

УДК 621.867.2:62-83

И.Ю. Семькина, С.П. Шайдо, Д.В. Нестеров, А.П. Носков

ОБ ОЦЕНКЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ACS 800 НА ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МАГИСТРАЛЬНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Введение и постановка задачи

Общеизвестным на практике является факт, что внедрение преобразователей частоты (ПЧ) на электроприводах различных промышленных установок является одним из наиболее действенных средств для повышения энергоэффективности их работы. При этом для различных классов промышленного оборудования разработаны как способы управления частотно-регулируемым электроприводом (ЭП), оптимизирующие энергопотребление, так и методы оценки энергетической эффективности их внедрения [1], однако применение частотно-регулируемого электропривода для горных машин до сих пор не приняло массовый характер, в связи с чем, отсутствуют общепринятые методики, позволяющие производить оценку энергетической и экономической эффективности от внедрения частотно-регулируемого электропривода на установках такого класса.

В качестве попытки создания такой методики для электроприводов ленточных конвейеров (ЛК) был проанализирован магистральный ленточный конвейер с мощностью двигателей 3×500 кВт головного привода и 2×500 кВт промежуточного привода, каждый из которых управляется преобразователем частоты ACS 800, подключенным в общую систему автоматизации.

Особенностью рассматриваемого магистрального ленточного конвейера является требование выравнивания нагрузки отдельных приводов, вызванное высокой протяженностью ЛК, а также очень высокий коэффициент запаса по мощности, принятый при проектировании. В связи с этим средняя загруженность электродвигателей конвейера составляет не более 30 % от номинальной, однако электродвигатели головного и промежуточного ЭП, поддерживая требуемый момент, работают с постоянной угловой скоростью, а также с неизменным заданием потокосцепления системы прямого управления моментом ACS 800.

Для анализа работы описанного ЛК использовались данные мониторинга работы его двигателей, полученные от преобразователей частоты ACS 800 в течении одной смены. Целью анализа поставлено определить, какую экономию электроэнергии в денежном выражении получает предприятие при эксплуатации частотно-регулируемых электроприводов, по сравнению с ситуацией, если бы данный ЛК приводился в движение нерегулируемыми двигателями, а также насколько возможно повысить

энергетическую эффективность работы данных ЭП при сохранении существующего технологического процесса.

Следует отметить, что при анализе не рассматривался такой показатель как коэффициент мощности. Во-первых потому, что оценивается экономия, выражаемая в денежном эквиваленте, для определения которой достаточно оперировать понятиями активной мощности, а во-вторых коэффициент мощности требует знания кроме $\cos\phi$ еще и коэффициента гармонических искажений, данные по которому для ACS 800 в мониторинге отсутствуют.

Оценка фактической экономии

Для получения требуемых оценок первоначально был произведен анализ характеристик двигателя MORLEY мощностью 500 кВт (рис. 1), установленного на каждом ЭП данного ЛК, откуда получены зависимости отдаваемой двигателем мощности P_2 в кВт, потребляемой двигателем мощности P_1 в кВт и мощности полных потерь двигателя ΔP в кВт при различной его нагрузке. Зависимости P_1 и ΔP от нагрузки двигателя аппроксимирована кривой первого и третьего порядка соответственно.

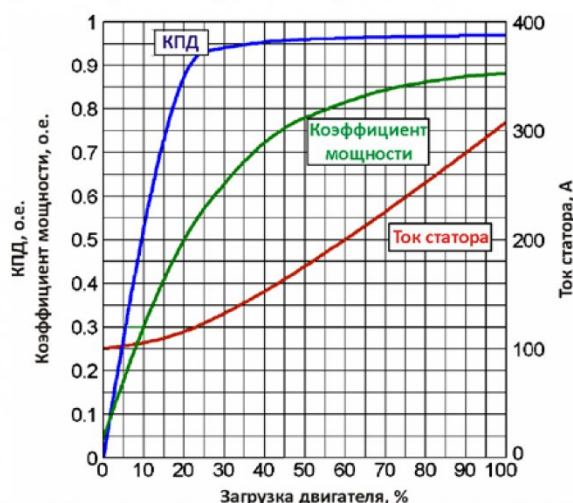


Рис. 1. Характеристики двигателя MORLEY

Поскольку нагрузка двигателя определяется режимом работы механизма, т.е. создаваемым механизмом моментом сил сопротивления, оценка энергоэффективности частотно-регулируемого ЭП в сравнении с нерегулируемым будет корректна, если ее проводить из условия преодоления нерегулируемым двигателем сопоставимо нагрузки. Указанная оговорка носит существенное значение,

