

# Обоснование использования энергоэффективного оборудования для угольной промышленности



**В. М. МАМАЛЫГА,**  
канд. техн. наук  
(НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Основные фонды угольных предприятий Украины в значительной степени технически устарели и физически изношены. Поэтому, принимая во внимание непрекращающийся рост стоимости энергоресурсов, актуально использование энергоэффективного оборудования для технического и технологического перевооружения отрасли. Вместе с тем современное энергоэффективное оборудование не всегда и не везде экономически и технологически целесообразно, особенно исходя из требований техники безопасности. Остановимся на этом подробнее, учитывая специфику угольных предприятий, для которых, в сравнении с предприятиями других отраслей промышленности, на первом месте – необходимость обеспечения взрыво- и пожаробезопасного исполнения оборудования и материалов.

**Регулируемый и нерегулируемый электропривод.** На долю электропривода приходится основная часть всей потребляемой угольными предприятиями электроэнергии. Поэтому он главный резерв снижения потребления электроэнергии на предприятиях отрасли. Вопросы выбора системы электропривода регламентирует ДСТУ 3886–99 [1], устанавливающий алгоритм выбора и расчета привода. При этом технические и технологические требования, как и требова-

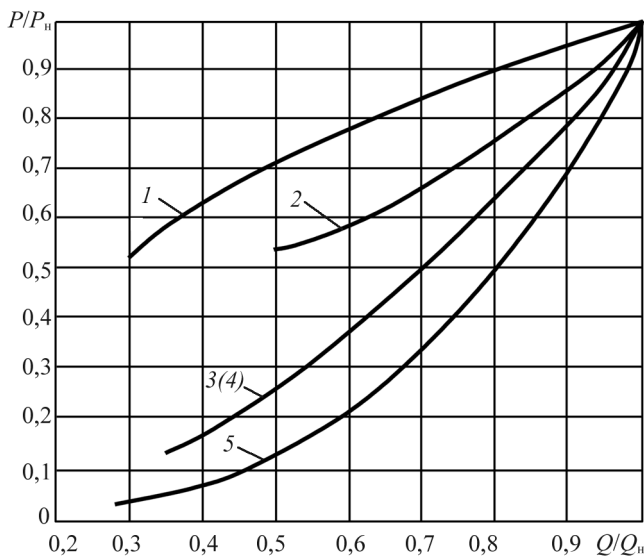
ния к условиям эксплуатации, не менее важны. Отметим, что в условиях повышенной взрыво- и пожароопасности невозможно использовать системы электропривода постоянного тока из-за наличия в двигателях коллекторно-щеточного узла, а также статические преобразователи, поскольку они выпускаются не во взрыво- и пожаробезопасном исполнении. Анализ показывает, что для угольных шахт возможно применение только асинхронных двигателей. Для создания систем регулируемого привода можно использовать асинхронные двигатели с фазным ротором, серийно изготавливаемые в Украине (например, серия двигателей «Украина»). Тогда скорость регулируют с помощью жидкостных реостатов во взрыво- и пожаробезопасных исполнениях.

Другой возможный вариант – система регулятор напряжения – асинхронный короткозамкнутый двигатель с обратной связью по скорости двигателя. Опыт производства регуляторов во взрыво- и пожаробезопасном исполнении также есть в Украине. Однако сегодня такие регуляторы не используют в системах регулируемого привода в связи с невысокой квалификацией проектировщиков, отсутствием средств на получение необходимых испытаний и согласований (например, с МакНИИ), а также

заангажированностью разработчиков. В условиях отсутствия взрыво- и пожароопасности (например, на поверхности) возможно применение как электромашинных систем электропривода (генератор–двигатель), так и статических преобразователей постоянного и переменного тока, что подтверждается на практике.

**Энергосберегающие двигатели.** Промышленно развитые страны содействуют переходу от двигателей общепромышленного исполнения к энергосберегающим. Политика ЕС по отношению, например к Польше, выражается в стимулировании производства энергоэффективных двигателей. При этом заводам, изготавливающим энергоэффективные двигатели, компенсируют до 20 % их стоимости с тем, чтобы они производили и продавали именно такие двигатели, а не традиционного исполнения.

