



И.П. Маслов

начальник производства ООО «Кузбасский региональный горный Центр охраны труда»



И.Ю. Семькина

канд. техн. наук, доцент, и. о. директора Института энергетики ФБГОУ ВПО «КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева», доцент кафедры ФГБАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

УДК 622.23.05

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПУСКА ВЕНТИЛЯТОРА МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В статье рассматривается динамика переходных процессов для возможных вариантов пуска вентилятора местного проветривания с электрическим приводом, а также производится сравнение энергоэффективности этих вариантов пуска.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (шифр МК-1963.2013.8).

Ключевые слова: ВЕНТИЛЯТОР МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ, ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ

Рост производительности горнодобывающих предприятий влечет за собой повышенный риск возникновения аварийных ситуаций. В частности, увеличивается скорость проходки подготовительных выработок, что вызывает повышенное выделение метана и других газов из горных пород. Для создания безопасных условий труда рабочих, а также поддержания и дальнейшего роста производительности необходимо обеспечивать нормальные условия рудничной атмосферы.

Увеличение мощностей оборудования, в том числе систем проветривания, на предприятиях горнодобывающей промышленности приводит также к росту энергопотребления. Одним из приоритетных направлений Правительства согласно [1] является снижение энергоемкости валового внутреннего продукта России, в частности «... предусмотрены мероприятия ... по внедрению инновационных технологий и нового прогрессивного оборудования во всех отраслях российской экономики...».

Таким образом, внедрение современных способов управления вентиляционным обо-

дованием, которое в основном имеет электрический привод, и правильная организации режимов проветривания тупиковых выработок позволят не только повысить безопасность, но и снизить энергоемкость ведения горных работ, что соответствует выбранному курсу Правительства РФ.

Параметры проветривания тупиковых выработок определяются работой вентиляторов местного проветривания (ВМП), для которых предусмотрено два основных режима функционирования:

- 1) нормальная работа основного (резервного) ВМП с непрерывным автоматическим контролем проветривания призабойной области;
- 2) контроль и управление рабочим и резервным ВМП при их включении в штатном либо аварийном режимах.

Способы пуска ВМП с электрическим приводом регламентируются Положением об аэрогазовом контроле в угольных шахтах [2]:

1. Импульсный пуск с использованием пускателей: длительность импульса в диапазоне от 1,5 до 3,0 секунд; длительность паузы между импульсами от 6 до 10 секунд; число импульсов

от 3 до 10 шт.

2. Плавный пуск при использовании частотных преобразователей: длительность разгона двигателя в диапазоне от 30 до 120 секунд.

3. Прямой пуск резервного ВМП при отключении рабочего, осуществляется автоматически, без плавного заполнения воздухопровода.

Способы 1 и 2 предусматривают плавное заполнение трубопровода воздухом для предотвращения гидроудара, а запуск по способу 3 осуществляется при отключении рабочего вентилятора в течение времени, не превышающего 10 с, что исключает возможность возникновения гидроудара. Однако при близкой для всех способов запуски эффективности по использованию ресурса вентиляционного оборудования способ 2 обеспечивает плавное увеличение подводимого к двигателю напряжения, что ведет к снижению пусковых токов и динамических нагрузок на электродвигатель, увеличивая срок его службы.

В качестве объекта исследования для сравнения представленных способов запуска ВМП с точки зрения энергоэффективности рассмотрим вентилятор местного проветривания ВМЭ-6, технические характеристики которого представлены в таблице 1, аэродинамические – на рисунке 1. Электропривод ВМЭ-6 построен на базе асинхронного двигателя (АД) марки ВРМ160М2 (табл. 2). Параметры схемы замещения, отсутствующие в паспорте АД, рассчитаны по методике, изложенной в [3].

