

УДК 621.3

*О.Б. Шонин, В.С. Пронько*

## **МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ПРИВОДЕ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ**

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

## **MINIMIZATION OF ENERGY LOSSES IN VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVE OF MAIN MINE FANS**

Статья посвящена энергосберегающим алгоритмам скалярного частотного управления асинхронным приводом вентилятора главного проветривания. На основе модели двигателя и модели системы частотного управления вентилятором получены зависимости потерь энергии от потокосцепления для различных рабочих точек привода, позволившие сформулировать оптимальный закон управления. Рассмотрен энергосберегающий закон управления, основанный на градиентном алгоритме поиска минимума потерь. Выполнено моделирование оптимального алгоритма пуска двигателя, позволяющего снизить потери энергии и повысить коэффициент мощности.

ШАХТНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ; ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД; МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ; МЕТОД ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА; ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПУСКА.

The paper is devoted to the substantiation of energy saving algorithms for a scalar frequency control system of a main mine fan drive. The algorithms have been based upon dependencies of energy losses on flux linkage which enabled to formulate an optimal control law. These dependencies have been derived from results of simulation on the basis of a drive model which takes into account all kinds of energy losses. Minimization of energy losses has been implemented by a gradient algorithm search method of loss function extremum. Modeling of an optimal algorithm for starting the motor has revealed reduction of energy losses and improvement of the power factor.

MINE VENTILATION; ENERGY SAVING; VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES; MINIMIZATION OF ENERGY LOSSES; SEARCH METHOD; OPTIMUM START-UP ALGORITHM.

На проветривание подземных выработок тратится до 50 % от общей энергии, потребляемой горным предприятием, а доля затрат на вентиляцию в себестоимости продукции достигает 30 %. Высокая энергоемкость процесса вентиляции шахт — следствие низкой энергетической эффективности главных вентиляционных установок (ГВУ) шахт и больших потерь на различных стадиях преобразования и передачи энергии.

Основная возможность повышения энергетической эффективности ГВУ шахт связана с реализацией современной концепции проветривания в соответствии с реальной потребностью шахты в свежем воздухе, зависящей от особенностей того или иного этапа ведения горных работ. Второй по значимости энергетический

эффект дает минимизация потерь в вентиляторах главного проветривания (ВГП), которые в большинстве работают с эксплуатационным КПД  $\eta = 30\text{--}40\%$  ниже границы области промышленного использования  $\eta = 60\%$ .

В работе [1] рассмотрены методы повышения КПД за счет использования частотного или комбинированного методов управления ВГП и выбора вентилятора из условия совпадения траектории годовых рабочих точек проветривания в координатах «давление — производительность» с линией движения точек с максимальным значением КПД при частотном методе управления. Для реализации этих методов предложено использовать высоковольтный частотно-регулируемый электропривод ВГП, построенный на

базе многоуровневого инвертора и многоуровневого активного выпрямителя. Частотное регулирование дает возможность не только повысить эксплуатационный КПД вентилятора, но и минимизировать потери энергии в приводе за счет использования экстремальных законов управления [2]. Минимизация потерь в приводе дает дополнительный энергосберегающий эффект. Поэтому разработка оптимальных законов управления и их реализация в составе существующих систем управления — актуальная задача.

Цель нашей работы — исследовать потери энергии в приводе при различных режимах работы вентилятора и построить на этой основе оптимальный закон управления. Дополнительная задача — оценить величину снижения потерь энергии при пуске двигателя за счет использования оптимального алгоритма пуска.

### Система скалярного частотного управления приводом вентилятора главного проветривания шахт

Управление ВГП, реализующее комплекс энергосберегающих мероприятий, осуществляется многоцелевой системой управления, описание которой дано в работе [1]. В настоящей статье рассмотрены отдельные аспекты этой системы: способ регулирования и стабилизации режима работы вентилятора в условиях изменения параметров вентиляционной сети и метод оптимального управления двигателем по критерию минимума потерь.

