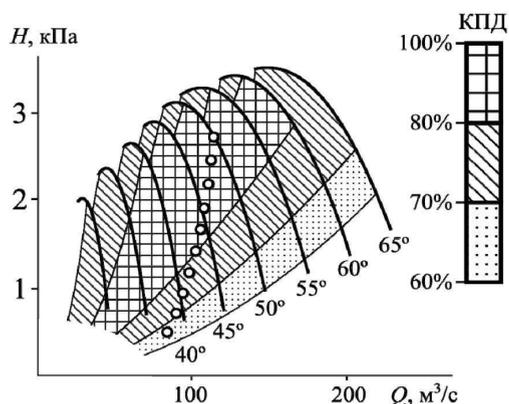


Рис. 7. КПД осевого вентилятора ВО-22 с указанием рабочих точек за 10-летний цикл работы

Поиск комбинаций параметров регулирования  $\alpha$ ,  $\omega$ , обеспечивающих максимальный КПД для каждой рабочей точки, осуществлялся автоматически с помощью программы, алгоритм которой приведен на рис. 8.

В качестве исходных данных расчета использовалась совокупность характеристик вентилятора  $\{H_j(Q); P_j(Q)\}$ , полученных при различных углах  $\alpha_j$  наклона лопаток, и траектория движения рабочих точек  $\{H_i; Q_i\}$ , каждая из которых соответствовала  $i$ -му году срока службы вентилятора. Для каждой точки  $H_i, Q_i$  вычислялось аэродинамическое сопротивление  $R_i = H_i / Q_i^2$ . Для каждой характеристики  $H_j(Q)$ , соответствующей углу  $\alpha_j$ , из уравнения (5) определялась частота  $\omega_{ij}$ . Затем вычислялась мощность на валу  $P_{ij}$  и КПД  $\eta_{ij}$ . Из полученного массива данных  $\{\eta_{ij}\}$  программа выбирает максимальное значение и соответствующие этому значению параметры регулирования. Результаты расчета при частотном и комбинированном способах управления вентилятором ВО-22 для обеспечения годовых рабочих точек проветривания, показанных на рис. 7, представлены в таблице.

Как видно из таблицы, использование комбинированного способа управления позволяет увеличить КПД вентилятора до 9 % по сравнению с частотным методом. Наибольшее приращение КПД имеет место на начальном этапе проветривания, когда вентилятор в значительной степени не догружен по мощности.

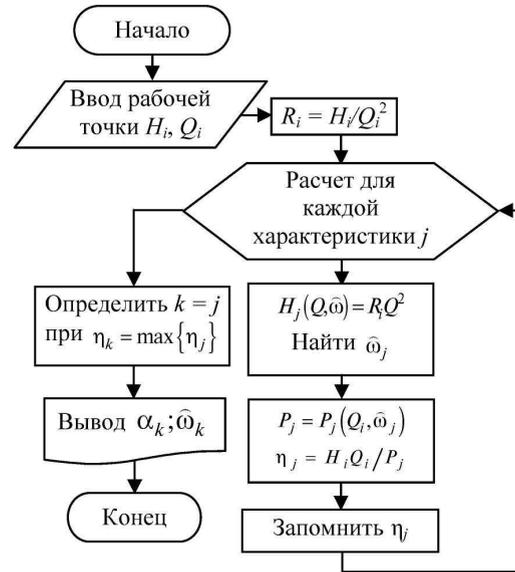


Рис. 8. Алгоритм расчета параметров режима работы ВГП из условия обеспечения максимального КПД в заданной рабочей точке

Иллюстрация поиска комбинаций угла наклона и скорости вращения для рабочей точки 5 из таблицы дана на рис. 9.