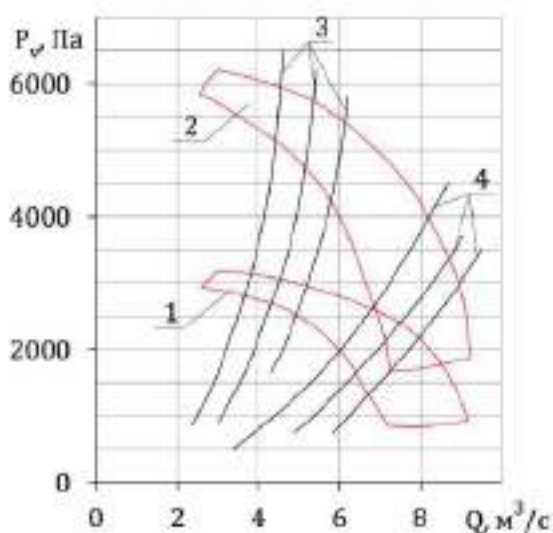


Рисунок 1 – Аэродинамические характеристики вентилятора ВМЭ-6: P_v – полное давление вентилятора, Па; Q – подача вентилятора, m^3/c ; 1, 2 – соответственно один или два вентилятора ВМЭ-6, соединенных последовательно; 3, 4 – соответственно трубопроводы диаметром 600 и 800 мм

Для анализа динамики и энергопотребления при переходных процессах запуска ВМП используем математическую модель (рис. 2), реализованную в пакете прикладных программ MatLab. Модель включает в себя преобразователь частоты (ПЧ), питающий асинхронный электродвигатель привода ВМП, при работе которого ВМП создает воздушный поток, поступающий в вентиляционную сеть (ВС).

В модели используется математическое описание АД в виде дифференциальных уравнений обобщенной двухфазной машины переменного тока со стандартными допущениями [4], записанное для неподвижной системы координат:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{SX}}{dt} = U_{SX} - R_S i_{SX}; \\ \frac{d\Psi_{SY}}{dt} = U_{SY} - R_S i_{SY}; \\ \frac{d\Psi_{RX}}{dt} = -R_R i_{RX} - p\omega\Psi_{RY}; \\ \frac{d\Psi_{RY}}{dt} = -R_R i_{RY} + p\omega\Psi_{RX}; \\ M = \frac{3}{2} L_\mu p (i_{RX} i_{SY} - i_{RY} i_{SX}), \end{cases} \quad (1)$$

где M – электромагнитный момент;

ω – угловая скорость двигателя;

Ψ_{SX}, Ψ_{SY} – потокосцепления эквивалентных статорных контуров;

Ψ_{RX}, Ψ_{RY} – потокосцепления эквивалентных роторных контуров;

i_{sx}, i_{sy} – эквивалентные токи статора;

i_{rx}, i_{ry} – эквивалентные токи ротора;

$L_S = L_\mu + L_{\sigma S}, L_R = L_\mu + L_{\sigma R}$ – индуктивность обмоток статора и ротора;

$\sigma = 1 - L_\mu^2 / (L_S L_R)$ – коэффициент рассеяния;

p – число пар полюсов.

Помимо двигателя, в модель включены силовая и управляющая части ПЧ, реализация которых в MatLab показана на рисунке 3, где силовые ключи приняты идеализированными, а их коммутация производится по принципу независимой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Управляющая часть включает в себя задатчик интенсивности, а также программируемое соотношение заданных частоты и амплитуды напряжения, реализуемых силовой частью ПЧ, т. е. произвольный закон частотного управления.

В модели применяется также упрощенное описание ВМП, представленное нелинейным элементом, преобразующим угловую скорость двигателя, т. е. скорость вращения вентилятора, в его подачу Q_B .



Рисунок 2 – Структура модели ВМП

Таблица 1 – Технические характеристики вентилятора ВМЭ-6

Параметр	Значение
Номинальный диаметр, мм	630
Номинальная подача, м ³ /с	7
Номинальное полное давление, Па	2 500
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	-
Максимальный расход сжатого воздуха, м ³ /с	-
Максимальный полный КПД вентилятора, %	68
Уровень звуковой мощности, дБА	118
Электродвигатель	2ВРМ160М2
Уровень взрывозащиты АД	РВ-3В
Степень защиты двигателя	IP-54
Длина проветривания, м: – одним вентилятором – двумя вентиляторами	600 1 000
Сечение проветриваемых выработок, м ²	10-14
Размеры изделия, мм: – высота – ширина	975 750
Масса комплекта, кг	420