Количество воздуха, подаваемого в выработку, определяется шахтной системой контроля на основании плана ведения горных работ, состава шахтной атмосферы, количества рабочего персонала и пр. Объем подаваемого воздуха из-

меняется в зависимости от этапа ведения горных работ. В таких условиях ГВУ должна обеспечивать возможность оперативного регулирования производительности в широких пределах.

Существенное влияние на режим проветривания оказывают случайные колебания параметров вентиляционной сети, связанные с изменением температуры наружного воздуха, движением внутришахтного транспорта, открытием/закрытием дверей и перемычек. В связи с этим возникает задача стабилизации режима проветривания. С целью оперативного регулирования и стабилизации режима проветривания ВГП снабжается системой автоматического управления.

Система управления имеет подчиненную структуру и состоит из двух контуров (рис. 1). Внешний контур поддерживает заданную производительность вентилятора. Для этого сигнал датчика производительности сравнивается с заданием. По полученной ошибке регулятор формирует задание по скорости двигателя для внутреннего контура. Использование ПИ-регулирования позволяет исключить статическую ошибку и отклонение от заданного режима проветривания при возмущениях в вентиляционной сети.

Внутренний контур регулирует скорость двигателя и фактически является скалярной системой управления частотно-регулируемым электроприводом с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). По текущему рассогласованию скорости система формирует амплитуду и частоту модулирующего сигнала ШИМ, которые определяют амплитуду и частоту первой гармоники напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН). В традиционном

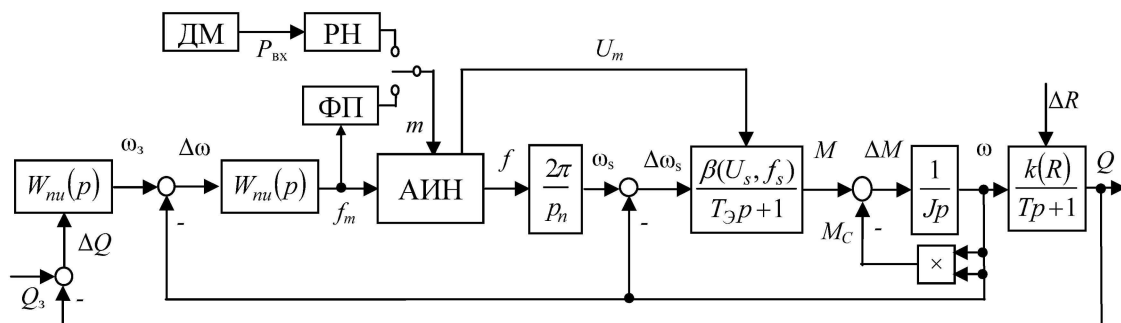


Рис. 1. Структурная схема системы управления вентилятором:

ДМ — датчик мощности, РН — регулятор напряжения, ФП — функциональный преобразователь, АИН — автономный инвертор напряжения

электроприводе амплитуда и частота жестко связаны законом управления, определяющим напряжение на выходе функционального преобразователя (ФП) (см. рис.1), на вход которого подается сигнал частоты. Для вентиляторов наиболее распространенным законом является зависимость  $U/f^2 = \text{const}$ .

В работе предложен энергосберегающий метод управления приводом, при котором оптимальный режим работы достигается изменением потокосцепления двигателя при компенсации отклонения по скорости двигателя за счет регулирования частоты внутренним контуром системы управления.

Рассмотрим передаточные функции системы, показанной на рис. 1. Асинхронный двигатель учтен передаточными функциями электрической и механической частей двигателя [4]:

$$W_{\text{эл}}(p) = \frac{M(p)}{\Delta\omega_s(p)} = \frac{\beta}{T_3 p + 1};$$

$$W_{\text{мех}}(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{M - M_c}{Jp}. \quad (1)$$

Здесь  $\beta = 2M_k / \omega_{s0} s_k$  — жесткость характеристики;  $T_3 = 1 / \omega_{s0} s_k$  — постоянная времени;  $J$  — момент инерции на валу двигателя;  $M_c$  — момент сопротивления;  $M_k$  — критический момент;  $s_k$  — критическое скольжение;  $\omega_{s0}$  — номинальная частота вращения поля статора;  $\Delta\omega_s = (\omega_s - \omega)$ ;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора.

