

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 62-543.3 : 624.191.94

МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Принц, Ананда Шанкар Хати

*Индийский технологический институт,
E-mail: anandashati@iitism.ac.in, 826004, г. Дханбад, Индия*

Обобщены закономерности регулирования скорости асинхронного электродвигателя системы шахтной вентиляции при изменении параметров, измеряемых в режиме реального времени, таких как температура и влажность. На основе адаптивной системы управления с эталонной моделью рассмотрена методика бездатчиковой оценки скорости асинхронного электродвигателя, используемого в приводах шахтной вентиляции при изменении температуры и влажности. Разработанный метод проверен аналитически и экспериментально в программах MATLAB/Simulink и LabVIEW-2013. Статистически подтверждено эмпирическое соотношение между температурой и влажностью воздуха в шахте и скоростью электропривода системы вентиляции.

Оценка скорости, адаптивная система управления, эталонная модель, асинхронный электропривод, система вентиляции

DOI: 10.15372/FTPRPI20210514

Традиционные шахтные вентиляторы имеют приводы с постоянной скоростью, в которых применяется синхронный двигатель. Из-за постоянной скорости привода в ходе эксплуатации шахты система вентиляции имеет низкую эффективность: энергопотребление составляет 45–55 % от общего энергопотребления шахты [1, 2]. Высокие цены на электроэнергию приводят к необходимости поиска решений по энергоэффективному управлению электродвигателем [3]. Регулируемые электроприводы могут рассматриваться в качестве рабочей замены традиционным контроллерам скорости и регулирующим устройствам [4]. В современных системах подземной шахтной вентиляции предпочтительно использовать асинхронный электродвигатель для эксплуатации с изменяемой скоростью.

Технологические разработки в области энергоснабжения, такие как стратегии программируемого управления электродвигателем [5, 6], позволят повысить производительность добычи, сократить эксплуатационные затраты [7]. Для решения сформулированной проблемы предлагается разработка методов улучшенного управления электродвигателем, более эффективного оборудования и высокотехнологичной системы вентиляции. В настоящее время энергосбере-

гающие технологии внедряются в различные производства [8–10]. Разработка методики замкнутого управления электродвигателем для контроля за энергопотреблением на требуемых скоростях в зависимости от расхода воздуха, температуры и влажности воздуха является крайне актуальной и позволит эффективно экономить энергию [11, 12].

Оценка скорости асинхронного электропривода с помощью адаптивной системы управления с эталонной моделью (АСУЭМ) на основе замкнутой обратной связи широко применяется на практике [13]. Регулировка скорости осуществляется при резком изменении параметров окружающей среды — температуры и влажности [14]. Такой подход распространен на шахтах Индии [15]. Замкнутая структура АСУЭМ обеспечивает более гибкую регулировку скорости по сравнению с существующими методами. Она позволяет учитывать прерывистый характер добычи, что является необходимым для приводов шахтных вентиляторов. Более того, регулировка на основе АСУЭМ позволяет эксплуатировать вентиляторы при низкой скорости, что впоследствии снизит их эксплуатационные затраты [16]. Тем не менее применение АСУЭМ для оценки скорости и управления асинхронным электроприводом, не оснащенным датчиками, остается относительно неисследованной областью.

Использование электропривода системы вентиляции, не имеющего датчиков, является надежным и экономичным решением, которое необходимо для эффективной работы. В связи с этим предложена методика бездатчиковой оценки скорости электроприводов системы шахтной вентиляции на основе АСУЭМ, учитывающая изменения температуры и влажности. Данная методика проверена аналитически и экспериментально с помощью программ MATLAB/Simulink и LabVIEW-2013 соответственно. Установлено статистически подтвержденное эмпирическое соотношение между температурой и влажностью в шахте и скоростью электропривода вентиляции.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ, ВЛАЖНОСТЬЮ И СКОРОСТЬЮ ВОЗДУХА В СИСТЕМЕ ВЕНТИЛЯЦИИ

Температура и влажность в подземной шахте регулируется за счет изменения расхода воздуха с помощью вентилятора, таким образом скорость потока воздуха зависит от температуры и влажности. Температура и индекс влажности любой среды может быть рассчитан на основе эффективной температуры в данной среде [17]. Эффективная температура зависит от температуры окружающей среды, относительной влажности и скорости потока воздуха:

$$A_T = T_a + 0.33\rho - 0.7\omega_s - 4, \quad (1)$$

где A_T — эффективная температура, °C; T_a — температура окружающей среды, °C; ρ — влажность воздуха; ω_s — скорость потока воздуха, м/с.

Согласно [13], ρ рассчитывается следующим образом:

$$\rho = \frac{r_h}{100} 6.105e^{\frac{17.27T_a + T_a}{273.73}}, \quad (2)$$

где r_h — относительная влажность.

Подставляя уравнение (2) в уравнение (1), выразим ω_s :

$$\omega_s = \frac{\left(T_a + 0.33 \frac{r_h}{100} 6.105e^{\frac{17.27T_a + T_a}{273.73}} \right) - A_T - 4}{0.7}. \quad (3)$$

После упрощения уравнение (3) имеет вид

$$\omega_s = \left(1.4285T_a + 0.02857r_h e^{\frac{17.27T_a}{273.73} + T_a} \right) - 42.85. \quad (4)$$

В настоящей работе принято значение эффективной температуры, равное 25 °С, которое является рекомендованной температурой в шахте. При изменении температуры и влажности в шахте происходит соответствующее изменение скорости потока воздуха для текущей эффективной температуры. Изменение скорости потока воздуха рассчитывается по уравнению (4).

На основе требуемой скорости воздушного потока можно определить скорость вращения вентилятора. Соотношение между скоростью потока воздуха, характеризуемой по уравнению (4), и скоростью электродвигателя определяется согласно закону аэродинамики вентилятора: скорость потока воздуха прямо пропорциональна скорости электродвигателя [12].

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДОЛОГИЯ

Согласно индийским стандартам, добыча угля из подземных шахт организована в три смены: подготовки, обслуживания и добычи [18]. Смены подготовки и обслуживания занимают минимум 2–3 ч. Чтобы добраться до места добычи, рабочим требуется еще несколько часов. [19, 20]. В течение данных “холостых” часов вентилятор обычно работает на полной скорости. Предлагаемая методика заключается в снижении скорости вентилятора на это время, а также на время добычной смены для сокращения потребления электроэнергии.

Снижение скорости вентилятора зависит от значений температуры и влажности в шахте, которые отслеживаются специальными датчиками, установленными на стратегически важных участках. Модуль входа обрабатывает сигналы с этих датчиков для управления скоростью асинхронного электропривода. Скорость потока воздуха, зависящая от температуры, влажности и площади сечения выработки, рассматривается как отсчетная (эталонная) скорость для изменения скорости электропривода (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка для проверки блока оценки скорости системы вентиляции на основе АСУЭМ

Значение скорости поступает в блок управления и сравнивается со скоростью, полученной с помощью АСУЭМ [13, 21], на основе которого генерируется разница скорости и эталонный крутящий момент. Затем данные об эталонной скорости и крутящего момента направляются на блок управления ориентацией поля, где происходит генерация эталонной силы тока, которая сравнивается с текущей и определяется разница силы тока. Это значение подается в блок управления током для создания управляющего сигнала в ШИМ-блок, где генерируется стробирующий сигнал [22]. Данный сигнал подается на IGBT-инвертор, который изменяет скорость вращения вала вентилятора.

ПРОВЕРКА ЭМПИРИЧЕСКОГО СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ, ВЛАЖНОСТЬЮ И СКОРОСТЬЮ ПОТОКА ВОЗДУХА Z-ТЕСТОМ

Температура. Первым шагом проверки уравнения (4) является введение ограничений [23–25]. В настоящей работе использовано следующее двухстороннее ограничение:

$$\begin{aligned} H_0 : H_1 &= 40 \\ H_0 : H_1 &\neq 40 \end{aligned} \quad (5)$$

Для проверки уравнения (4) необходимо принять нулевую гипотезу. Уровень значимости (α) составляет 5 %, т. е. $0.05 / 2 = 0.025$ для двустороннего ограничения [21]. Из таблицы значений z выбрано соответствующее $z_{critical}$ для $\alpha = 0.025$, ± 1.96 (приемлемый интервал для z_{calc}).

