

к.т.н., доц. Фесенко Н.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина).

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ШАХТНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЭНЕРГОЗАТРАТ

Виконано обґрунтування енергозберігаючих режимів експлуатації головних вентиляторних установок. Запропоновано залежності для оцінки рівня енергетичної ефективності установок і режимів завантаження синхронних двигунів.

Проблема и ее связь с научными и задачами. Одним из основных направлений энергосбережения на подземных горных предприятиях является обеспечение наиболее рациональных режимов эксплуатации крупного энергоемкого горношахтного оборудования, к которому относятся стационарные рудничные турбоустановки (вентиляторные, водоотливные и турбокомпрессорные). Установленная мощность приводов рудничных турбоустановок достигает 3,5 - 4,0 тыс. кВт при практически непрерывной их работе в течение суток и года. Отсюда очевидна экономическая целесообразность мероприятий, направленных на улучшение, с точки зрения снижения энергопотребления при условии выполнения технологических требований, режимов эксплуатации данных установок.

Анализ исследований и публикаций. Анализ результатов патентно-информационного поиска (М.Кл.З F04), выполненного в СССР (РФ), Украине, Англии, Франции, Германии, США и Японии за последние 30 лет, и обзор литературных источников по конструкциям вентиляторов позволил установить, что возникает недооценка роли внешних сетей турбоустановок как катализаторов гидравлической энергии. Следствием этого во многих случаях является повышение уровня энергопотребления турбоустановок, так как чем больше сопротивление сети, тем больше значения мощности на зажимах сетевого двигателя привода установок (для большинства режимов работы, расположенных правее номинального значения подачи турбомашины).

Постановка задачи. Оптимизация параметров шахтных вентиляторных установок главного проветривания является актуальной целью направленной на повышение эффективности, безопасности и надежности проветривания метанообильных шахт Донбасса. Для ее успешного

решения необходимо использовать комплексный подход, включающий оптимизацию механических, аэродинамических, энергетических параметров вентиляторных установок главного проветривания.

Изложение материала и его результаты. Одним из направлений развития современного вентиляторостроения является ориентация на вентиляторы смешанного принципа действия (ВСПД), сочетающие в себе свойства каких-либо двух традиционных типов машин. Об этом свидетельствует как патентная активность, так и постоянное расширение объемов промышленного производства вентиляторов данного типа, обычно использующих сочетание известных принципов действия (осевого и центробежного, центробежного и диаметрального и др.). Таким образом, достигается более эффективное использование проточной части машин. Следствием этого является повышение аэродинамических параметров, улучшение энергетических и шумовых характеристик без увеличения массогабаритных показателей и частот вращения рабочих колес, что представляет существенный интерес с точки зрения снижения энергетических затрат как на местное, так и на общешахтное проветривание. На установках главного проветривания экономический эффект при использовании вентиляторов смешанного принципа действия помимо снижения энергетических затрат может быть получен также за счет снижения материалоемкости машин, занимаемой ими площади, капитальных затрат на строительство установок и реализации реверсирования радиальных машин наиболее простым способом - обратным вращением привода вентиляторного агрегата, на установках местного проветривания - за счет меньшего количества последовательно установленных вентиляторов, меньшего объема сооружаемых вентиляционных камер и др.

Оценка энергетической эффективности главной вентиляторной установки (ГВУ) в соответствии с принятым подходом [3] осуществляется по величине средневзвешенного статического коэффициента полезного действия вентилятора главного проветривания (КПД ВГП) в нормальной области его работы. Однако, как следует из анализа заводских экспериментальных аэродинамических характеристик ВГП [2], режимам работы вентиляторов с максимальным значением статического КПД соответствует максимальное энергопотребление установки в целом (максимальное значение мощности на зажимах сетевого двигателя электропривода). Объясняется это тем, что определение уровня энергетической эффективности ГВУ по величине статического КПД ВГП представляет собой попытку оценить всю установку только по турбомашине (вентилятору) при полном игнорировании потерь энергии в сети.

При этом следует отметить специфику ГВУ, в которых, в отличие от других рудничных турбоустановок, только незначительная часть энергии полезно расходуется на перемещение воздуха по сети (на проветривание объектов горных работ), а остальная часть теряется, в основном, в вентиляционной сети. В среднем 50 - 60 % от всей энергии, потребляемой ГВУ из электрической сети, приходится на долю сетей, что свидетельствует о их весьма высокой роли в общей энергетике ГВУ.