Передаточная функция объекта управления получена из уравнения режима работы вентилятора на сеть. При аэродинамическом способе управления рабочая точка определяется пересечением характеристики вентиляционной сети  $H(Q) = RQ^2$  и рабочей характеристики вентилятора  $H(Q) = a_0 Q^2 + a_1 Q + a_2$ , где  $R$  — сопротивление сети,  $a_j$  — коэффициенты, зависящие от угла наклона лопаток направляющего аппарата. При частотном управлении согласно законам подобия имеем  $RQ^2 = a_0 Q^2 + a_1 Q\omega + a_2 \omega^2$  [1]. Решение этого уравнения относительно  $Q$  дает

$$Q(\omega, R) = \omega k(R);$$

$$k(R) = \left( a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - R)} \right) / 2(R - a_0). \quad (2)$$

Тогда передаточная функция приобретает вид

$$W_{\text{оы}}(p) = Q(p) / \omega(p) = k(R) / (Tp + 1), \quad (3)$$

где  $T$  — постоянная времени, учитывающая инерционность процессов в вентиляторе и сети.

Работа системы управления рассмотрена на примере привода двигателя 4A355M4Y3 со следующими параметрами:  $P = 315$  кВт;  $U = 660$  В;  $f_0 = 50$  Гц,  $\omega_{s0} = 157$  с<sup>-1</sup>;  $M_k = 4414$  Нм;  $s_k = 0,05$ ;  $J = 8$  кгм<sup>2</sup>,  $c = 76,4$ ;  $p_n = 2$ . Параметры схемы замещения:  $R_1 = 0,012$  Ом,  $R_2 = 0,014$  Ом,  $L_{1\sigma} = 3,1 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $L_{2\sigma} = 3,4 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $R_m = 280$  Ом,  $L_m = 0,018$  Гн. Механическая нагрузка привода определяется вентиляторной характеристикой. В качестве объекта управления использован вентилятор ВО-14:  $T_{\text{оы}} = 10$  с,  $R_{\text{ном}} = 2,375$ ,  $k_{\text{оы}}(R_{\text{ном}}) = 0,255$ . Настройки регуляторов:  $T_{\text{пи}\omega} = 0,5$  с;  $k_{\text{пи}\omega} = 0,127$ ;  $T_{\text{пи}Q} = 0,2$  с;  $k_{\text{пи}Q} = 0,14$ .

Исследования проводились с помощью компьютерной модели асинхронного двигателя в пакете MATLAB/Simulink, которая учитывала нелинейность контура намагничивания и позволяла в соответствии с работой [5] отдельно определять потери от гистерезиса и потери от вихревых токов.

#### Влияние режима работы вентилятора на потери энергии в приводе

Для получения оптимальных законов управления сначала определялись потери энергии в приводе при независимом изменении потокосцепления для различных режимов работы вентилятора. При изменении потокосцепления скорость вращения ротора поддерживается постоянной за счет автоматического изменения частоты напряжения статора контуром регулирования скорости. Производительность и соответствующая скорость двигателя изменялись в диапазоне 40–100 % от номинальных значений.

На рис. 2 представлены графики потерь в стали и меди двигателя, полученные при поддержании скорости вращения  $\omega = 0,8\omega_0$  и варьирования потокосцепления двигателя. Как видно из графиков, при уменьшении потокосцепления от номинального значения потери в стали растут, потери в меди уменьшаются, а суммарные потери имеют минимум  $P_{\text{тmin}}$  при оптимальном значении потокосцепления  $\psi_e = 0,52\psi_0$ . Подобным образом ведут себя зависимости суммарных потерь от потокосцепления и для других значений скорости двигателя (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что оптимальное потокосцепление и соответствующий минимум потерь изменяются в зависимости от режима работы привода. Кривой  $P_{\text{тmin}}(\psi_e)$  (линия 1 на рис. 3),