поскольку данные мониторинга снимались при угловой скорости ниже номинальной, в то же время изменение КПД от нагрузки на искусственных характеристиках зависит от параметров самого двигателя, а также от системы управления, которая применялась для получения данных искусственных характеристик.

Для примера [2] можно привести характеристики асинхронного двигателя (АД) марки 4А132М6 с системой управления, поддерживающей постоянство потокосцепления (рис 2). Рассматриваемый асинхронный электропривод ЛК будет иметь качественно подобные характеристики, но их использование в расчете эффективности от внедрения ПЧ крайне трудоемко.

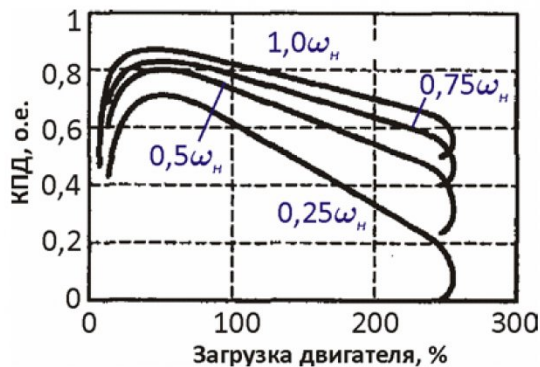


Рис. 2. КПД частотно-регулируемого двигателя

В связи с этим, для обеспечения сопоставимости сравнения нерегулируемого и частотно-регулируемого АД принято допущение, что повышение скорости ЛК при работе с нерегулируемым двигателем обеспечит меньший слой транспортируемого груза на ленте и создаваемый нерегулируемым АД момент $M_{нер.д.}$ будет настолько же меньше, чем для частотно-регулируемого $M_{чр.д.}$, насколько для частотно-регулируемого АД угловая скорость $\omega_{чр.д.}$ ниже номинальной синхронной $\omega_{н.синх.}$:

$$M_{нер.д.} = M_{чр.д.} \frac{\omega_{чр.д.}}{\omega_{н.синх.}}, \text{ Нм.}$$

Описанные допущения обеспечили возможность проведения обработки данных мониторинга по показаниям преобразователей ACS 800, в состав которых входили данные об угловой скорости, электромагнитном моменте, токе стартера, потребляемой двигателем мощности и подводимом к двигателю напряжении. В ходе данной обработки для каждого момента времени вычислены:

А. Механическая мощность $P_{2чр.д.}$ в кВт и нагрузка двигателя $P_{2о.е.}$ в %:

$$P_{2чр.д.} = M_{чр.д.} \omega_{чр.д.} \text{ и } P_{2о.е.} = \frac{P_{2чр.д.}}{500} \cdot 100.$$

Б. Потери мощности $\Delta P_{чр.д.}$ в кВт в зависимости от $M_{чр.д.}$ в соответствии с полученной ранее аппроксимацией:

$$\Delta P_{чр.д.} = -6 \cdot 10^{-11} (M_{чр.д.})^3 + 10^{-6} (M_{чр.д.})^2 - 0,0007 M_{чр.д.} + 9,0025$$

В. Виртуальная потребляемая мощность нерегулируемого АД с той же нагрузкой $P_{1нер.д.}$ в соответствии с аппроксимацией и принятым допущением:

$$P_{1нер.д.} = 0,1571 M_{чр.д.} \frac{\omega_{чр.д.}}{\omega_{н.синх.}} + 11,602.$$

Данные, полученные в соответствии с описанным алгоритмом позволили построить две группы результатов.

Первая – анализ по времени, в ходе которого визуализируется разница между мощностью, потребляемой частотно-регулируемым двигателем, и виртуальной мощностью, потребляемой нерегулируемым двигателем (рис. 3). В рассматриваемом случае количественно она невелика.