Таблица 2 – Параметры электродвигателя ВРМ160М2

Параметр	Значение
Мощность, кВт	25
Номинальное напряжение, В	380
Скольжение, %	2,6
Синхронная частота вращения, об/мин	3 000
КПД, %	91
	0,88
Кратность начального пускового вращающего момента к номинальному	1,9
Кратность начального пускового тока к номинальному	6
Кратность минимального вращающего момента к номинальному	1,3
Кратность максимального вращающего момента к номинальному	2,5
Момент инерции, кг/м ²	0,085
Удельная масса, кг/кВт	9,5
Радиальное усилие, действующее на рабочий конец вала, Н, не более	180
Осевое усилие, действующее на рабочий конец вала, Н, не более	950
Масса, кг	228+5%
Активное сопротивление фазы статора, Ом	0,455
Приведенное активное сопротивление ротора, Ом	0,413
Индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн	0,0048
Индуктивность взаимной индукции, Гн	0,698

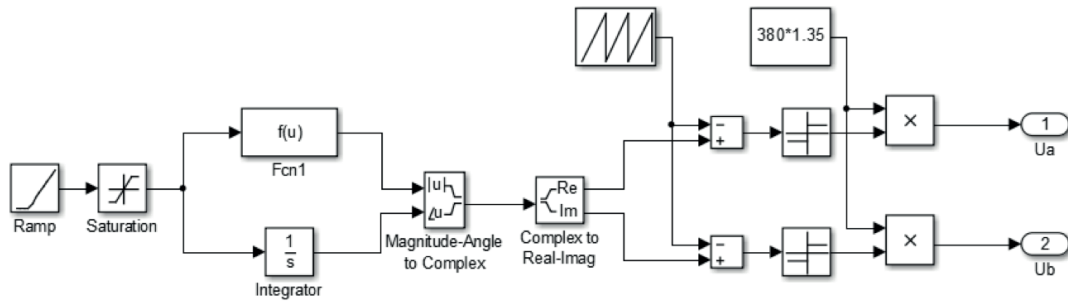


Рисунок 3 – Статическая характеристика ВМП

Аппроксимированное уравнение статической характеристики ВМП (рис. 4) имеет следующий вид:

$$Q_B(\omega) = -0,00003\omega^2 + 0,0203\omega. \quad (2)$$

Подача Q_B определяет расход воздуха Q на выходе из сети, а описание вентиляционной сети характеризует взаимосвязь этого расхода с изменением давления на каждом ее участке. Принимая допущение, что ни один из способов запуска ВМП не провоцирует гидроудара, а перемещение воздуха в воздуховоде носит ламинарный характер, опираясь на [5] в качестве описания ВС, в модель включено апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией:

$$W_{BC}(p) = \frac{K_{BC}}{T_{BC} \cdot p + 1}, \quad (3)$$

где T_{BC} – постоянная времени вентиляционной сети;

K_{BC} – коэффициент усиления, определяемый по аэродинамическим характеристикам вентилятора.

Момент сопротивления M_c , действующий на ВМП, зависит от скорости вращения вентилятора и определяется исходя из характеристик вентилятора и вентиляционной сети, на которую он работает. Статические характеристики момента сопротивления АД, соответствующие граничным режимам работы в пределах рабочей зоны аэродинамической характеристики ВМП, показаны на рисунке 5, а их аппроксимированные уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{c1}(\omega) &= 0,0008\omega^2, \\ M_{c2}(\omega) &= 0,0007\omega^2, \\ M_{c3}(\omega) &= 0,000545\omega^2, \\ M_{c4}(\omega) &= 0,000475\omega^2, \end{aligned} \quad (4)$$

Для анализа энергопотребления рассмотренных способов запуска ВМП необходимо определить энергетические показатели работы системы, в основу которых положено использование рекомендаций [6].