В среднем КПД и коэффициент мощности энергосберегающих (энергоэффективных) двигателей мощностью 2–3 кВт на 3–5 % выше, чем двигателей общепромышленного исполнения. В сравнении с двигателями общепромышленного исполнения энергосберегающие двигатели имеют на 30–35 % больше желе-



**Рис. 1.** Сопоставление экономичности регулирования производительности механизмов с «вентиляторным» характером нагрузки: 1 – дросселирование; 2 – поворот лопаток направляющего аппарата; 3 – регулируемые гидромуфты или электромагнитные муфты скольжения; 4 – изменение сопротивления в цепи ротора асинхронного электродвигателя; 5 – регулирование скорости вращения турбомашин без потерь (идеальная кривая);  $P$  – фактически развиваемая механизмом мощность;  $P_n$  – номинальная мощность механизма;  $Q$  – фактическая производительность (подача) механизма;  $Q_n$  – номинальная производительность (подача) механизма.

за, на 20–25 % – меди и на 10–15 % – алюминия. С учетом более дорогой и совершенной изоляции, а также более совершенных и дорогих технологий, которые характерны в производстве энергосберегающих двигателей, их стоимость на 20–50 % выше стоимости обычных электрических машин. Кроме того, чтобы получить экономический эффект от энергоэффективных двигателей, необходимо обеспечить их максимально возможную загрузку, что предполагает использование средств защиты, стоимость которых для двигателей мощностью до 3–5 кВт может быть больше стоимости двигателей, что вряд ли приемлемо, поскольку стоимость средств защиты, как правило, не должна превышать 10 % стоимости защищаемого двигателя. Только для двигателей мощностью 50–100 кВт стоимость защитных устройств будет не больше 10 % стоимости двигателя, однако КПД и коэффициент мощности двигателей такой мощности отличаются от двигателей обычного исполнения на 0,5–1 %, т. е. экономия незначительна.

Несложные расчеты показывают, что при действующих в Украине тарифах на электроэнергию и реальных сроках службы электрических машин мощностью 2–3 кВт энергосберегающие двигатели не окупают себя за период эксплуатации. Однако в развитых странах эти двигатели широко применяют, поскольку законодательство стимулирует именно энергосберегающее оборудование. Следует также отметить хорошее качество аппаратуры защиты двигателей в этих странах, благодаря чему возможна эксплуатация электродвигателей при более высоких коэффициентах загрузки на протяжении значительного периода времени. В Украине экономическое и законодательное стимулирование энергосбережения весьма несовершенно. Поэтому энергосберегающие двигатели в угольной промышленности в ближайшие годы будут нецелесообразны, особенно с учетом отсутствия защищенных исполнений, требующихся для шахт.

В настоящее время на рынке постсоветских стран ведется активная маркетинговая кампания, способствующая использованию систем электропривода с преобразователями частоты, которые в шахтных условиях не применяют, но они могут быть нужны на поверхности. Проанализируем необходимость их использования для случая отсутствия взрыво- и пожароопасности в местах установки. Зависимости, отражающие затраты мощности ( $P/P_n$ , отн. ед.) на регулирование подачи ( $Q/Q_n$ , отн. ед.) механизмов с «вентиляторным» характером нагрузки [2] различными способами, представлены на рис. 1.

Анализ показывает, что наиболее рациональный способ регулирования производительности лопастных машин – экономичное регулирование скорости вращения приводных двигателей. Для достижения 50 %-ной экономии нужна продолжительная работа со сниженной минимум на 40–50 % производительностью. Это обусловит работу установки с пониженным более чем на 3–5 % КПД, так как она функционирует не в номинальном режиме. Для диапазонов регулирования скорости вращения электродвигателя  $0,5\omega_n \leq \omega \leq \omega_n$  (где  $\omega_n$  – номинальная частота вращения приводного двигателя) более целесообразно использование преобразователей частоты, а схемы асинхронно-вентильного каскада. При меньшем снижении скорости вращения электродвигателей (на 15–20 % ниже номинальной) целесообразность применения преобразователей частоты еще более сомнительна.