Значение z_{calc} , полученное z-тестом согласно [24], выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} z_{calc} &= \frac{\mu - z}{\sigma}, \quad N_D \leq 30, \\ z_{calc} &= \frac{\mu - z}{\sigma / \sqrt{N_D}}, \quad N_D > 30. \end{aligned} \quad (6)$$

После подстановки $\mu = 40.33319$ и $\sigma = 5.8688$ (из доступного набора данных) в уравнение (6) получим значение $z_{calc} = 0.316$, лежащее в допустимом диапазоне $[-1.96, 1.96]$. Таким образом, принято значение H_0 , подтверждая тем самым уравнение (4) относительно температуры. Графически это изображено на диаграмме двумерного нормального распределения (рис. 2а).

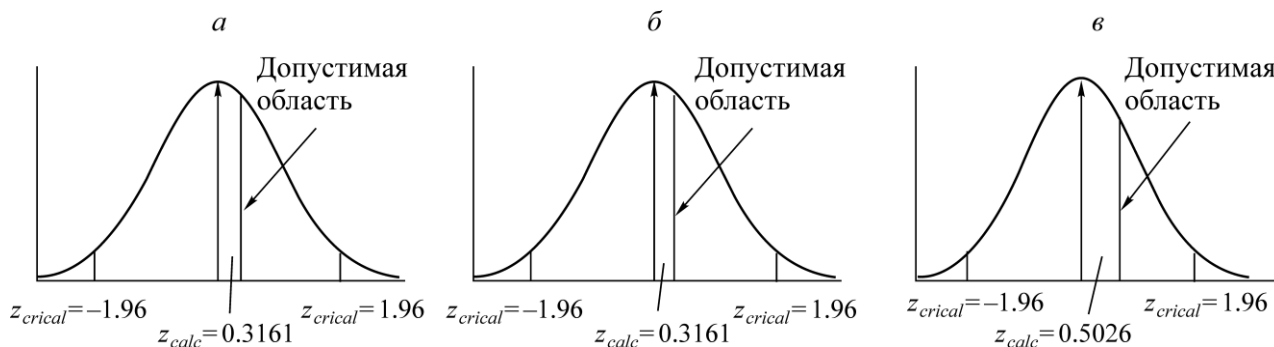


Рис. 2. Двумерные нормальные распределения относительно температуры (а), влажности (б), расхода воздуха (в)

Влажность. Для проверки уравнения (4) относительно влажности выполнены похожие операции. Двустороннее ограничение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} H_0 : H_1 &= 70, \\ H_0 : H_1 &\neq 70. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки $\mu = 70.33319$ и $\sigma = 5.8688$ (из доступного набора данных) в уравнение (6) получим значение $z_{calc} = 0.3161$, находящееся в допустимом диапазоне $[-1.96, 1.96]$. Принято значение H_0 , подтверждая уравнение (4) относительно влажности (рис. 2б).

Скорость воздушного потока. Для проверки уравнения (4) относительно скорости потока воздуха выполнены похожие операции, что для влажности и температуры. Приведем двустороннее ограничение:

$$\begin{aligned} H_0 : H_1 &= 39.9547, \\ H_0 : H_1 &\neq 39.9547. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки $\mu = 41.62803$ и $\sigma = 18.52816$ (из доступного набора данных) в уравнение (6) получим $z_{calc} = 0.5028$. Это значение также лежит в допустимом диапазоне $[-1.96, 1.96]$. Таким образом, принято значение H_0 , подтверждая тем самым уравнение (4) относительно скорости потока воздуха (рис. 2в).

Следует отметить, что при статистической проверке каждого из параметров (температуры, влажности и скорости потока воздуха) остальные два параметра имели постоянное значение. Числовые значения параметров представлены в таблице.