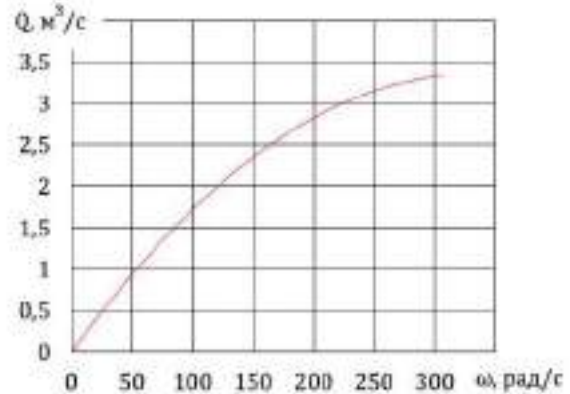


Рисунок 4 – Статическая характеристика ВМП

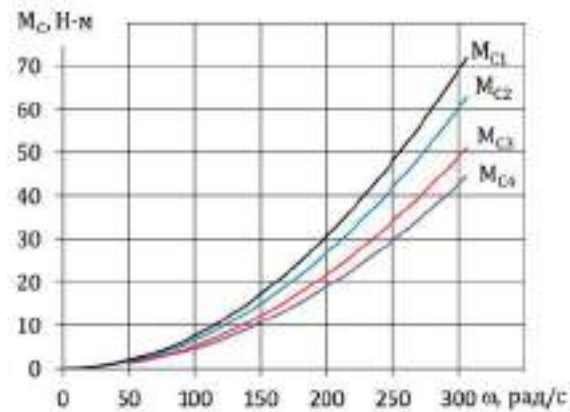


Рисунок 5 – Статические характеристики $M_c(\omega)$

Так, полезная мощность определяется выражением:

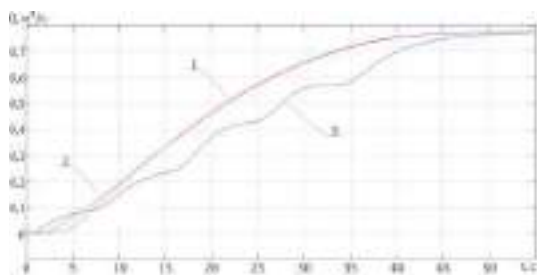
$$P_{\text{пол}} = \omega \cdot M_c. \quad (5)$$

Мощность механических потерь $\Delta P_{\text{мех}}$, электрических потерь ΔP_η и потерь в стали ΔP_σ определяются соответственно как:

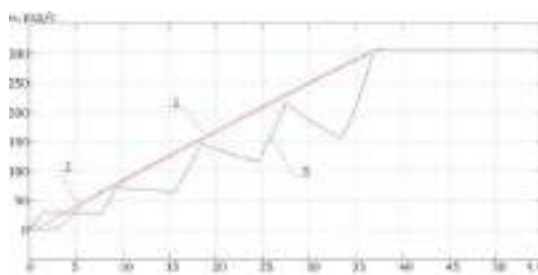
$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{мех}} &= \Delta P_{\text{мех.ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}\right)^{3/2}; \\ \Delta P_\sigma &= 0,2 \cdot P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{1-\eta}\right)^{3/2}; \end{aligned}$$

$$\Delta P_\eta = I_s^2 \cdot R_s + I_R^2 \cdot R_R, \quad (6)$$

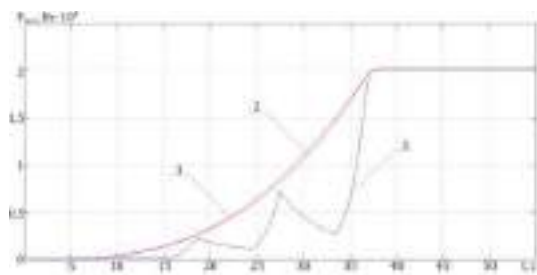
где $\Delta P_{\text{мех.ном}}$ – мощность номинальных механических потерь, равная произведению $\omega_{\text{н}} M_{\text{н}}$; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность;