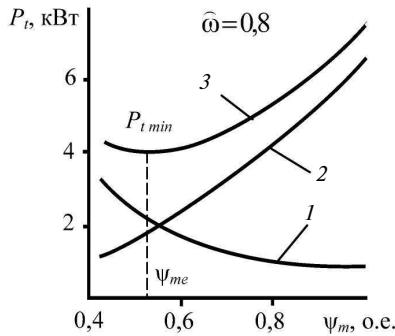


Рис. 2. Зависимость потерь в стали (1), меди (2) и суммарных потерь (3) от потокосцепления

проведенной через точки экстремумов, можно поставить в соответствие зависимость оптимального потокосцепления от скорости, которую можно выразить в виде скалярного закона управления, обеспечивающего режим минимальных потерь в приводе. В относительных единицах этот закон для исследуемой модели имеет вид  $U/f^{1,56} = 0,58$ . Для сравнения на рис. 3 показана мощность потерь (кривая 2) при традиционном законе скалярного управления для вентиляторной нагрузки привода:  $U/f^2 = 1$ . Сравнение потерь, соответствующих кривым 1 и 2 на рис. 3, показывает, что использование оптимального закона управления приводом позволяет снизить потери энергии на 5–10 % по сравнению с традиционным законом управления.

Оптимальный закон управления может быть непосредственно реализован в функциональном преобразователе ФП (см. рис. 1). Однако полученный закон справедлив именно для рассмотренного типа двигателя и не является общим. Для другого двигателя необходимо повторение процедуры вывода закона управления.

Экстремальный закон управления может быть осуществлен путем непосредственного вычисления оптимального значения потокосцепления по математической модели двигателя, заложенной в память микропроцессорного устройства [6]. Однако для нахождения оптимума требуется знание точных моделей многих видов потерь, учитывающих нелинейный характер намагничивания, температурную и частотную зависимости параметров двигателя и другие факторы. Это приводит к усложнению системы управления и необходимости применять адаптивный наблюдатель координат [7].

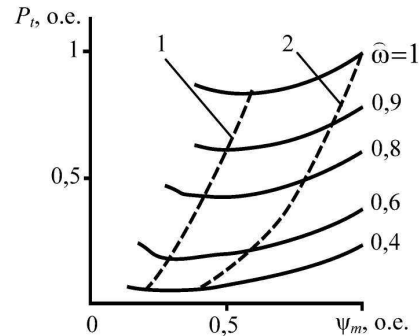


Рис. 3. Потери энергии при различных скоростях двигателя при оптимальном (1) и традиционном (2) законах управления

В работе использован итерационный метод поиска минимума потерь, лишенный указанных недостатков. Этот метод позволяет минимизировать потери энергии как в инверторе, так и двигателе [8]. Оптимальный режим работы двигателя определяется непосредственно во время работы привода.

#### Энергосберегающий алгоритм управления частотно-регулируемым приводом

В методе поиска используется регулятор напряжения РН (см. рис. 1), входным сигналом для которого служит мощность привода, измеряемая датчиком мощности ДМ через равные промежутки времени. По одному из алгоритмов регулятор ищет значение потока, при котором измеренная мощность будет минимальной для данной рабочей точки привода, определяемой скоростью и моментом. Минимум входной мощности соответствует минимуму потерь. К достоинствам данного метода относится инвариантность алгоритма к параметрам двигателя и их изменению в процессе работы.

Рассмотрим двухэтапный градиентный алгоритм поиска экстремума функции потерь, структурная схема которого показана на рис. 4.

На первом этапе грубого поиска определяется область, в которой находится экстремум. Отправной точкой поиска является начальное значение потокосцепления. На каждой итерации потокосцепление снижается на фиксированный шаг  $\Psi_i = \Psi_{i-1} + \Delta\Psi$  и затем вычисляется производная мощности  $\nabla P_i = (P_i - P_{i-1}) / (\Psi_i - \Psi_{i-1})$  ( $\Psi_i$ ,  $P_i$  — потокосцепление и мощность на  $i$ -й итерации поиска), которая сравнивается с производной  $\nabla P_{i-1}$ , полученной на предыдущей

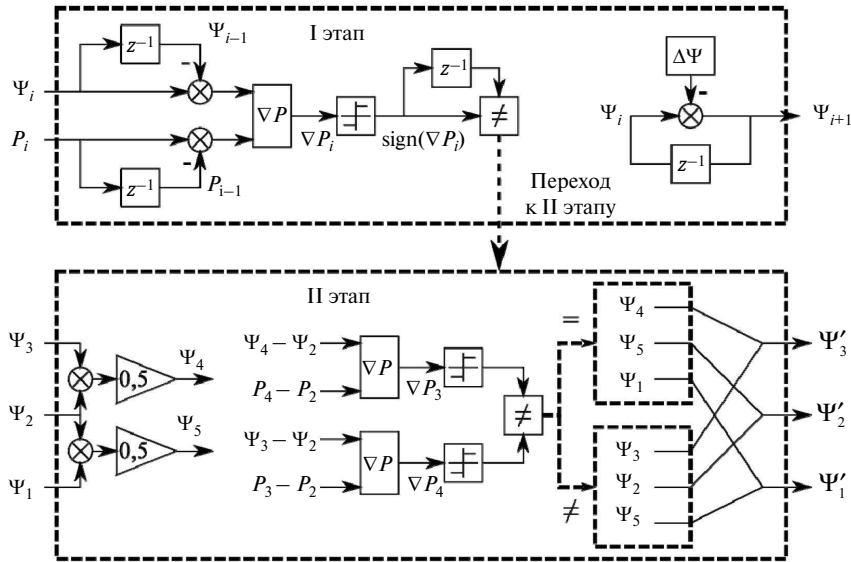


Рис. 4. Структурная схема регулятора напряжения, использующая градиентный алгоритм поиска

итерации. Различие знаков —  $\text{sign}(\nabla P_i) \neq \text{sign}(\nabla P_{i-1})$  — означает, что минимум находится в диапазоне  $[\Psi_i; \Psi_{i-2}]$ .

На второй фазе алгоритма происходит уточнение обнаруженной области. Работу алгоритма при этом иллюстрирует рис. 5, на котором показан момент времени непосредственно после перехода ко второму этапу поиска. Минимум мощности содержится в области  $[\Psi_3; \Psi_1]$ .

Последними точками, проверенными при поиске, являются точки  $\Psi_3$  и  $\Psi_2$  с соответствующими значениями производных —  $\nabla P_3$  и  $\nabla P_2$ . Алгоритм определяет значение мощности в точке  $\Psi_4 = (\Psi_3 + \Psi_2)/2$  и вычисляет соответствующую производную —  $\nabla P_4 = (P_4 - P_2)/(\Psi_4 - \Psi_2)$ . В результате сравнения производных  $\nabla P_4$  и  $\nabla P_3$  опре-

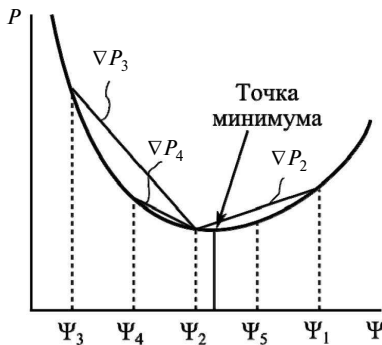


Рис. 5. К уточнению области поиска минимума мощности

деляется новый диапазон поиска экстремума. Если выполняется условие  $\text{sign}(\nabla P_4) = \text{sign}(\nabla P_3)$ , то поиск сужается до диапазона  $[\Psi_4; \Psi_1]$ . В противном случае минимум расположен в области  $[\Psi_5; \Psi_3]$ .

Иллюстрация работы градиентного метода поиска, использующего данные, полученные с помощью рассмотренной ранее модели привода, представлена на рис. 6. Потокосцепление намагничивающего контура изменяется от номинального значения до оптимального с 5 %-м шагом. Шаг по времени выбран из условия завершения переходного процесса в двигателе, вызванного изменением напряжения на предыдущем шаге. В исследуемой модели изменение потокосцепления происходило с интервалом 1,5 с.

Из диаграмм, представленных на рис. 6, следует, что время поиска экстремума составляет порядка 20 с. Это время намного меньше интервала времени между возможными изменениями механической нагрузки привода, соответствующим относительно медленным процессам изменения режима проветривания подземных работ.

### Минимизация потерь энергии при пуске двигателя

Пуск электропривода ВГП с большим моментом инерции на валу занимает продолжительное время и вследствие высоких значений пускового

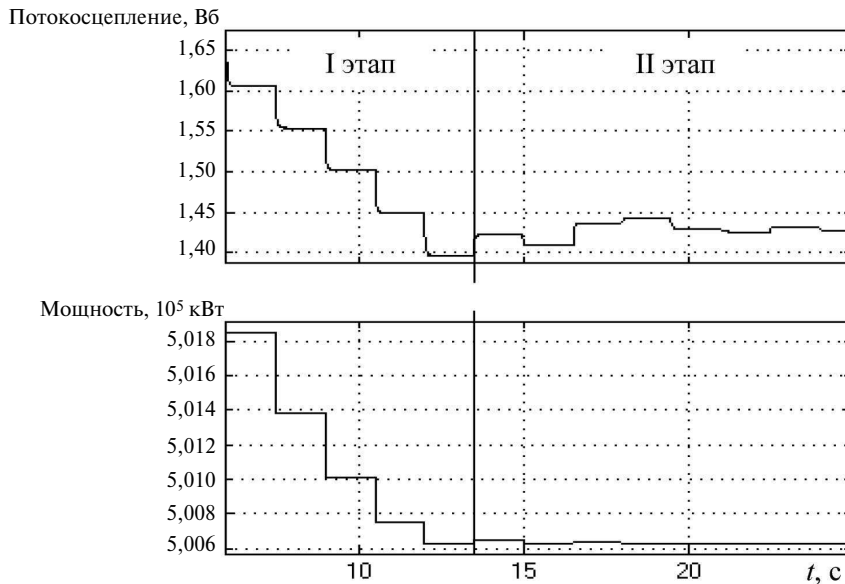


Рис. 6. Переходной процесс при поиске минимума градиентным алгоритмом

тока вызывает провалы напряжения в распределительной сети, а также дополнительные потери энергии. Частично данную проблему решает применение плавного пуска, при котором частота и амплитуда напряжения плавно изменяется по линейному закону от нуля до номинального значения. Показатели пускового режима можно улучшить, используя другие законы управления двигателем. Для иллюстрации возможностей энергосберегающего привода в пусковом режиме использовалась одна из разновидностей законов управления двигателем при пуске, полученных в работе [9] из условия минимизации функции потерь энергии в двигателе:

$$W_{st-l} = \int_0^{t_s} P_t(t) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $P_t$  — мощность потерь,  $W_{st-l}$  — потери энергии за время пуска.

При плавном пуске частота линейно нарастает в течение заданного времени пуска  $t_s$ . Система управления изменяет амплитуду напряжения согласно закону управления исходя из значения частоты в каждый момент времени. Закон управления определяется соотношением между вектором напряжения  $\vec{U} = [0; \vec{U}_1; \vec{U}_2; \dots; U_{20}]^T$  и вектором частоты  $\vec{f} = [0; 0,05; 0,1; \dots; 1]^T$  (рис. 7). После окончания пуска система управления переключается на энергосберегающий алгоритм управления стационарным режимом.

Результаты компьютерного моделирования пуска электропривода мощностью 1,5 МВт при использовании оптимального и традиционного законов управления представлены на рис. 8. Из графиков видно, что применение оптимального закона управления позволяет снизить потери энергии в двигателе за время пуска на 25 % (рис. 8, б). При этом активная мощность двигателя (рис. 8, в) меняется незначительно, а реактивная мощность во время пуска снижается (рис. 8, г), что эквивалентно повышению коэффициента мощности.

Использование частотно-регулируемого привода вентиляторов главного проветривания — необходимое условие реализации современного подхода к организации вентиляции подземного пространства в соответствии с реальными потребностями шахты в свежем воздухе.

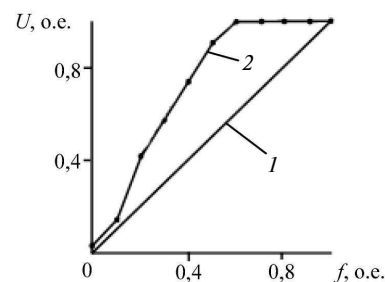


Рис. 7. Графики традиционного (1) и оптимального (2) законов пуска

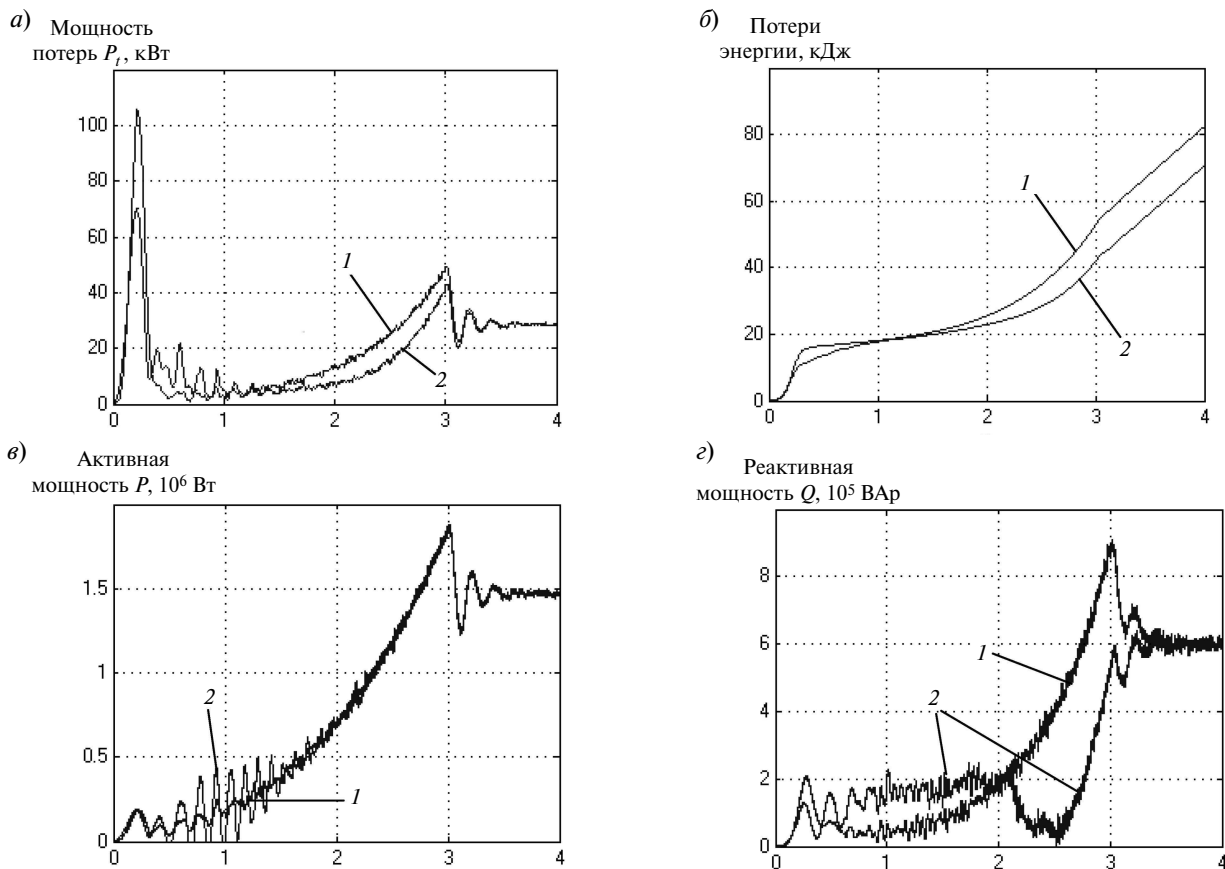


Рис. 8. Сравнение энергетических показателей процесса пуска двигателя при традиционном (кривые 1) и оптимальном (кривые 2) законе управления:

а — мощность потерь, б — потери энергии, в — потребляемая активная мощность и г — потребляемая реактивная мощность двигателя

Применение частотного управления позволяет не только повысить эксплуатационный КПД вентиляторов, но и обеспечить минимизацию потерь в приводе с помощью энергосберегающих алгоритмов управления. На основе компьютерной модели АД и модели скалярной системы управления приводом выявлены зависимости суммарных потерь энергии от потокосцепления при варьировании скорости вращения вала двигателя в пределах области частотного регулирования производительности вентилятора. Полученные зависимости позволили сформулировать экстремальный закон частотного управления, применение которого дает снижение потерь энергии на 5–10 % по сравнению с традиционным законом скалярного управления приводом с вентиляторной нагрузкой. В силу относитель-

но медленного изменения механической нагрузки привода ВГП целесообразно использовать рассмотренный в работе энергосберегающий алгоритм на основе градиентного метода поиска минимума потерь. С помощью компьютерного моделирования показано, что дополнительный энергосберегающий эффект дает применение специальных законов пуска двигателей, позволяющих минимизировать потери энергии в приводе при пуске и повысить коэффициент мощности за счет снижения потребляемой реактивной мощности. Дальнейшее развитие работ связано с повышением быстродействия поисковых алгоритмов на основе нейронных сетей и нечеткой логики, с одной стороны, и обоснования оптимальных алгоритмов пуска на основе генетических алгоритмов, с другой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пронько В.С., Шонин О.Б.** Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. №2(195). С. 49–57.
2. **Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АCADEMIA, 2004. 256 с.
3. **Бесекиерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
4. **Булгаков А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. 3-е изд. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
5. **Виноградов А.В.** Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. № 5. С. 57–61.
6. **Thanga Raj C., Srivastava S.P., Pramod Agarwal.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2009. Vol. 1. №1. P. 107–112.
7. **Вдовин В.В., Панкратов В.В.** Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия ТПУ. 2012. №4. С. 148–153.
8. **Chandan Chakaborty, Minh C. Ta, Toshiuki Uchida, Yoichi Hori.** Fast Search Controllers for Efficiency Maximization of Induction Motor Based on DC Link Power Measurement // *Proceedings of the Power Conversion Conference*, 2002. PCC-Osaka. 2002. P. 402–408.
9. **Браславский И.Я., Костылев А.В., Цибанов Д.В.** Оптимизация пусковых процессов в системе «реальная сеть-ПЧ-АД» // Труды международной 15-ой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург. 2012. С. 175–178.

## REFERENCES

1. **V.S. Pronko, O.B. Shonin.** Povysheniye energeticheskoy effektivnosti glavnykh ventilyatornykh ustanovok shakht na osnove mnogotselevoiy sistemy upravleniya chastotno-reguliruyemym privodom. *NTV SPbGPU*. 2014. № 2(195). S. 49–57. (rus.)
2. **Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N.** Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod. M.: ACADEMIA, 2004. (rus.)
3. **Besekerskiy V. A., Popov Ye. P.** Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. M.: Nauka, 1975.
4. **Bulgakov A.A.** Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami. — 3-ye izd. M.: Energoizdat, 1982. (rus.)
5. **Vinogradov A.V.** Uchet poter vstali, nasyshcheniya i poverkhnostnogo effekta pri modelirovanii dinamicheskikh protsessov v chastotno-reguliruyemom asinkhronnom elektroprivode. *Elektrotekhnika*. 2005. № 5. S. 57–61. (rus.)
6. **Thanga Raj C., Srivastava S.P., Pramod Agarwal.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2009. №1. Vol. 1. P. 107–112.
7. **Vdovin V. V., Pankratov V. V.** Sintez adaptivnogo nablyudatelya koordinat bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda. *Izvestiya TPU*. 2012. №4. (rus.)
8. **Chandan Chakaborty, Minh C. Ta, Toshiuki Uchida, Yoichi Hori.** Fast Search Controllers for Efficiency Maximization of Induction Motor Based on DC Link Power Measurement. *Proceedings of the Power Conversion Conference*, 2002. PCC-Osaka 2002. P. 402–408.
9. **Braslavskiy I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V.** Optimizatsiya puskovykh protsessov v sisteme «realnaya set-PCh-AD». *Trudy mezhdunarodnoy 15-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Elektroprivody peremennogo toka”*. Yekaterinburg, 2012. S. 175–178. (rus.)

## 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