ТАБЛИЦА. Статистические данные для проверки соотношения (4)

Температура, °C	Влажность, г/м ⁻³ (%)	Скорость потока воздуха, м/с	Скорость вращения вентилятора, об/мин
28.0	48	5.67	564.1
28.0	52	6.38	657.7
29.0	52	8.36	859.7
29.5	52	9.36	962.0
30.0	45	8.97	904.3
30.0	52	10.52	1080.6
31.0	48	11.54	1178.0
32.0	52	13.54	1399.0

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Для дальнейшей проверки предлагаемой схемы управления скоростью шахтной вентиляции на основе изменений температуры и влажности проведены испытания с помощью LabVIEW (рис. 1). Некоторые характеристики короткозамкнутого асинхронного электродвигателя приведены ниже:

Вентилятор	Вспомогательный
Тип энергоснабжения	Трехфазный
Напряжение	415 В
Мощность	5 кВт
Частота тока статора	50 Гц
IGBT-модуль	600 В, 100 А
Частота вращения	1500 об/мин
Количество полюсов	4

Датчики температуры и влажности подключены к установке через цифровой интерфейс на панели. Результирующий сигнал об изменении скорости от блока управления ориентацией поля приводит в действие трехфазный асинхронный двигатель осевого вентилятора. Этот сигнал, поступающий с датчика скорости, управляет вращением вала электродвигателя и, соответственно, приводит в действие вентилятор.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3–5 представлены результаты испытаний при различных заданных условиях окружающей среды. В предложенном масштабе графики оцениваемой, фактической и эталонной скоростей практически совпадают, поэтому они изображены одной линией.

Первая часть исследований проводилась при постоянной температуре 30 °C и изменении состояния окружающей среды (только влажности), влияющих на скорость вентилятора и, как следствие, на потребление электроэнергии всей системой (рис. 3).

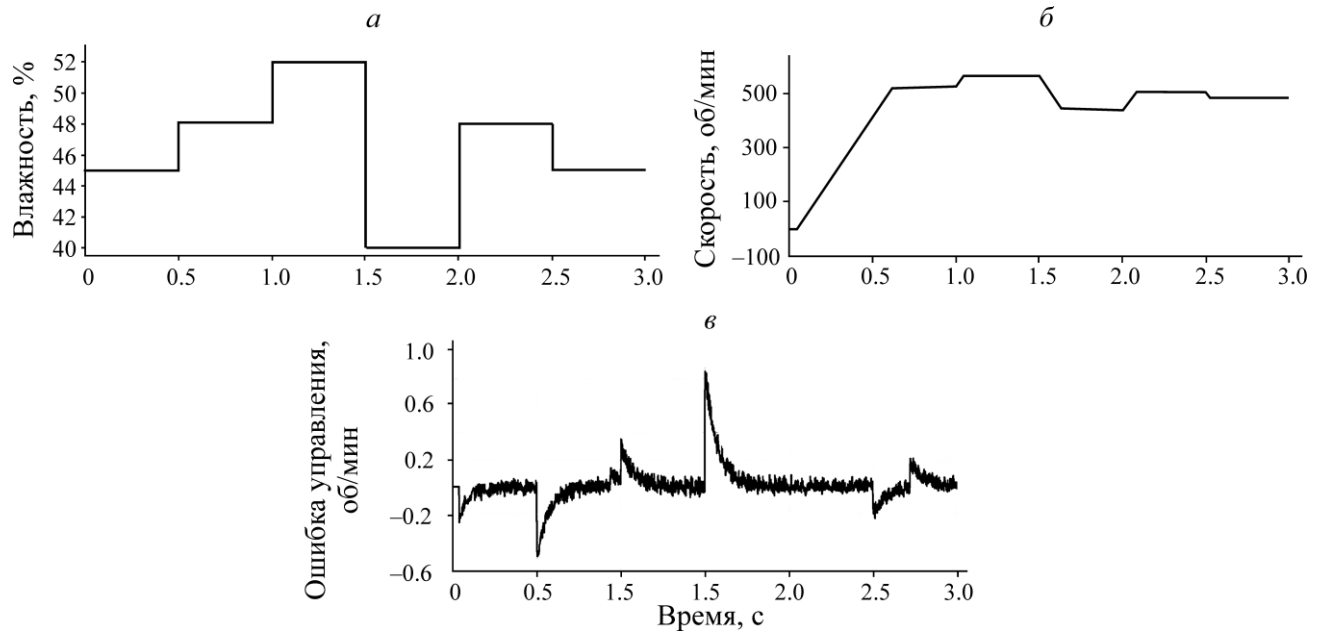


Рис. 3. Изменение влажности (*a*) и скорости воздуха во времени (*б*); разница между фактической и оцениваемой скоростью при постоянной температуре (*в*)

Во второй части опытов при постоянной влажности 60 % и изменении состояния окружающей среды (только температуры) также изменяется скорость вентилятора, которая косвенно влияет на потребление электроэнергии всей системой (рис. 4).