Эта же группа результатов при допущении, что электроприводы конвейера работают в том же режиме круглый год, методом интегрирования за смену позволяет определить годовую экономию в денежном выражении. Для данного конвейера экономия составляет 667 296,07 кВт·ч в год суммарно по всем пяти приводам.

Вторая группа результатов – это анализ экономии в зависимости от загрузки двигателей.

В ходе анализа для интервалов, во время которых конвейер находился в работе, определялись зависимости мощности, потребляемой частотно-регулируемым двигателем, и виртуальной мощности, потребляемой нерегулируемым двигателем, от загрузки двигателя. Далее в зависимости от загрузки определялась сэкономленная мощность (рис. 4, А) $P_{эк.}$ в кВт и экономия \mathcal{E} в % как отношение к $P_{1нер.д.}$ (рис 4, Б):

$$P_{эк.} = P_{1нер.д.} - P_{1чр.д.} \text{ и } \mathcal{E} = \frac{P_{эк.}}{P_{1нер.д.}} \cdot 100.$$

Полученные результаты свидетельствуют, что применение ПЧ обеспечило экономию электроэнергии, потребляемую электроприводами конвейера при работе в зоне малых нагрузок от 1,5 до 10 %.

Оценка потенциальной экономии

При работе АД величина потребляемой электроэнергии определяется долей энергии, расходуемой на создание магнитного поля, долей энергии, расходуемой на преодоление нагрузки и долей энергии, непосредственно переходящей в потери.

В нерегулируемом двигателе, к которому подводится напряжение неизменной величины, магнитный поток формируется независимо от загрузки, т.е. является практически неизменным. При этом вследствие протекания тока намагничивания даже на холостом ходу формируются электрические потери на активных сопротивлениях цепи статора. Магнитные потери при снижении нагрузки так же не уменьшаются.