Тип лампы	Цена, грн	Дисконтированные затраты <i>NPV</i> , грн, при стоимости денег, % годовых		
		10	15	20
<i>Средняя продолжительность работы 1,5 ч в сутки</i>				
Накаливания мощностью 40 Вт	2	237,54	156,05	115,37
Светодиодная	99	127,13	117,4	112,54
Энергоэффективная	13,15	68,12*	48,22*	38,51*
Галогенная	2,58	166,29	109,47	81,12
<i>Средняя продолжительность работы 8 ч в сутки</i>				
Накаливания мощностью 40 Вт	2	1070	823,72	662,51
Светодиодная	99	226,59*	197,15*	177,89*
Энергоэффективная	13,15	274,94	213,86	173,78
Галогенная	2,58	746,81	575,08	462,67

Примечание. Звездочкой в таблице обозначены лампы, которые в данном случае целесообразно применить.

Сторонники преобразователей частоты считают, что этой технике нет альтернативы при необходимости регулирования подачи от нуля до номинального значения. Поскольку при работе двигателя на пониженных скоростях вращения КПД системы привода снижается на 5–15 % и более, следует проанализировать возможность использования многоагрегатных насосных (компрессорных) станций, которые позволяют ступенчато регулировать подачу посредством включения/отключения одной или нескольких установок. Так, на насосных станциях горно-обогачительных комбинатов и водоканалов работают по 5–10 насосов. В энергетике также могут параллельно работать насосные установки на общий трубопровод. Есть несколько вариантов регулирования подачи таких насосных станций [3, 4]:

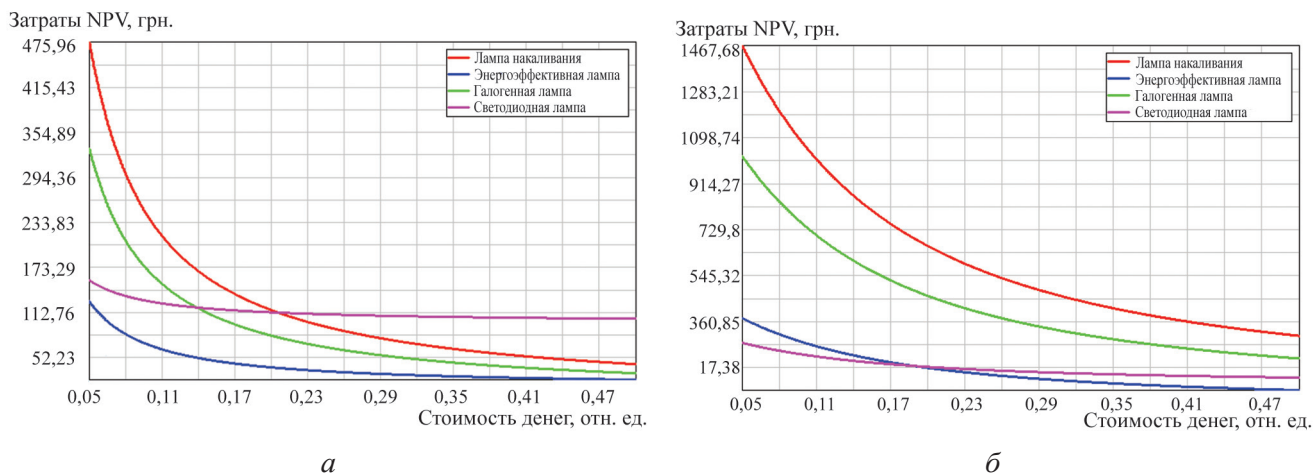
- использование преобразователя частоты для регулирования подачи одного из насосов, а также для последовательного запуска всех насосных агрегатов;
- применение дополнительных насосов дробной мощности (работой последних при этом управляет соответствующий преобразователь).

Возможны и другие варианты. При этом подачу и согласование режимов работы отдельных насосов можно регулировать экономически обоснованным сочетанием разных способов: от дросселирования в небольшом диапазоне до применения преобразователей частоты.

Для преобразователей частоты необходимы двигатели специального исполнения (более дорогие, чем двигатели общепромышленного исполнения, и нередко большей мощности для рассеивания

дополнительных потерь, обусловленных работой преобразователя). Выбирая систему электропривода, нужно следовать рекомендациям, предлагаемым в работах [1, 5]. При использовании систем регулируемого электропривода на угольных предприятиях в соответствии с алгоритмом выбора и расчета привода, регламентируемого ДСТУ [1], надо принимать во внимание условия эксплуатации (опасность пожара и взрыва вследствие наличия угольной пыли, возможных выбросов газа и попадания воды), что затрудняет применение преобразователей частоты. Это подтверждается на практике, когда в шахтах используют в основном реостатные способы регулирования, а также гидравлические муфты скольжения. Таким образом, решение о применении преобразователей частоты следует принимать, основываясь не только на экономической целесообразности (если это будет доказано), но и на специфике предприятий отрасли.

**Дросселирование (введение задвижек в трубопровод).** Принято полагать, что дросселирование экономически невыгодно. Чтобы понять ошибочность этого утверждения, достаточно проанализировать положение зависимостей 1 и 5 на рис. 1. Учитывая КПД преобразователя частоты в номинальном режиме (не больше 0,95–0,97 даже для очень мощных установок), убедимся, что при регулировании производительности лопастных машин в диапазоне от 95 – 97 % до номинального значения, исходя из затрат энергии, дросселирование целесообразнее, чем применение самого современного преобразователя частоты. Если же принять во внимание соотношение стоимостей дросселя (задвижки) и преобразователя частоты, то окажется,



**Рис. 2.** Зависимость затрат на реализацию разных вариантов системы освещения, которые могли бы быть приняты в качестве альтернативы лампам накаливания мощностью 40 Вт при работе в сутки: а – 1,5 ч; б – 8 ч.

что даже при самых высоких ценах на электроэнергию, дросселирование экономичнее по сравнению с системой преобразователь частоты – двигатель в диапазоне примерно от 90 – 92 % до номинального значения. При этом надежность дросселя намного выше надежности любого преобразователя. Кроме того, как уже указывалось, применение преобразователей частоты для угольных предприятий не всегда возможно по требованиям техники безопасности.

**Энергоэффективные лампы.** Выбирая перспективный вариант системы освещения, следует руководствоваться рекомендациями ДСТУ [6]. При этом важны следующие факторы [7]:

- примерно одинаковый световой поток (погрешность не превышает  $\pm 5\%$ ) сравниваемых ламп;

- стоимость ламп при выборе перспективного варианта системы освещения;

- тариф на электроэнергию для конкретного предприятия\*;

- средняя за год продолжительность работы лампы в течение суток;

- срок службы лампы по паспорту (если отсутствует информация о сроках службы ламп, используемых или перспективных для применения на конкретном предприятии);

- стоимость денег для модернизации системы освещения (стоимость кредитных ресурсов, внутренняя норма рентабельности конкретного предприятия);

\* Примеры расчетов представлены для одного из предприятий г. Донецка в ценах 2012 г.

одинаковый расчетный период эксплуатации возможных вариантов системы освещения (нередко принимается срок службы наиболее долговечных светодиодных ламп);

количество ламп разных типов (накаливания, светодиодные, энергоэффективные и галогенные) при реализации альтернативных вариантов системы в течение расчетного периода эксплуатации возможных вариантов системы освещения (определяется сроком их службы).

При выборе системы освещения в качестве альтернативной следует рассматривать ту, при которой сравниваемые лампы имеют примерно одинаковый световой поток (погрешность не превышает  $\pm 5\%$ ). Наиболее перспективен вариант, требующий минимальных дисконтированных затрат NPV.

Проведем расчеты для уровней стоимости денег 10 % (0,1), 15 % (0,15) и 20 % (0,2) годовых. Ориентировочно принята стоимость денег, характерная для сравнительно невысокой рентабельности отечественных предприятий, и тот процент, на который они могли бы рассчитывать на рынке кредитных заимствований, а также с учетом доступных в Украине кредитных линий иностранных банков. Реальная рентабельность деятельности отечественных предприятий – конфиденциальная информация. В связи с этим, как правило, можно оперировать только предположительными (экспертными) ее значениями. Графики зависимости дисконтированных затрат NPV для разных типов ламп от стоимости привлекаемых для совершенствования си-



стемы освещения денег показаны на рис. 2, а, б\*. Поэтому, зная фактическую стоимость денег, можно обоснованно выбрать наиболее перспективный вариант системы освещения (таблица).