Конечной целью ГВУ является обеспечение объектов горных работ достаточным количеством воздуха при наименьшем уровне энергопотребления, т. е. При мощности потребляемой из сети и удельном расходе электроэнергии $N_c ; q_c = \min$; и КПД вентиляторной установки соответственно $\eta_v = \max$.

Рассмотрим зависимости, приведенные на рисунке 1. Зависимость $\eta_{bc}=f(Q)$ представляет собой кривую, выходящую из начала координат [5]. На начальном участке (примерно до номинального значения подачи вентилятора Q_H) она медленно возрастает, а затем, по мере более значительного снижения полной депрессии сети (статического давления вентилятора), возрастание этой зависимости становится все более крутым, и своего максимального значения $\eta_{bc} = 1$ достигает в теоретическом (идеальном) режиме работы установки (точка О), в которой полная депрессия (см. рисунок 1) показывает, что параметры и характер зависимости $\eta_v=f(Q)$, в основном, определяется характером зависимости $\eta_{bc} = f(Q)$

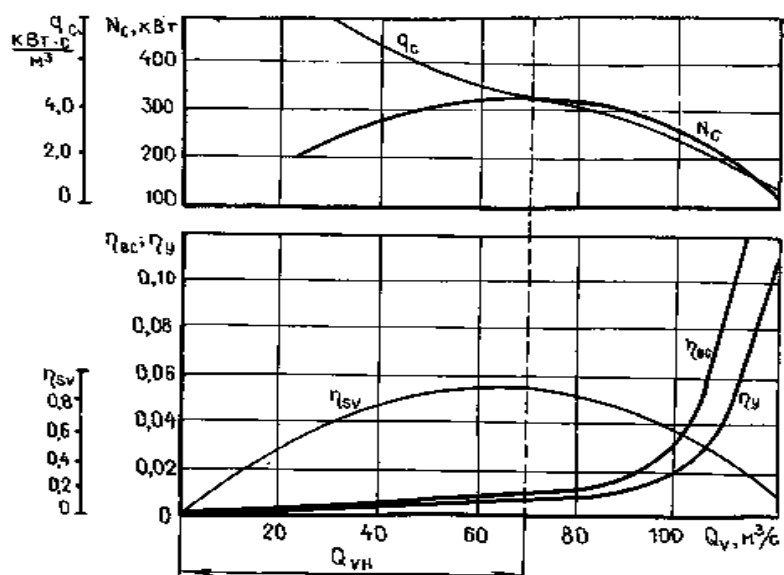


Рисунок 1 – Энергетические зависимости главных вентиляторных установок

(особенно на режимах правее Q_H), так как темпы снижения η_{sv} на ниспадающем участке кривой КПД вентилятора $q_c=f(Q)$ для современных, существенно ниже темпов возрастания η_{bc} на этом участке. Максимальное значение η_y достигается в теоретическом режиме работы вентиляторной установки при минимальном значении η_{sv} .

Анализ зависимостей шахтных ВГП [3], снижаясь в области низких давлений вентиляторов, соответствующих легкопроветриваемым вентиляционным сетям, достигают своих минимальных значений в теоретическом режиме работы ГВУ. Следовательно, соответствующий идеальной вентиляционной сети теоретический режим работы ГВУ является наивыгоднейшим с точки зрения минимизации энергопотребления и экономичности эксплуатации установок.

Сравнение режимов (рисунок 1) наглядно показывает, что любое снижение депрессии сети автоматически уменьшает энергопотребление и повышает экономичность эксплуатации ГВУ.

Отсюда и вытекают направления дальнейшего снижения энергопотребления вентиляторными установками главного и вспомогательного проветривания, основополагающим из которых должна являться разработка и реализация комплекса мероприятий по снижению общего аэродинамического сопротивления шахтных вентиляционных сетей. Этот комплекс должен включать широкий спектр задач: обоснование наиболее рациональных схем вскрытия, систем отработки месторождений, принципов проектирования вентиляционных систем; увеличение сечений горных выработок и облицовка их материалами, имеющими малые коэффициенты трения, проведение параллельных выработок, применение обтекаемых элементов крепи выработок и армировки стволов и т. д.

Определенные резервы есть также и у ВГП, например, повышение их статического КПД на режимах, отличных от номинального, достигаемое применением новых вентиляторов смешанного действия [2].

Следовательно, проблема разработки и оптимизации управления шахтными вентиляторами смешанного принципа действия и создаваемых на их основе вентиляторных установок является одной из актуальных и необходимых с целью снижения энергопотребления на проветривание.

Анализ результатов патентно-информационного поиска и обзор литературных источников по конструкциям вентиляторов показал следующую классификацию ВСПД.

1. В зависимости от того, какой принцип действия является в машине преобладающим, все ВСПД подразделяются на радиально-осевые, осерадиальные и радиально-диаметральные приведенные на рисунке 2.

При этом в вентиляторе могут быть выделены основной ($Q_{осн}$) и дополнительный ($Q_{доп}$) потоки, связанные между собой отношением $Q = Q_{осн} + Q_{доп}$.

2. Радиально-осевые вентиляторы подразделяются на машины с последовательным или параллельным, совместным или раздельным протеканием основного и дополнительного потоков; с совместным или раздельным отводом потоков от вентилятора, одноступенчатые или многоступенчатые с первым рабочим колесом центробежного типа.

3. Осерадиальные вентиляторы подразделяются на машины с раздельным или совместным протеканием потоков; с использованием внутренних полостей лопаток или втулочного пространства (или того и другого); реверсивные или нереверсивные; одноступенчатые или многоступенчатые с первым рабочим колесом осевого типа.

4. Радиально-диаметральные вентиляторы подразделяются на машины одностороннего или двухстороннего всасывания; реверсивные или нереверсивные.

Разработка и оптимизация машин принципиально нового класса, к каким относятся ВСПД, не может быть эффективной без соответствующей теоретической базы. Под этим в нашем случае подразумевается формулирование принципов оптимизации, установление основных зависимостей и оптимальных соотношений параметров. К числу таких параметров относится, в первую очередь, соотношение основного и дополнительного потоков, создаваемых в машине.

Целевой функцией может быть принято удельное энергопотребление (удельная входная мощность) или статический КПД вентилятора.

Рассмотрим некоторые аспекты реализации этого на примере осерадиального вентилятора с раздельными и параллельно протекающими потоками и с раздельным отводом их от машины (см.рис.2б). Такие вентиляторы предназначены в первую очередь для вытяжных (всасывающих) вентиляционных систем, в которых характер отвода воздуха от машин не играет существенной роли.

Очевидно, что для любого режима работы и для любого соотношения конструктивных параметров общая подача вентилятора $Q_V = Q_{осн} + Q_{доп}$. Взяв за основу осевую проточную часть машины и создаваемый ею основной (осевой) поток $Q_{осн}$, делаем вывод, что приращение общей подачи вентилятора возможно только за счет увеличения $Q_{доп}$. Однако рост $Q_{доп}$ неразрывно связан с соответствующим увеличением входной мощности вентилятора N_V .