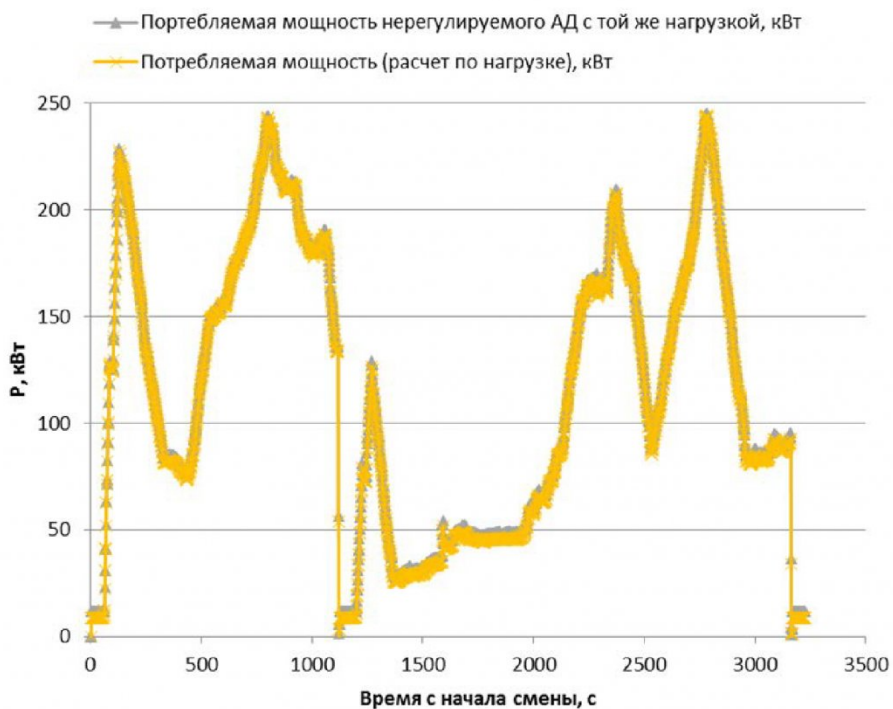


Рис. 3. Визуализация экономии во времени на примере первого двигателя

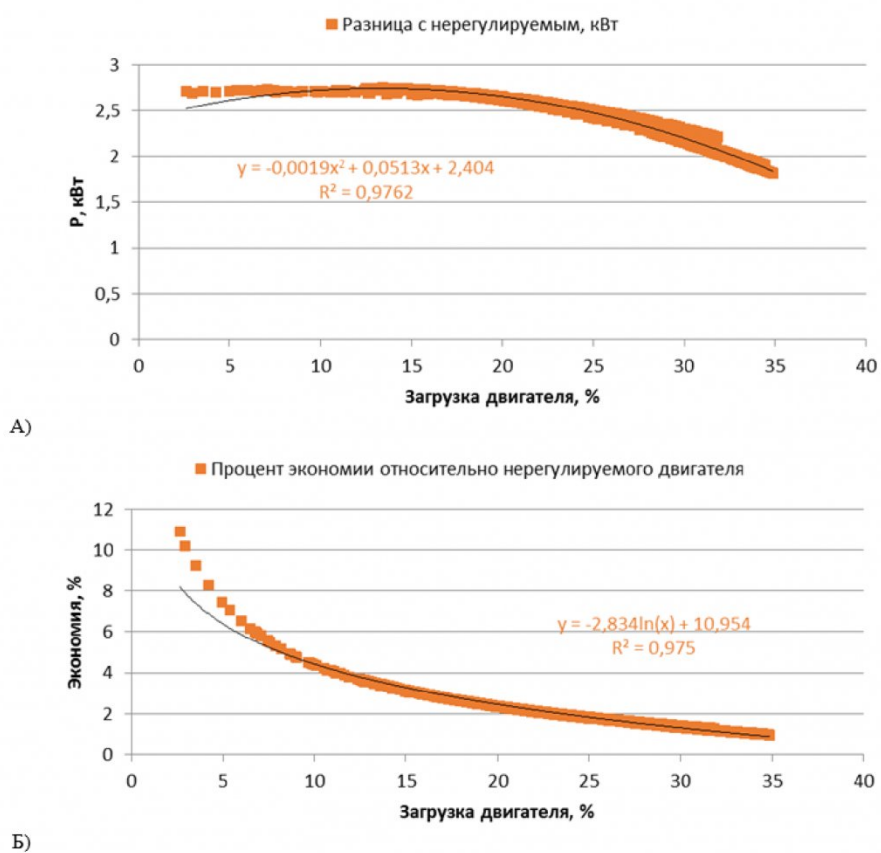


Рис. 4. Экономия от внедрения ПЧ на примере первого двигателя:

А) в абсолютном выражении

Б) в процентном выражении

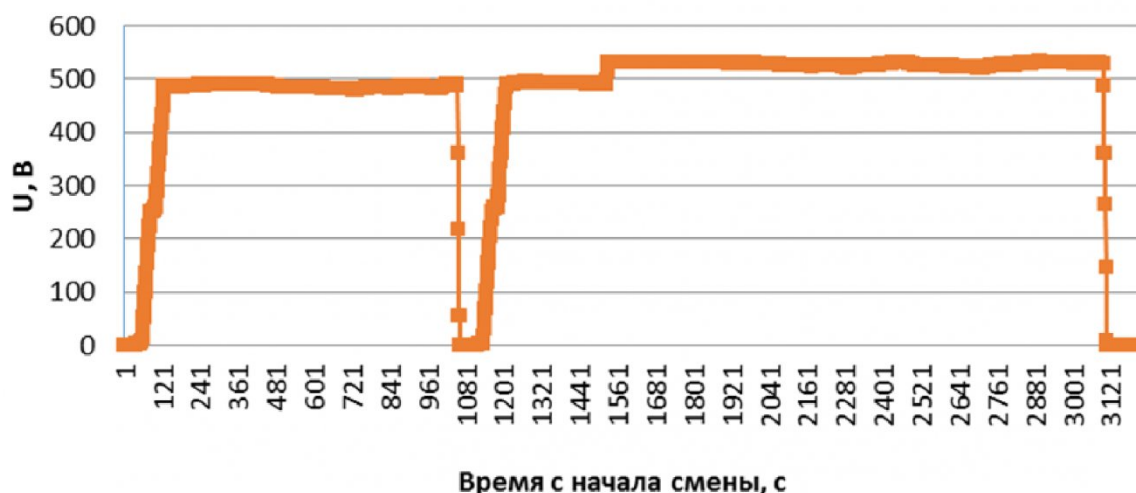


Рис. 5. Диаграмма напряжения на первом двигателе

В случае, когда в качестве способа регулирования АД применяется прямое управление моментом с постоянным заданием потока, уровень магнитных потерь не меняется, а экономия определяется снижением угловой скорости АД и соответствующим этому снижению напряжением (рис. 5), которое она составляет от 80 до 85 % от номинального. Этим и объясняется настолько невысокий уровень экономии электроэнергии, зафиксированный в проведенном расчёте.

Таким образом, при работе рассматриваемого ЛК с одной и той же нагрузкой и при эквивалентировании угловой скорости, получение значимого эффекта от внедрения частотно-регулируемого ЭП может обеспечиваться только путем воздействия на магнитный поток АД. В преобразователях частоты ACS 800 это достигается применением опции «оптимизация магнитного потока».

При определении потенциальной экономии от использования опции «Оптимизация магнитного поля» $\mathcal{E}_{\text{пот}}$ следует изначально отметить, что формула, на основании которой производители ACS 800 определяют нужное для двигателя напряжение, является ноу-хау и нам неизвестна, в связи с чем достоверно экономии от применения опции «Оптимизация магнитного поля» можно определить только экспериментальным путем.

Тем не менее, исходя из теоретических основ работы электрических машин, можно провести ориентировочную оценку, которая позволяет определить не непосредственно потенциальную экономию, а «коридор экономии». Под этим термином в рамках приведенного анализа понималась максимальная и минимальная оценка экономии, в пределах между которыми будет располагаться реальный результат экономии от применения опции «Оптимизация магнитного поля».

Одной из границ «коридора экономии» является вариант максимального снижения напряже-

ния, при котором работа АД будет возможной технически, но недопустима с практической точки зрения. Потери при этом будут наименьшими.

Максимальное снижение U_1 в таком режиме определялось так, чтобы критический момент двигателя M_k на 20 % превышал текущий момента двигателя $M_{\text{чр.д.}}$, определенный по показаниям ACS 800 в ходе мониторинга. Реальный двигатель при работе в таких условиях будет иметь очень низкую устойчивость, и при резком увеличении нагрузки более чем на 20 %, что вероятно для ленточного конвейера, произойдет опрокидывание.

Зная параметры двигателя MORLEY мощностью 500 кВт, для которого $M_{k,\text{ном.}} = 11195,1$ Нм, а также параметры напряжения используемых преобразователей ACS 800, было вычислено напряжение, соответствующее виртуальной работе АД на первой границе:

$$U_1 = U_{1\text{ном.}} \sqrt{\frac{1,2 \cdot M_{\text{чр.д.}}}{M_{k,\text{ном.}}}}$$

В расчетах принималось допущение, что отклонение угловой скорости АД на полученной искусственной характеристике относительно естественной отсутствует. Это дало возможность при расчете ΔP_c и ΔP_m использовать данные о скорости двигателя $\omega_{\text{чр.д.}}$, определенной по показаниям ACS 800 в ходе мониторинга.

Снижение магнитного потока принято прямо пропорциональным снижению напряжения, а снижение тока так же пропорциональным, но вычислялось относительно тока двигателя $I_{1\text{чр.д.}}$, определенного по показаниям ACS 800 в ходе мониторинга:

$$\frac{\Phi}{\Phi_{\text{ном.}}} = \frac{U_1}{U_{1\text{ном.}}} \quad \text{и} \quad \frac{I_1}{I_{1\text{ном.}}} = \frac{I_{1\text{чр.д.}} \cdot U_1 / U_{1\text{ном.}}}{I_{1\text{ном.}}}$$

Второй границей «коридора экономии» является вариант такого снижения напряжения, при котором минимальное напряжение определяется ис-

ходя из условия, чтобы минимальная перегрузочная способность соответствовала пусковому моменту двигателя:

$$U_{1\text{мин.}} = U_{1\text{ном.}} \sqrt{\frac{M_{\text{пуск.ном.}}}{M_{\text{к.ном.}}}}$$

Зная параметры двигателя MORLEY мощностью 500 кВт, для которого $M_{\text{пуск.ном.}} = 3518,46$ Нм, а также параметры напряжения используемых преобразователей ACS 800, определено минимальное напряжение $U_{1\text{мин.}} = 386,83$ В. При этом нулевой нагрузке было сопоставлено минимальное напряжение, номинальной нагрузке и выше – номинальное напряжение, а при промежуточных значениях нагрузки напряжение изменялось по s-образной характеристике (рис. 6).

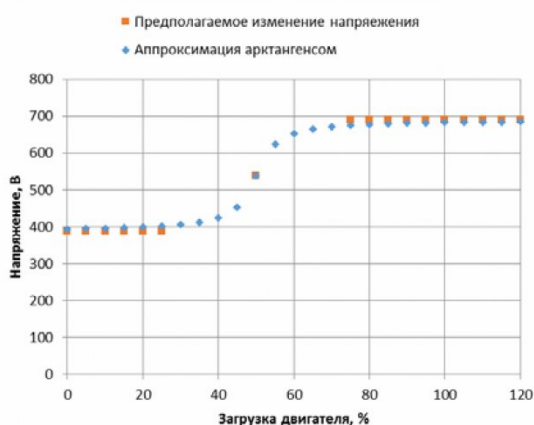


Рис. 6. Допущение о характере изменения напряжения

Дальнейшие расчёты, проведённые с учётом математического описания мощности различных потерь, показали, что как на первой, так и на второй границах «коридора экономии» напряжение, соответствующее рассматриваемой виртуальной ситуации оказывается ниже подводимого к двигателю напряжения, зафиксированного в ходе мониторинга (рис. 7). Этот факт подтвердил наличие резерва для экономии электроэнергии.

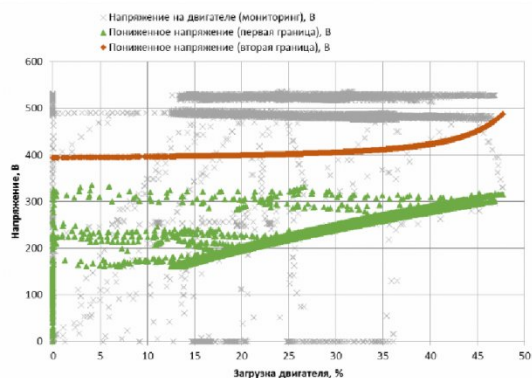


Рис. 7. Напряжение, подводимое к двигателю, в зависимости от нагрузки

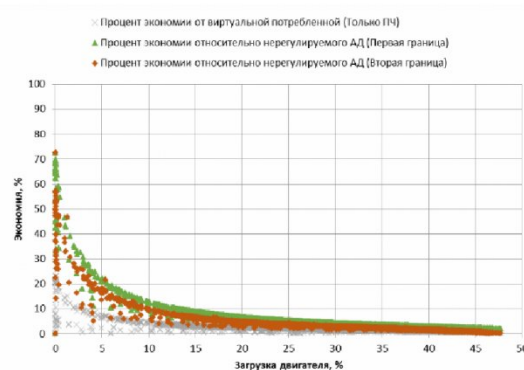


Рис. 8. Экономия электроэнергии относительно нерегулируемого двигателя в целом по конвейеру

Результаты анализа показали, что применение опции «Оптимизация магнитного поля» действительно повышает энергетическую эффективность электроприводов ЛК как относительно виртуальной ситуации, когда ЛК приводится в движение нерегулируемым двигателем, так и в сравнении с данными мониторинга. При этом в относительном выражении на малых загрузках двигателя экономия весьма значительна, но с повышением загрузки снижается практически до нуля (рис. 8). В количественном отношении на исследуемом диапазоне загрузки двигателя экономия на первой границе составила 3,51..6,11 кВт, на второй – 0,79..3,75 кВт. Реальная экономия от применения опции «Оптимизация магнитного поля» будет лежать между указанными пределами.

По приведенным на рис. 7 и рис. 8 графикам необходимо отметить, что наблюдаемые отклонения ряда точек от среднестатистических кривых не следует рассматривать как значимые данные, поскольку их наличие объясняется переходными процессами пуска и останова конвейера (рис. 5). При этом изменение уровня угловой скорости в момент времени 1600 с объясняет наличие двух уровней напряжения в показаниях мониторинга на рис. 7.

Сравнение с другими исследованиями и выводы

Подтверждение показанных в данном расчете результатов можно найти в обширном количестве публикаций, в том числе зарубежных. Эти публикации описывают, каким образом необходимо изменять напряжение, подводимое к двигателю, или непосредственно его магнитный поток, чтобы при изменяющейся нагрузке добиться минимизации потерь энергии, потребляемой двигателем. В частности, в этих работах приводятся данные об аналогичных исследованиях эффективности асинхронного электропривода с оптимизацией поля.

Приведенные в публикациях, например в [3], данные (рис. 9, А) свидетельствуют, что, как и в рассматриваемом случае при оптимизации поля энергетическая эффективность работы АД повышается. При этом дополнительный расчет эконо-

мии, выполненный по этим данным (рис. 9, Б), свидетельствует как о совпадении характера зависимости экономии от загрузки АД с данными, полученными в настоящем расчете, так и подтверждает, что эффективность оптимизации будет наблюдаться только диапазоне нагрузок, где кривая КПД регулируемого двигателя начинает круто падать к нулю.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили, что внедрение преобразователей частоты ACS 800 на электроприводах магистрального ленточного конвейера обеспечило фактическую экономию энергии от 1,5 до 10 %, а при включении опции «оптимизация магнитного потока» данная экономия может возрасти, вплоть до 40 %.

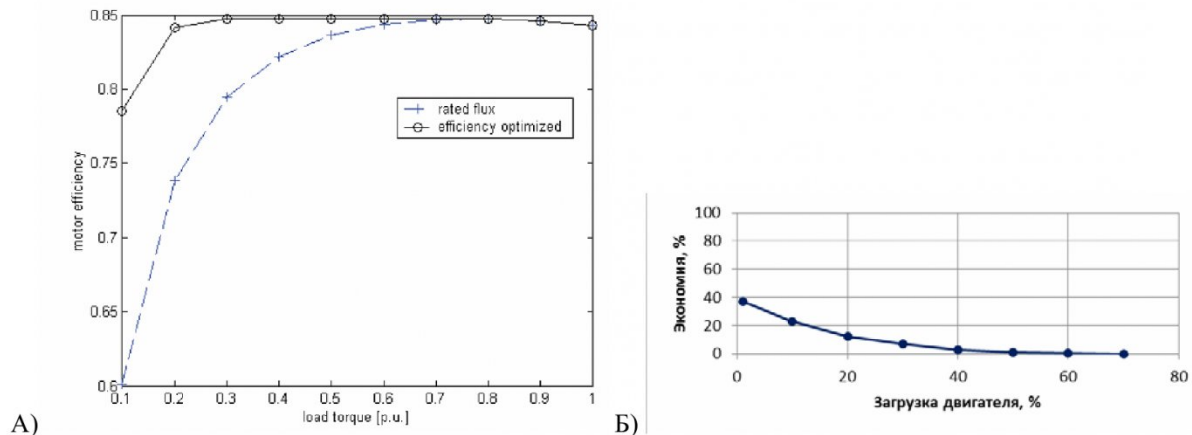


Рис. 9. Экономия от оптимизации асинхронного двигателя производства АВВ мощностью 2,2 кВт:

А) Кривые КПД двигателя с применением оптимизации и без
Б) Расчет процента экономии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Н. Ф. Энергосбережение в электроприводе /Н. Ф. Ильинский, Ю. В. Рожанковский, А.О. Горнов. – Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: практ. пособие в 5 кн. – Кн. 2. – М.: Высш. шк. 1989. – 127 с.
2. 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.
3. Blanusa B. New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. – 2010. – № 11. – P. 341-358.

□ Автор статьи

Семькина
Ирина Юрьевна,
канд.тех.наук, доц., директор института энергетики КузГТУ, доц. Каф. электропривода и электрооборудования НИ ТПУ,
email: siyu.eav@kuzstu.ru

Носков
Алексей Петрович,
заместитель технического директора ООО «Электромашина»

Шайдо
Сергей Петрович,
генеральный директор ООО «Холдинговая Компания «Центр Транспортных Систем»

Нестеров
Дмитрий Владиславович,
технический директор ООО «Электромашина»

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.2

Ю.А. Фридман, Е.Ю. Логинова, Г.Н. Речко

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СЫРЬЕВЫХ ОТРАСЛЕЙ: НА ПРИМЕРЕ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КУЗБАССА

Вопрос перехода российской экономики от ресурсной к инновационной модели сейчас все реже вызывает споры. Другое дело: проблема роли сырьевых, ресурсодобывающих отраслей в современном инновационном процессе, а также их способность к созданию и восприятию инноваций. Дискуссия на эту тему не прекращается. Она лишь то слегка затухает, то разгорается с новой силой по мере колебания цен на глобальном сырьевом рынке. И если для России в целом возможны варианты инновационных стратегий, то для ресурсных регионов инновационное развитие сырьевых отраслей все чаще воспринимается как вопрос выживания¹.

Потому представляется важным изучить существующие *теоретические подходы к развитию инновационной составляющей в сырьевых отраслях*, которые по международной классификации Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), относятся к группе «Средне- и низкотехнологичные виды производств» (третья степень технологичности производств). Заметим, данный показатель оказывает «значительное влияние на масштабы инновационной деятельности, новизну инновационного продукта, его креативность, интенсивность создания инноваций и их диффузию» [1, с.20-21].

Научные наработки по методологическим вопросам инновационного развития российской угольной отрасли содержатся в трудах отечественных ученых и публикациях практиков: А.С. Астахова, Н.А. Архипова, В.Е. Зайденварга, Н.Б. Изыгзона, И.С. Кожуховского, Г.Л. Краснянского, Ю.Н. Малышева, Ю.А. Плакиткина, Л.С. Плакиткиной, А.А. Рожкова, А.Д. Рубана, Ю.А. Чернегова, М.И. Щадова, В.М. Щадова, А.Б. Яновского и др.

Анализ ² актуальных теоретических подходов

к развитию инновационной составляющей в сырьевых отраслях (в частности, российской угольной промышленности) позволяет выделить доминирующие группы мнений относительно данной проблемы. Обобщенно их можно представить в виде двух преобладающих сегодня подходов (в рамках которых существуют разные вариации):

– *процессный подход* подразумевает внедрение различных типов инноваций (по классификации основоположника теории инноваций Й. Шумпетера³ и классификации Руководства ОСЛО [3]) во всех ключевых сферах и на основных этапах деятельности угольной компании (и отрасли) в целях роста ее ценности и формирования стратегических конкурентных преимуществ (рисунок);

– *кластерный подход* в роли базового элемента системы инновационного развития угольной отрасли для повышения ее конкурентоспособности рассматривает углепромышленный кластер – взаимосвязанную цепочку дополняющих и усиливающих преимущества друг друга многоотраслевых инновационных производств по добыче, переработке и эффективному использованию угольной продукции.

Оба вышеназванных подхода получают поддержку не только со стороны ученых, занимающихся вопросами научного обоснования инновационного развития угольной промышленности, но и власти, а также, что немаловажно, со стороны практиков, представляющих отечественный угольный бизнес.

ра / услуги), процесса, нового маркетингового метода, организационного метода в деловой практике, организации рабочих мест или внешних связей хозяйствующего субъекта [1, с. 8].

³ Согласно Й. Шумпетеру, выделяются: 1) продуктовая инновация (внедрение нового продукта или качественное изменение существующего продукта); 2) процессная инновация (новая для отрасли); 3) открытие нового рынка; 4) разработка новых источников (обнаружение и/или разработка новых источников сырья или других составляющих материальных затрат); 5) реорганизация отрасли [2].

¹ Статья подготовлена в рамках исследования, выполняемого при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект №14-02-00274).

² В качестве рабочего определения используем следующее: *инновация* – экономическая реализация нового или значительно улучшенного продукта (това-