При стоимости денег меньше 19 % годовых (см. рис. 2) оправдано использование светодиодных ламп, а в случае их большей стоимости – энергоэффективных.

Анализ зависимостей (см. рис. 2, а, б) показывает, что по мере роста продолжительности работы ламп в течение суток более перспективны энергоэффективные лампы.

Вопрос перспективности того или иного решения об использовании ламп меняется с течением времени. Например, выполненный в ценах 1997 г. с учетом рекомендаций ДСТУ [6] расчет показал, что энергоэффективные лампы по сравнению с лампами накаливания (при работе 24 ч в течение суток) будут экономически оправданными только в случае возможности использования дешевых кредитных ресурсов (дешевле, чем 13,7 % годовых). Дальнейший анализ подтвердил, что при реальной в 1997–1998 гг. в Украине стоимости кредитных ресурсов использование энергоэффективных ламп было бы экономически целесообразно только при росте тарифов на электроэнергию в 3 – 4 раза.

Аналогичные расчеты, выполненные специалистами предприятия «Электромеханика» (г. Киев) при проведении энергоаудита Киевского метрополитена (в среднем 20 ч работы осветительных установок в сутки), показали, что по состоянию на лето 2002 г. наиболее эффективными были люминесцентные лампы (даже с учетом затрат на их утилизацию – демеркуризацию), затем энергоэффективные, а наибольших затрат требовали лампы накаливания. Таким образом, изменение уровня цен и тарифов на электроэнергию влияет на экономические показатели использования осветительных устройств разных типов, что обуславливает и изменение приоритетов при приобретении осветительных устройств. Высокая взрыво- и пожароопасность, характерная для угольных предприятий, может внести свои коррективы в выбор типа осветительных устройств. Так, из соображений безопасности для освещения подземных выработок традиционно используют лампы накаливания. Поэтому применять лампы других типов, несмотря на лучшие экономические показатели, можно только для офисных и административно-бытовых поме-

щений на поверхности, где отсутствует взрыво- и пожароопасная среда.

**Ветроустановки.** Эти установки предназначены для получения электроэнергии за счет энергии ветра. Иногда проектируют создание для угольных предприятий дополнительных генерирующих мощностей на основе ветроустановок. Принятие решения об использовании ветроустановок должно основываться на их экономической целесообразности.

Значительны достижения ветроэнергетики в Дании, Германии, Австрии и в других промышленно развитых странах. Как пример рассмотрим одну из коммун Дании, в которой более 10 лет назад взяли кредит (8 % в год) и установили ветрогенератор мощностью 200 кВт (стоимость  $\approx$  200 тыс. евро). В среднем ветрогенератор вырабатывает 5 млн кВт·ч в год, что при стоимости 1 кВт·ч электроэнергии 0,0581 евро составит 29050 евро в год. В течение года необходимы следующие затраты: страховка – 1351 евро; сервисное обслуживание – 1621 евро; ремонтные работы – 1081 евро.

Расчеты показали, что период окупаемости такого проекта составит 13,28 года, а это немногим меньше срока службы подобных установок (15–20 лет).

При сроке службы ветрогенератора 15 лет чистая текущая стоимость (Net Present Value), т. е. дисконтированная прибыль от реализации проекта, составит 13984,88 евро, а внутренняя норма рентабельности (Internal Rate of Return)  $\approx$  9,14 %. Таким образом, реализация подобных проектов с экономической точки зрения весьма рискованна и может быть оправдана только с точки зрения минимизации политических рисков и (или) высокой стоимости (второй по уровню в Европе) «зеленого» тарифа.

**Тепловые насосы.** В последние годы они широко распространены и представляют собой «холодильник наоборот», когда в отличие от холодильника вырабатывается не холод, а тепловая энергия. Традиционно для получения тепловой энергии используют воздух, грунт и грунтовые воды. На первый взгляд для угольных шахт перспективным было бы применение шахтных вод. Рассмотрим порядок принятия решений об использовании тепловых насосов. Соотношение вырабатываемой тепловой энергии к потребляемой электрической – это коэффициент трансформации (или КПД теплового насоса), а также показатель эффективности его работы. Современные тепловые насосы имеют высо-

\* Расчеты выполнены совместно со студенткой КПИ А. В. Мамалыгой.