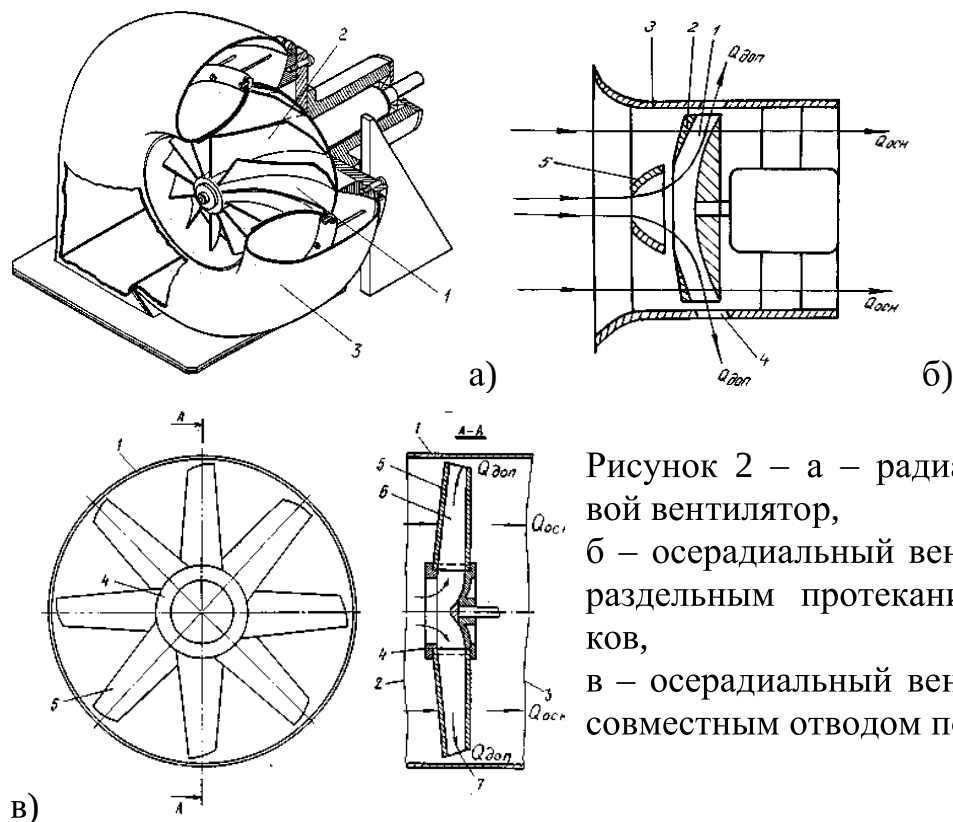


Рисунок 2 – а – радиально-осевой вентилятор,
б – осерадиальный вентилятор с
раздельным протеканием потоков,
в – осерадиальный вентилятор с
совместным отводом потоков

При этом оптимальным соотношением дополнительного и основного потоков, очевидно, будет такое, при котором отношение темпов прироста подачи Q_V и мощности N_V будет иметь свое максимальное значение, т.е.

$$\frac{\partial Q_V}{\partial N_V} = \max.$$

Данное выражение очевидно и может быть положено в основу оптимизации ВСПД по критерию энергозатрат. При этом оптимизация других параметров машин должна быть подчинена этому основному принципу.

Спецификой работы ВГП в условиях шахтных вентиляционных и распределительных электросетей являются возмущения по валу и возмущения в питающей сети. Регулирование требуемой производительности ВГП приводит к колебаниям активной нагрузки на валу приводного электродвигателя. На эти колебания накладываются возмущения от открывания и закрытия вентиляционных дверей, движения подъемных сосудов и особенно заметные возмущения при взрывах метана и внезапных выбросах в шахтах, а также при технологических и массовых взрывах на рудниках. Возмущения же по питающей сети (колебания напряжения на зажимах двигателя) обусловлены резкопеременной нагрузкой

мощных потребителей, питающихся от тех же шин подстанции, что и двигатель ВГП, значительным удалением подземных потребителей, неправильным выбором сечений токоведущих элементов, мощности силовых трансформаторов и рядом других причин. Как указывает ряд авторов, колебания момента сопротивления ВГП могут составлять от 0,3 до 1,9 от номинального, а колебания напряжения в шахтных распределительных сетях могут достигать +5; - 10 % от номинального [4]. Указанные возмущения влияют на устойчивость СД и его генерирующую способность и требуют их учета при создании АСУ ГВУ шахт.

Поэтому ставится задача поиска закона оптимального управления возбуждением СД ВГП в условиях нестационарности шахтных вентиляционных и распределительных сетей электроснабжения при автоматизации проветривания шахт.

При выборе закона регулирования возбуждения СД необходимо учитывать комплекс проблем, таких как [1]:

- при колебаниях нагрузки на валу и питающего напряжения необходимо поддерживать ток возбуждения на максимально-допустимом уровне с точки зрения обеспечения динамической устойчивости и с точки зрения генерации максимальной реактивной энергии;
- в период снижения нагрузки на валу для экономических и энергетических характеристик самого СД ток возбуждения желательно снижать;
- для обеспечения высоких технико-экономических показателей в узле нагрузки СД должен отдавать максимум реактивной мощности, то есть в период снижения нагрузки на валу ток возбуждения желательно увеличивать.

Наилучшим образом решению этих проблем отвечает закон регулирования возбуждения СД на минимум потерь электроэнергии в узле нагрузки, к которому подключен двигатель.

Для обоснования закона регулирования возбуждения СД, удовлетворяющего указанным требованиям, рассмотрим суммарные потери энергии в узле нагрузки (СД, питающая сеть, шахтная подстанция и т.д.):

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{MEH} + \Delta P_B + \Delta P_{MC} + \Delta P_{CC} + \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3} + \Delta P_{\phi} + \Delta P_{\Sigma}. \quad (1)$$