В верхней правой части рисунка показаны характеристики при номинальной скорости вращения  $\bar{\omega} = 1$ , в левой нижней части — рабочая точка и характеристики вентилятора при скорости  $\bar{\omega} < 1$ . Жирными линиями выделены характеристики, которые смещаются в область рабочей точки в результате изменения частоты. В первом случае (рис. 9, а) рабочая точка при

### Сравнение частотного и комбинированного методов

| Рабочая точка | При частотном регулировании, $\alpha = 50^\circ$ |                | При комбинированном регулировании |                |                | Приращение КПД $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$ |
|---------------|--|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|---|
|               | $\eta_1, \%$                                     | Скорость, о.е. | $\eta_2, \%$                      | Угол, $\alpha$ | Скорость, о.е. |   |
| 1             | 57,6   | 0,64           | 66,8                              | 65             | 0,44           | +9,2  |
| 2             | 62,9   | 0,69           | 71,0                              | 65             | 0,48           | +8,1  |
| 3             | 67,4   | 0,73           | 74,2                              | 65             | 0,52           | +6,8  |
| 4             | 72,5   | 0,76           | 77,3                              | 65             | 0,55           | +4,8  |
| 5             | 77,1   | 0,80           | 80,1                              | 60             | 0,64           | +3,0  |
| 6             | 80,1   | 0,84           | 82,0                              | 55             | 0,74           | +1,9  |
| 7             | 83,3   | 0,88           | 84,2                              | 55             | 0,79           | +0,9  |
| 8             | 84,8   | 0,91           | 85,0                              | 55             | 0,82           | +0,2  |
| 9             | 86,0   | 0,94           | 86,0                              | 50             | 0,94           | 0   |
| 10            | 86,6   | 0,97           | 86,6                              | 50             | 0,97           | 0   |

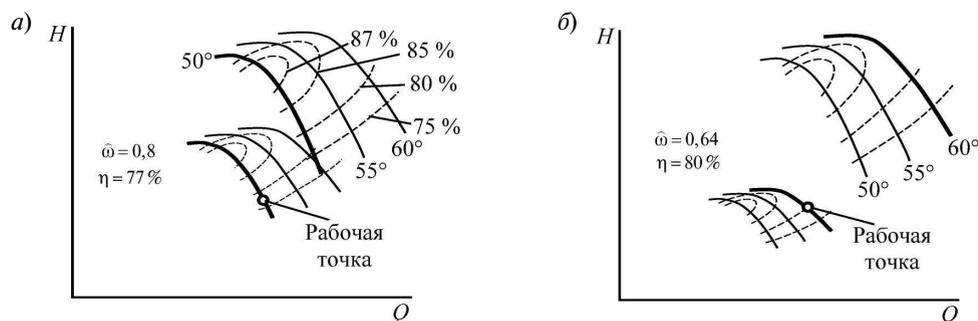


Рис. 9. Поиск максимального значения КПД путем изменения угла  $\alpha$  наклона лопаток и скорости вращения  $\omega$

КПД 77 % задается углом  $\alpha = 50^\circ$  и скоростью  $\bar{\omega} = 0,8$ . Если изменить параметры регулирования до значений  $\alpha = 60^\circ$  и  $\bar{\omega} = 0,64$ , то при том же режиме проветривания КПД вентилятора повысится до значения 80 % (рис. 9, б).

Аналогичный подход к выбору комбинации угла наклона лопаток и скорости вращения имеет место и при оперативном управлении ВГП согласно программе проветривания, учитывающей реальную потребность шахты в воздухе в зависимости от особенностей ведения горных работ в соответствии с той или иной стадией горно-технологического цикла.