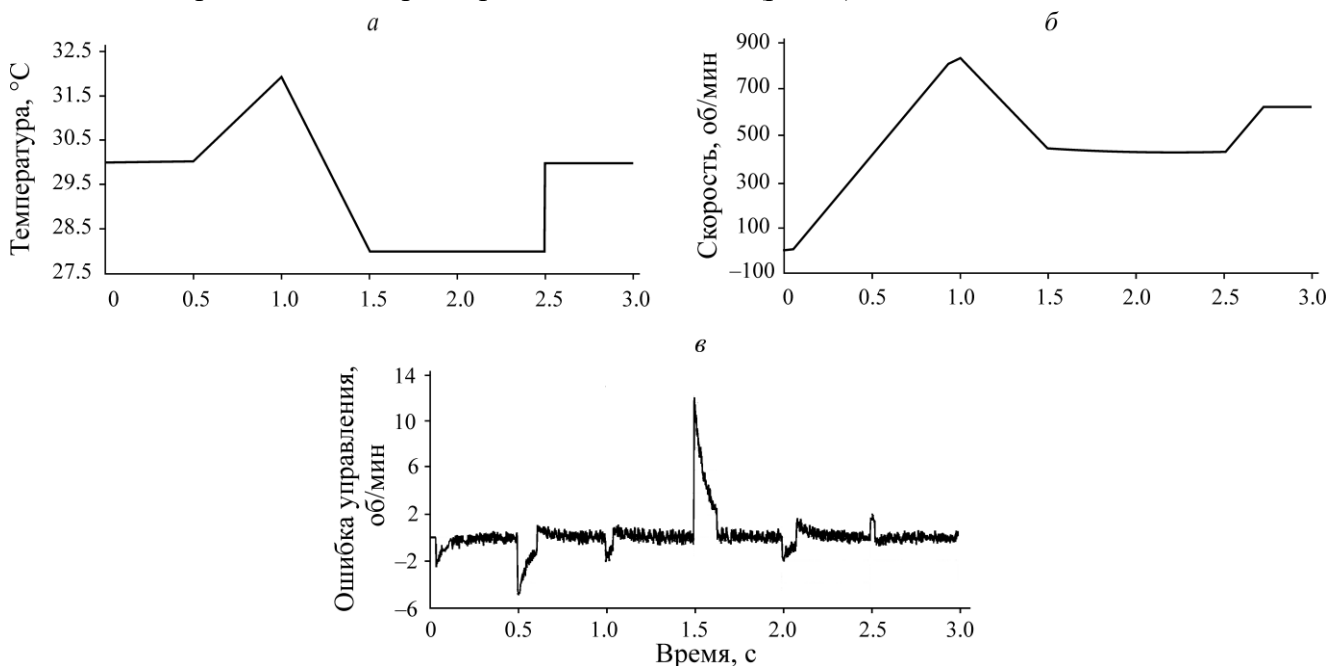


Рис. 4. Изменение температуры (*a*) и скорости воздуха во времени (*б*); разница между фактической и оцениваемыми скоростями при постоянной влажности (*в*)

При варьировании температуры и влажности, исследованного в третьей части опытов, скорость вращения вала вентилятора меняется, косвенно влияя на потребление электроэнергии всей системой (рис. 5).

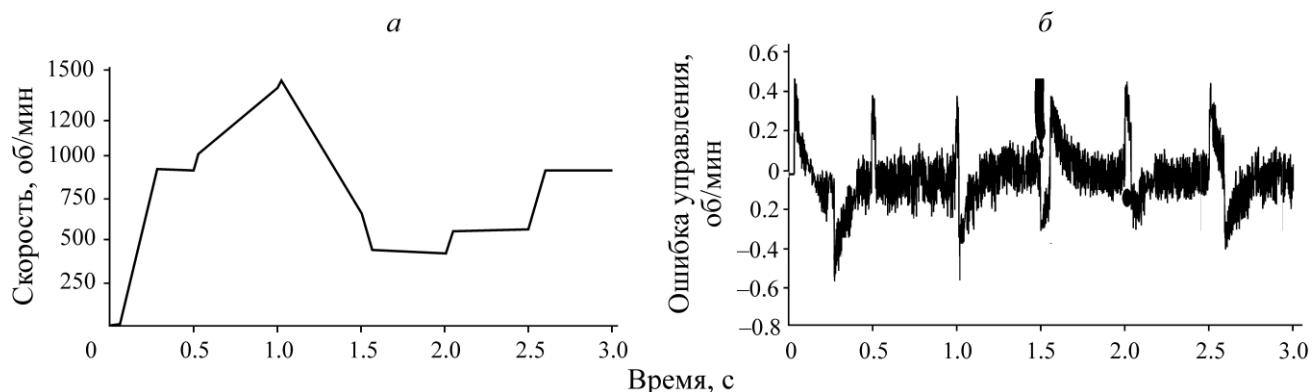


Рис. 5. Зависимость скорости от времени при изменении температуры и влажности воздуха (а); разница между фактической и оцениваемой скоростью с помощью АСУЭМ (б)

Работа системы шахтной вентиляции при изменениях температуры и влажности согласуется с результатами испытаний хорошо зарекомендовавшего себя электропривода с изменяемой скоростью [26–28]. Данный электропривод является наиболее эффективным способом регулировки скорости электродвигателя в зависимости от изменения внешних условий. Такие электроприводы используются для управления вентиляторами в системе с изменяемым объемом воздуха вместо регулирования входными направляющими аппаратами или замены старых лопаток вентилятора на новые при его модификации [29–31]. Электроприводы с изменяемой скоростью более эффективны по сравнению с другими решениями [19, 32], они также позволяют снизить уровень шума при частичной нагрузке, избежать перегрузок в работе и уменьшить износ механических деталей, таких как ремни и подшипники.

Шахтные вентиляторы потребляют большое количество энергии. Простым способом изменения производительности вентилятора является установка заслонки или клапана, в результате чего снизится давление и скорость потока воздуха. Тем не менее такое снижение сопровождается потерями энергии [33] (иногда данное решение целесообразно, несмотря на потери энергии). Электропривод вентилятора с изменяемой скоростью позволяет обеспечить требуемую производительность без дополнительных потерь энергии [19, 32].

Если привод вентилятора имеет постоянную скорость, то скорость потока воздуха будет соответствовать максимальной расчетной скорости, которая обычно выше фактически требуемой. Поток воздуха можно регулировать заслонкой, но более эффективно его изменять непосредственно скоростью электродвигателя. В соответствии с законами подобия при расходе воздуха 50 % электродвигатель с изменяемой скоростью потребляет около 20 % от максимальной подводимой энергии, в то время как электродвигатель с постоянной скоростью — около 85 % [34–37].

В настоящей работе для управления скоростью вентилятора использована методика бездатчиковой регулировки электропривода, которая обеспечивает устойчивое управление на высоких и низких скоростях, а также при нулевой скорости. Для уменьшения общих эксплуатационных затрат рассмотрено изменение скорости воздуха системы вентиляции в зависимости от температуры и влажности, в этом случае возможна экономия, составляющая 30.52 %. Максимальное энергопотребление в шахте приходится на главный вентилятор [19, 37]. Разработана система управления, которая основана на оптимизации методом роя частиц, повышающая экономию электроэнергии и производительность работ. Согласно анализу, экономия составила 15.2 % от общего энергопотребления. В [2] рассмотрена обтекаемая модель устройства шахт-

ной вентиляции, где производительность вентилятора взята в качестве целевой функции. Применяв гармонический поиск к системе вентиляции с одним вентилятором, обнаружено, что общее энергопотребление всей системы понизилось до 1640 Вт, шаг затухания составил 1.94 %. Общее энергопотребление системы с несколькими вентиляторами можно сократить до 9396.5 Вт. Скорость снижения составила примерно 3.57 %. Следует уточнить, что гармонический поиск позволяет обойти ограничения традиционного расчета оптимизации. Отмечено, что данную систему можно применять как с одним, так и с несколькими вентиляторами в системе. Использование нескольких вентиляторов более затратно, чем использование одного. При внедрении системы вентиляции, работающей по мере необходимости, общая годовая экономия составит 179.421 МВт/ч [34, 35]. Результирующая экономия оценивается в 11.57 млн долл США со средним периодом окупаемости 9 мес [36].

ВЫВОДЫ

В настоящей работе представлено статистическое и экспериментальное исследование методики бездатчикового управления скоростью электропривода системы шахтной вентиляции на основе оценки скорости с помощью АСУЭМ. Система управления использована для оценки скорости вращения ротора, которая необходима для выполнения алгоритма бездатчикового управления. Целью управления скоростью с помощью АСУЭМ является достижение высокой корреляции между эталонной и оцениваемой скоростью в допустимом диапазоне изменения температуры и влажности в шахте. Полученные результаты показали значительную зависимость скорости вентилятора от температуры и влажности воздуха. Минимальное отклонение фактической скорости от оцениваемой говорит о высокой чувствительности и точности предлагаемой методики.

Бездатчиковое управление позволяет регулировать скорость асинхронного электропривода без влияния помех от дополнительных устройств. Выполнена статистическая проверка эмпирического соотношения между температурой, влажностью и скоростью потока воздуха при неизвестном значении одного параметра и известных значениях двух остальных. Настоящая работа позволит будущим исследователям более детально рассмотреть бездатчиковую оценку скорости электропривода шахтного вентилятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moger G. D., Murthy Ch. S., and Udayakumar R. U.** Experimental study on energy consumption of wound rotor induction motor in mine applications, *Int. J. Eng. Sci. Innovative Technol.*, 2013, Vol. 2, No. 5. — P. 363–369.
2. **Lee K., Rugge R., Zheng K., and Yang B.** Energy saving HVAC system modelling and closed loop control in industrial and commercial adjustable speed drives, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, USA, 2014, P. 1286–1292.
3. **Krouse P. C., Wasynczuk O., and Sudhoff S.** Analysis of electrical machinery and drive system, *IEEE Press*, 2004 — 613 p.
4. **Schachter N.** Energy efficient speed control using modern variable frequency drives, *CIMENTEC Eng. Ltd.* — P. 1–8.
5. **Chuang H. C., Chi J., Chang K., and Lee C.** Study on a fan coil unit and chiller by an intelligent control method with a stepless variable speed driving technology, *Building and Environment*, 2018, Vol. 132. — P. 137–146.

6. **Magzoub M., Saad N., Ibrahim R., and Irfan M.** An experimental demonstration of hybrid fuzzy-fuzzy space-vector control on AC variable speed drives, *Neural Computing and Applications*, 2019, Vol. 31, No. 2. — P. 777–792.
7. **Hannan M., Ali J., Mohamed A., and Hussain A.** Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 81. — P. 1611–1626.
8. **Chuang H., Li G., and Lee C.** The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology, *Energy*, 2019, Vol. 174. — P. 805–813.
9. **Moger G. D., Murthy C. S. N., and Kumar R. Y. U.** Energy consumption of mine haulage drive system in an underground coal mine — a case study, *Int. J. Emerging Technol. Advanced Eng.*, 2013, Vol. 3. — P. 271–277.
10. **Nie X., Wei X., Li X., and Lu C.** Heat treatment and ventilation optimization in a deep mine, *Advances in Civil Eng.*, 2018, Vol. 4. — P. 1–12.
11. **Toliyat H. A. and Kliman G. B.** Handbook of electric motors, CRC Press, 2018. — 850 p.
12. **Kingeri D. S.** Introduction to mine ventilation principles and practices, Washington, U. S. Govt. Print. Off., Bull. 589, 1960. — 54 p.
13. **Schauder C.** Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 5, 1992. — P. 1054–1061.
14. **Babu V. R., Maity T., and Prasad H.** Energy saving techniques for ventilation fans used in underground coal mines — a survey, *J. Min. Sci.*, 2015, Vol. 51, No. 5. — P. 1001–1008.
15. **Mishra G. B.** Mine environment and ventilation, Calcutta, Oxford univ. press, 2013. — 619 p.
16. **Hartman H. L., Mutmansky J. M., Ramani R. V., and Wang Y. J.** Mine ventilation and air conditioning, John Wiley & Sons, 2013. — 752 p.
17. **Lawrence M.** The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications, *Bull. Am. Meteorological Soc.*, 2005, Vol. 86, No. 2. — P. 225–234.
18. **Chatterjee A., Zhang L., and Xia X.** Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff, *Applied Energy*, 2015, Vol. 146. — P. 65–73.
19. **Babu V. R., Maity T., and Burman S.** Optimization of energy use for mine ventilation fan with variable speed drive, *ICICPI*, 2016. — P. 148–151.
20. **Shonin O. B. and Pronko V. S.** Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive, *Mechanization, Electrification and Automation in Mines*, 2013, Vol. 56. — P. 163–169.
21. **Orlowska-Kowalska T. and Dybkowski M.** Stator-current-based MRAS estimator for a wide range speed-sensorless induction-motor drive, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2009, Vol. 57, No. 4. — P. 1296–1308.
22. **Arulmozhiyal R. and Baskaran K.** Speed control of induction motor using fuzzy PI and optimized using GA, *Int. J. Recent Trends in Eng.*, 2009, Vol. 2, No. 5. — P. 43.
23. **Mourougan S. and Sethuraman K.** Hypothesis development and testing, *J. Bus. Manag.*, 2017, Vol. 19. — P. 34–40.
24. **Sinha A. K., Das S., and Chatterjee T. K.** Empirical relation for broken bar determination in SCIM, *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electric. Electron. Eng.*, 2018, Vol. 37, No. 1. — P. 242–265.
25. **Camblor P. M.** On correlated z-values distribution in hypothesis testing, *Comput. Statistics & Data Analysis*, 2014, Vol. 79. — P. 30–43.
26. **Maré P.** Novel simulations for energy management of mine cooling systems, Doctoral dissertation, North-West University, South Africa, 2017. — 245 p.

27. **McPherson M. J.** Subsurface ventilation and environmental engineering, Springer Science & Business Media, 2012. — 905 p.
28. **McPherson M. J.** Subsurface ventilation engineering, Springer, 2015.
29. **Saidur R., Mekhilef S., Ali M. B., Safari A., and Mohammed H. A.** Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16, No. 1. — P. 543–550.
30. **Acuña E. I. and Feliú A.** Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente, *Proc. 7th Int. Conf. Deep High Stress Min.*, Australian Centre for Geomechanics, 2014. — P. 813–821.
31. **Peng W., Kunlei Z., Jingxian L., Yu Z., and Changyan S.** Research and application of controlled circulating ventilation in deep mining, *Proc. Eng.*, 2017, Vol. 84. — P. 758–763.
32. **Babu V. R., Maity T., and Gupta S.** Adaptive environment-friendly mine ventilation fan speed control using PLC, *J. Eng. Technol.*, 2017, Vol. 6, No. 2. — P. 407–413.
33. **Zucker G., Sporr A., Marijuan A. G., Ferhatbegovic T., and Hofmann R.** A ventilation system controller based on pressure drop and CO² model, *Energy Build.*, 2017, Vol. 155. — P. 378–389.
34. **Demirel N.** Energy-efficient mine ventilation practices, *Energy Efficiency in the Minerals Industry*, Springer, 2018. — P. 287–299.
35. **Papar R., Szady A., Huffer W. D., Martin V., and McKane A.** Increasing energy efficiency of mine ventilation systems, *Engineering*, 1999.
36. **Du Plessis J. J. L., Marx W. M., and Nell C.** Efficient use of energy in the ventilation and cooling of mines, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 2014, Vol. 114, No. 12. — P. 1033–1037.
37. **Gy J.** Mine ventilation network based on cultural particle swarm optimization algorithm, *J. Southeast University (Natural Science Edition)*, 2013.
38. **Sui J., Yang L., Zhu Z., and Hua Z.** Mine ventilation optimization design based on improved harmony search, *WASE Int. Conf. Inform. Eng.*, IEEE, 2010. — P. 67–70.

Поступила в редакцию 23/XII 2019

После доработки 16/VI 2021

Принята к публикации 10/IX 2021