Отдельные составляющие потерь можно выразить через их номинальные значения, а также конструктивные и эксплуатационные параметры СД и системы электроснабжения так [5]:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{MEX} &= \Delta P_{MEXH} \\
\Delta P_B &= \Delta P_{BH} \left[K_{BO}^2 (u^2 + aX_d \sin \varphi_H)^2 + \beta^2 u^{-2} (1 - K_{BO}^2 (1 + X_d \sin \varphi_H)^2) \right] \\
\Delta P_{MC} &= \Delta P_{MCH} (\beta^2 \cos^2 \varphi_H + a^2 \sin^2 \varphi_H) \\
\Delta P_{CC} &= \Delta P_{CCH} (u + X_\sigma a \sin \varphi_H)^2 \\
\Delta P_{XX} &= \Delta P_{XXH} (u + X_\sigma a \sin \varphi_H)^2 \\
\Delta P_{K3} &= \Delta P_{K3H} (\beta^2 \cos^2 \varphi_H + a^2 \sin^2 \varphi_H) \\
\Delta P_\phi &= 3R'_\phi (I_{\phi R} - aI_H \sin \varphi_H)^2 10^{-3} \\
\Delta P_\vartheta &= \sqrt{3UK_\vartheta} (I_{\phi R} - aI_H \sin \varphi_H)
\end{aligned} \tag{2}$$

Из уравнений (2) видно, что при увеличении реактивной мощности (РМ) СД потери в самом двигателе нарастают, а в фидере и энергосистеме уменьшаются. При некотором оптимальном значении РМ суммарные потери в узле нагрузки будут минимальными. РМ_{ОПТ} зависит от потребляемой узлом нагрузки реактивной мощности, параметров СД и системы электроснабжения и может изменяться в широких пределах. Практическое значение РМ_{ОПТ} ограничивается диапазоном от РМ_{МИН} до РМ_{МАКС}. Значение РМ_{МИН} определяется из условия устойчивой работы СД, РМ_{МАКС} - из условия допустимой нагрузки статора по нагреву в виде:

$$\begin{aligned}
a_{ОПТ} &= \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} UK_\vartheta I'_H + 3 \cdot 10^{-3} R'_\phi I_{\phi R} I_H - (\Delta P_{CCH} + \Delta P_{XXH}) u X_\sigma - \Delta P_{BH} K^2 \omega u^2 X_d}{(\Delta P_{BH} K^2 \omega X_\sigma^2 + (\Delta P_{CCH} + \Delta P_{XXH}) X_\sigma^2 + \Delta P_{MCH} + \Delta P_{K3H} + 3 \cdot 10^{-3} R'_\phi I_H^2) \sin \varphi_H} \\
a_{МИН} &= a_{МИН} = \frac{\sqrt{u^2 I^2 \omega_{МИН} - \beta^2 (1 - K^2 \omega (1 + X_\sigma \sin \varphi_H)^2)} - u^3 K \omega \omega}{u K \omega K \omega_\sigma \sin \varphi_H}, \\
a_{МАКС} &= \frac{\sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi_H}}{\sin \varphi_H}
\end{aligned}$$

где $I_{\omega_{МИН}}$ минимальный ток возбуждения определяется с учетом перегрузочной способности СД, минимального уровня напряжения в сети и максимального значения статической нагрузки.

При значительной реактивной мощности, потребляемой узлом нагрузки значение РМОПТ, вычисленное по формуле приведенной выше может выйти из диапазона ограничений и тогда приближения к минимуму суммарных потерь можно достичь за счет максимально возможной по условию нагрева загрузки двигателя реактивной мощностью. Нагрев СД определяется его потерями: если суммарные потери в двигателе не превышают номинальные, двигатель перегреваться не будет. Выра-

жение для определения реактивной мощности, располагаемой СД с учетом текущих значений активной нагрузки на валу и напряжения в распределительной сети получено из условия равенства потерь в двигателе их номинальным значениям из уравнения $A+B(2+C(2+D))=0$ в виде:

$$a = \frac{-D + \sqrt{D^2 - 4C(A + B\varphi^2)}}{2C}$$

$$A = \Delta P_{MEX} + (\Delta P_{CCH} + \Delta P_{XXH})u^2 + \Delta P_{BH}K^2\omega u^4 - \Delta P_H$$

$$B = (\Delta P_{MCH} + \Delta P_{KZH})\cos^2\varphi_H + \Delta P_{BH}u^{-2}\left[1 - K^2\omega(1 + X_s\sin\varphi_H)^2\right]$$

$$C = (\Delta P_{MCH} + \Delta P_{KZH})\sin^2\varphi_H + (\Delta P_{CCH} + \Delta P_{XXH})X_\sigma^2\sin^2\varphi_H + \Delta P_{BH}K^2\omega X_d^2\sin^2\varphi_H$$

$$D = (\Delta P_{CCH} + \Delta P_{XXH})2uX_\sigma\sin^2\varphi_H + \Delta P_{BH}K^2\omega X_d\sin^2\varphi_H$$

Зависимость реактивной мощности, генерируемой СД от колебаний активной нагрузки на валу при различном уровне питающего напряжения для параметров шахты "Котинская" приведены на рисунке 3, а. Наглядно видно, что при изменении нагрузки на валу СД и напряжения на его зажимах уровень генерируемой реактивной мощности значительно колеблется.