Повышение энергетической эффективности главных вентиляционных установок шахт связано с применением многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом, обеспечивающей, с одной стороны, режим рационального проветривания шахт в соответствии

с реальными потребностями в свежем воздухе и, с другой, — минимизацию потерь энергии в вентиляторе и приводе. В результате сравнительного анализа эффективности методов управления вентиляторными главного проветривания установлено, что наибольший энергетический эффект от применения частотного метода управления производительностью вентилятора достигается при совпадении траектории движения годовых рабочих точек проветривания с линией максимального КПД, по которой перемещается рабочая точка при частотном методе управления. На основе разработанной методики выбора оптимальных параметров для комбинированного метода управления осевыми вентиляторными показано, что увеличение КПД вентилятора за счет перехода от частотного метода управления к комбинированному методу может достигать 9 % и более в зависимости от траектории движения рабочих точек в течение срока эксплуатации вентилятора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н.Н., Попов Н.А., Зедгенизов Д.В., Михайлов А.И., Заболотских В.В. Пути модернизации устаревшего парка главных вентиляторов шахт // Безопасность труда в промышленности. 2000. № 11. С. 36–39.
2. Петров Н.Н., Попов Н.А. Пути повышения экономичности и надежности проветривания рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 5. С. 131–137.
3. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: ПБ 06–111–95. — М: Госгортехнадзор, 1995. 192 с.
4. Bartsch E., Laine M., Andersen M. The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on

- Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario // Proceedings of 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 2010.
5. Пронько В.С., Шонин О.Б. Энергосбережение в стационарных установках горных предприятий на основе экстремального управления частотно-регулируемым приводом // Труды I международной научно-практической конференции «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», Йошкар-Ола, 2013, С. 87–89
6. Shonin O.B., Pronko V.S. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive // ANNUAL of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski». 2013. Vol. 56, Part III. P. 163–169.

7. **Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley, 2000. 452 p.

8. **Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И.** Аэрология горных предприятий. М.: Недра, 1987. 421 с.

9. **Калинушкин М.П.** Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1962. 294 с.

10. **Шонин О.Б.** Наблюдатель напряжений на плавающих конденсаторах в схеме стабилизации сбалансированного режима четырехуровневого инвертора для высоковольтного электропривода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №1(166). С. 106–112.

11. Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads / USA. Irrigation Training & Research Center. 2006. 65 pp.

## REFERENCES

1. **Petrov N.N., Popov N.A., Zedgenizov D.V., Mikhaylov A.I., Zabolotskikh V.V.** Puti modernizatsii ustarevshego parka glavnykh ventilatorov shakht. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2000. № 11. S. 36–39. (rus.)

2. **Petrov N.N., Popov N.A.** Puti povysheniya ekonomichnosti i nadezhnosti provetrvaniya rudnikov. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2004. № 5. S. 131–137. (rus.)

3. Yedinyye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh podzemnym sposobom: PB 06-111-95. M.: Gosortekhnadkhor, 1995. 192 s.

4. Bartsch E., Laine M., Andersen M. The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario. *Proceedings of 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium*, 2010.

5. **Pronko V.S., Shonin O.B.** Energoberezheniye v statsionarnykh ustanovkakh gornykh predpriyatiy na osnove ekstremalnogo upravleniya chastotno-reguliruyemyim privodom. *Trudy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tehnicheskkiye nauki: sovremennyye problemy*

*i perspektivy razvitiya»*. Yoshkar-Ola, 2013. S. 87–89. (rus.)

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

7. **Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley, 2000. 452 pp.

8. **Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I.** Aerologiya gornykh predpriyatiy. M.: Nedra, 1987. 421 s. (rus.)

9. **Kalinushkin M.P.** Ventilyatornyye ustanovki. M.: Vysshaya shkola, 1962. 294 s. (rus.)

10. **Shonin O.B.** Nablyudatel napryazheniy na plavayushchikh kondensatorakh v skheme stabilizatsii sbalansirovannogo rezhima chetyrehurovneвого инвертора для высоковольтного электропривода. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. №1(166). S. 106–112. (rus.)

11. Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads / USA. Irrigation Training & Research Center. 2006. 65 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШОНИН Олег Борисович** — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета "Горный"; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2; E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru

**ПРОНЬКО Владимир Сергеевич** — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета "Горный". 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2. E-mail: pronko.vr@gmail.com

## AUTHORS

**SHONIN, Oleg B.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru

**PRONKO, Vladimir S.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: pronko.vr@gmail.com