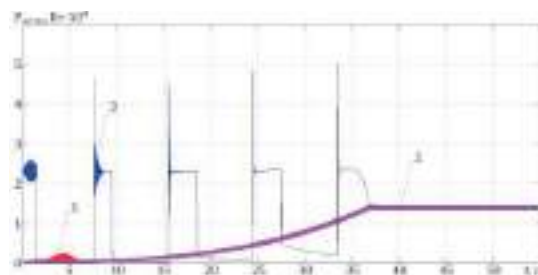
а) $Q(t)$



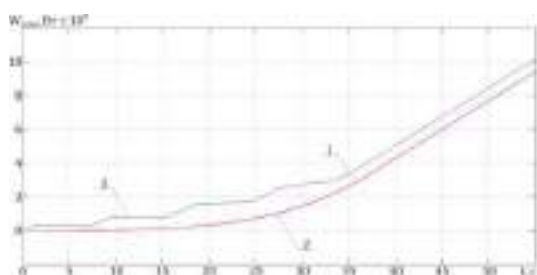
б) $\omega(t)$



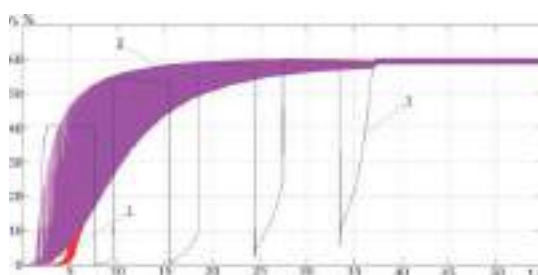
в) $P_{пол}(t)$



г) $P_{потерь}(t)$



д) $W_{пол}(t)$



е) $\eta(t)$

Рисунок 6 – Результаты моделирования: 1 – $M_k(\omega)/M_c(\omega)=const$; 2 – $U/f=const$; 3 – импульсный пуск

η – КПД, определяемое выражением:

$$\eta = P_{\text{пол}} / P_{\text{полн}} \cdot 100\% \quad (7)$$

где $P_{\text{полн}}$ – полная мощность, равная $P_{\text{пол}} + \Delta P_{\text{потерь}}$, а $\Delta P_{\text{потерь}} = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{э}}$.

Полная потребляемая энергия определяется интегрированием:

$$W_{\text{полн}} = \int_0^t P_{\text{полн}} dt. \quad (8)$$

Сравнение энергетической эффективности производилось для способов 1 и 2 запуска ВМП по результатам моделирования, приведенным на рисунке 6. При этом плавный пуск при использовании ПЧ реализован для законов частотного управления $Uf = \text{const}$ и $M_K(\omega) / M_C(\omega) = \text{const}$, где M_K – максимальный вращающий момент (критический момент) АД.

При моделировании использовались параметры запуска, обеспечивающие близкое по длительности заполнение воздухопровода. Для способа 2 заданное время пуска составляет 37 с, а для способа 1 задана следующая длительность импульсов: 1 импульс – 1,5 с; 2 – 2 с; 3 – 3 с; 4 – 3 с; 5 – 3 с, интервал между импульсами – 6 с.

По графику $W_{\text{полн}}(t)$ видно, что потребление электроэнергии при импульсном запуске ВМП (3) выше, чем при частотном (1, 2). Это связано с существенным повышением $\Delta P_{\text{потерь}}$, вызванным превышением токов АД над номинальными значениями, характерным для прямого пуска и исключаемым для частотных способов (рис.6г). В установившемся же режиме потребление электроэнергии происходит с одинаковой интенсивностью, т. к. полезная мощность во всех рассмотренных вариантах имеет близкое значение, поскольку система выходит на номинальный режим работы.

Полезная энергия при частотных способах выше, так как на низких угловых скоростях момент сопротивления невелик и увеличивается по мере разгона, а законы частотного управления обеспечивают пропорциональное повышение амплитуды напряжения, подводимого к двигателю, тогда как при импульсном пуске к двигателю всегда подводится напряжение номинальной величины. Это же подтверждается стабильно более высоким КПД при частотном пуске (рис.6е).

Рассмотренные варианты частотного запуска ВМП обладают близкими энергетическими характеристиками. Однако следует отметить, что в общем случае для вентиляторной нагрузки закон частотного управления $Uf = \text{const}$ формирует несколько больший электромагнитный момент на низких угловых скоростях, чем это требуется для преодоления момента сопротивления.