кий коэффициент трансформации – до 5 – 7 в зависимости от источника тепловой энергии и системы отопления. Чем меньше разница температур между природным источником тепловой энергии и подачей отопительного контура, тем больше коэффициент трансформации. Из анализа следует, что для эффективной работы теплового насоса, т. е. для обеспечения его окупаемости, необходимо, чтобы коэффициент трансформации был выше 4. В противном случае тепловая энергия, выработанная насосом, будет дороже, чем при ее выработке на котельных установках традиционной конструкции. В результате может возникнуть вопрос целесообразности использования тепловых насосов на шахтах.

Представленные в статье подходы к разработке технико-экономических обоснований позволяют критически относиться к «мифам энергосбережения» (утверждения о безусловной необходимости использования энергоэффективного оборудования, которое должно прийти на смену традиционным типам). Более того, специфика предприятий угольной промышленности (наличие угольной пыли, возможность выбросов газа и попадания воды) выдвигает особые требования и к горношахтному оборудованию, которое может быть использовано. Таким образом, в основе принятия решений о выборе энергоэффективного оборудования должен быть расчет и анализ таких экономических характери-

стик, как NPV, Payback Period и IRR, а также учет специфики работы угольных предприятий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Энергосбережение*. Системы электропривода. Метод анализа и выбора: ДСТУ 3886-99. – К.: Держспоживстандарт України, 2000. – 55 с.
2. *Автоматизация шахтных вентиляторных установок* / Б. Х. Богопольский, В. М. Берловский, Ю. С. Ковалев и др. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 134 с.
3. *Проведение энергоаудита на Центральном горно-обогатительном комбинате г. Кривого Рога*: Отчет о НИР (заключ.) / Предприятие «Электромеханика»; Руководитель В. М. Мамалыга. – № 95/205юр; Инв. № 95/205юр/3. – К., 1998. – 118 с.
4. *Технико-экономический анализ результатов обследования двигателей механизмов собственных нужд энергоблоков ТЭС и разработка исходных требований для пилотного проекта*: Отчет о НИР (заключ.) / Предприятие «Электромеханика»; Руководитель В. М. Мамалыга. – № 142/96; Инв. № 142/96/2. – К., 1996. – 29 с.
5. *Mamalyga V. M. Power Saving in Electric Drivers: Rational Modes of Operations and Principle of Sufficiency in Designing* // PEMS' 98, Prague, September 8-10, 1998. – Vol. 7. – P. 186 – 191.
6. *Энергосбережение*. Энергетический аудит. Общие технические требования: ДСТУ 4065-2001. – К.: Держспоживстандарт України, 2002. – 39 с.
7. *Мамалыга В. М. Технико-экономическое обоснование выбора типа осветительных устройств на предприятиях* / В. М. Мамалыга. – К.: Ин-т технической теплофизики, 2011. – С. 64 – 69.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

### Год 1973

В журнале № 4 в статье Ю. К. Батманова, В. М. Синюгина, Ю. Д. Борисова «Возможности увеличения длины выемочных полей на пологих и наклонных пластах Донбасса при наличии непереходимых тектонических нарушений» описана возможность увеличения длины выемочных полей на шахтах Украинского Донбасса, разрабатывающих пологие и наклонные пласты, за счет перехода от отработки пластов лавами по простиранию на отработку лавами по восстанию (падению) или диагонально к линии падения пласта. Приведена технико-экономическая эффективность реализации такой замены.

Наибольшее число участков, длина которых ограничена по простиранию тектоническими нарушениями, приходится на комбинаты Донецкуголь (16,8 % всех участков с различными нарушениями), Макеевуголь (15,6 %), Кадиевуголь (13,5 %) и Красноармейскуголь (10,6 %). Углы падения разрабатываемых пластов, как правило, не превышают 15°, что позволяет уже сейчас перейти к отработке этих пластов по восстанию (падению) или диагонально к простиранию.

Даже при существующей технологии очистной выемки и достигнутых нагрузках на лаву увеличение длины выемочных полей позволит значительно снизить денежные и трудовые затраты.