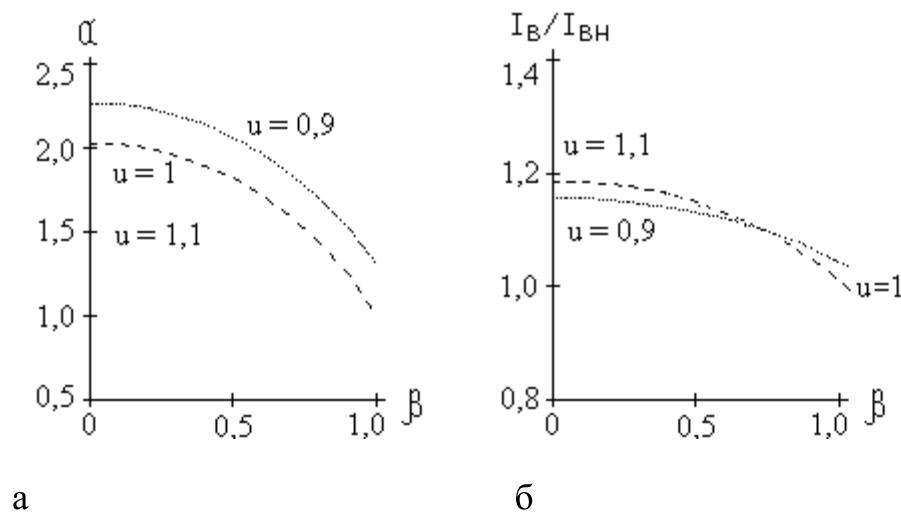


Рисунок 3 – а - график зависимости реактивной мощности СД от активной нагрузки на валу; б - график зависимости тока возбуждения СД от активной нагрузки на валу

Загрузка СД реактивной мощностью определяется величиной тока возбуждения, который может быть вычислен по формуле [5]:

$$\frac{I_B}{I_{BH}} = \sqrt{K^2\omega(u^2 + aK_d\sin\varphi)^2 + \beta^2u^{-2}(1 - K^2\omega(1 + X_d\sin\varphi)^2)}.$$

Зависимость тока возбуждения представлена на рисунке 3, б.

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе проведенного анализа видно, что для шахтных электрических сетей оптимальная загрузка СД ВГП по реактивной мощности из условия минимума суммарных потерь в узле нагрузки в основном находится в пределах максимальной загрузки двигателя по нагреву и в зависимости от реактивной мощности, потребляемой электроустановками узла нагрузки возможна полная либо частичная компенсация реактивной мощности с помощью СД ВГП, а регулирование возбуждения СД ВГП в условиях нестационарности шахтных питающих и вентиляционных сетей является многокритериальной задачей.

Выполнено обоснование энергосберегающих режимов эксплуатации главных вентиляторных установок. Предложены зависимости для оценки уровня энергетической эффективности установок и режимов загрузки синхронных двигателей.

The substantiation of modes operation fans the main airing saving up energy is executed. Dependences for an estimation of a level of power efficiency installations and modes of loading synchronous engines are offered.

Библиографический список

1. Петров Н.Н. Пономарев П.Т. Сергачев А.Н. Исследование путей снижения энергопотребления на вентиляцию шахт // ФТПРПИ 1996. – №6. – С. 12-15.
2. Тимухин С.А. Оценка экономичности работы главных вентиляторных установок по удельной мощности // Изв. вузов. Горный журнал. - 1984. - №4. - С.79 - 82.
3. Перишин Ю. С., Перишина Л. М. Расчет оптимального режима работы синхронного двигателя // Электричество. – 1981. – №9. – С. 30 - 33.
4. Бабак Г.А., Макаров В.Н. Повышение экономичности вентиляторов струйным управлением обтеканием лопаток рабочих колес // Повышение эффективности и эксплуатационной надежности шахтных стационарных установок. - М.: Недра, 1983. - С.3 - 18.
5. Тимухин С.А. Обоснование рабочих областей главных вентиляторных установок // Изв. вузов. Горный журнал. - 1996. - №6. - С.110 - 115.

Рекомендовано к печати д.э.н., проф. Акмаевым А.И.