В результате моделирования по зависимости $W_{\text{полн}}(t)$ можно определить количество энергии, потребленной за время запуска ВМП при различных способах, а также при его работе. Так, потребленная энергия при частотном запуске в условиях номинальной статической характеристики нагрузки составила 941 500 Вт·с, а при импульсном – 1 013 500 Вт·с. Следовательно, экономия энергии для одного запуска составляет 72 000 Вт·с или 0,02 кВт·ч, а при тарифе 2,4 рубля за кВт·ч электроэнергии исходя из регламента технического обслуживания вентиляционной сети экономия составляет 17,52 рубля в год.

Дополнительная экономия электроэнергии возникает в режиме ускорения заполнения воздухопровода, когда обеспечивается минимально допустимая согласно [2] длительность запуска ВМП. В годовом эквиваленте эта экономия только от выбора частотного способа запуска составляет 1,63 рубля. Аналогично потребленная энергия при частотном запуске в условиях статической характеристики нагрузки, соответствующей пониженному режиму работы ВМП, составила 282 000 Вт·с, а при импульсном – 292 000 Вт·с, что соответствует экономии 2,4 рубля в год.

Потребляемая во время работы энергия изменяется в пределах от 36,7 до 27,9 кВт при различных характеристиках вентиляционной сети и режимах работы ВМП. При нормальном режиме возможно снизить потребление электроэнергии на 2,5 кВт путем исключения из вентиляционной сети дополнительных сопротивлений, то есть отказа от регулирования производительности вентилятора путем дросселирования, в пониженном режиме работы снижение сопротивления вентиляционной сети позволит получить максимальную экономию потребляемой электроэнергии – 1,8 кВт. Следует отметить, что общий уровень энергопотребления в существенно более широких пределах меняется при регулировании производительности вентилятора различными способами. Так, при работе с номинальной производительностью в пониженном режиме потребление электроэнергии на 8,8 кВт ниже, чем при работе с той же производительностью в нормальном режиме. А при работе с минимальной подачей, полученной путем регулирования производительности ВМП дросселированием, потребление электроэнергии составляет 19,2 кВт, в то же время, если регулировать производительность с помощью ПЧ, потребление энергии будет составлять 2,75 кВт, что дает существенную экономию, равную примерно 158 000 рублей в год.

Выводы

Результаты моделирования показали, что частотный способ пуска ВМП позволяет снизить динамические нагрузки на электродвигатель и вентиляционную установку в целом за счет более плавного заполнения вентиляционной сети. Это позволит уменьшить время запуска, снизить энергопотребление.

Из экономических расчетов следует, что применение частотного регулирования только для пуска нецелесообразно, так как экономия

электроэнергии незначительна и финансовые затраты на внедрение преобразователя частоты оказываются неоправданно велики по сравнению с экономическим эффектом.

Таким образом, целесообразным является применение преобразователя частоты не только для запуска ВМП, но и для регулирования производительности вентилятора, что может дополнительно сэкономить как электроэнергию, так и ресурс ВМП и ВС, тем самым повышая экономический эффект от внедрения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года : [гос. программа РФ: утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 года, № 2446-р]. – Режим доступа: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energoeffektivnost/documents/index.php?>
2. Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах : утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 1 декабря 2011 г. N 678. – Режим доступа: gosnadzor.ru/about_gosnadzor/legal/678.doc
3. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
4. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1987. – 247 с.
5. Ушаков, К. З. Аэрология горных предприятий / К. З. Ушаков, А. С. Бурчаков, Л. А. Пучков, И. И. Медведев. – М.: Недра, 1987. – 421 с.
6. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

MATHEMATICAL MODELING OF
ELECTRICALLY DRIVEN LOCAL VENTILATION
FAN START UP

I. P. Maslov, I. Yu. Semykina

The article reviews the dynamics of transient processes for possible variants of local ventilation fan with electric drive starting, also comparison of energy efficiency of these start variants is made.

The work was done with financial support of Russian Federation Ministry of Education and Science within the Russian Federation Presidential grant for the state support of young Russian scientists – candidates of sciences (code MK-1963.2013.8).

Key words: LOCAL VENTILATION FAN, ELECTRIC DRIVE, FREQUENCY CONTROL, ENERGY EFFICIENCY, SAFETY

Маслов Иван Петрович
e-mail: ivan-maslov@yandex.ru

Семькина Ирина Юрьевна
e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru