

Либерман Я.Л.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, Горбунова Л.Н.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup> Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

E-mail: Yakov\_Liberman@List.ru

## СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН

**Аннотация:** В статье рассматриваются способы снижения электроэнергопотребления транспортирующих машин, такие как рекуперация электроэнергии с помощью специальных модулей, включаемых в регулируемый привод, а также сокращение мощности, потребляемой приводами, путем уменьшения ее потерь непосредственно в агрегатах привода – в двигателях и преобразователях частоты. Показана экономия электроэнергии на угольных разрезах и в шахтах при замене одного двигателя двумя и более с сохранением суммарной мощности конвейера и регулировании его скорости в зависимости от нагрузки на ленту.

**Ключевые слова:** энергопотребление, транспортирующие машины, рекуперация, привод, преобразователь частоты.

**Информация о статье:** принята 01 октября 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-23-28

В процессе проектирования современных транспортирующих машин типа конвейеров, лифтов, грузоподъемных кранов и т.п. наряду со стремлением улучшить их технические характеристики (грузоподъемность, быстроходность и пр.) все больше и больше внимания уделяется их экономичности. При этом последнюю понимают как характеристику затрат на изготовление машин и как критерий оценки расходов, сопровождающих их эксплуатацию. Из указанных расходов особо выделяют затраты на электроэнергию, поскольку ее стоимость в нашей стране растет чрезвычайно быстро и, как следствие, быстро возрастает и стоимость продукции, вырабатываемой технологическими комплексами.

Способы снижения электроэнергопотребления транспортирующих машин, применяемые сегодня, весьма разнообразны. Некоторые из них уже становятся классическими и распространяются все шире. Это, например, замена релейно-контакторной аппаратуры управления машинами низковольтной электроникой, отказ от таких еще недавно популярных способов торможения электродвигателей как динамическое торможение и торможение противовключением, при которых в тепловые потери на резистивных элементах разного рода превращается до 60% кинетической энергии движущихся частей электроприводов.

В настоящее время регулирование скорости электродвигателей транспортирующих машин производится преимущественно с помощью бесступенчатых регуляторов питающего их напряжения – его уровня или уровня и частоты. Приводы с такими регуляторами наиболее экономичны. При торможении и при опускании грузов подъемно-транспортными машинами они, как и приводы с релейно-контакторным управлением, могут часть электроэнергии

возвращать в сеть, работая в режиме рекуперации, хотя в отличие от них, где рекуперация получается естественным путем, для этого их снабжают специальными модулями.

Рекуперационные модули выполняются и включаются в регулируемый привод по-разному. Так, по способу их введения в наиболее перспективный сегодня асинхронный частотно-регулируемый привод последний можно разделить на три типа [1].

К первому может быть отнесен привод с преобразователем частоты с дополнительным тиристорным инвертором, показанный на рис. 1, а.

Ко второму типу относится привод с активным выпрямителем, имеющий силовую часть, приведенную на рис. 1, б.

Третий тип (рис. 1, в) по принципу выполнения силовой части аналогичен второму, но активный выпрямитель в нем обладает некоторой «автономией», позволяющей управлять им, в определенной мере, независимо от других блоков привода.

Все три типа приводов отличаются друг от друга стоимостью и энергетическими характеристиками. Зачастую по сравнению с приводами без рекуперации они дороже в 1,5-1,6 раза. Тем не менее, эксплуатационные расходы электроприводов они могут снижать довольно значительно – до 25%. Снижение, однако, зависит от режима эксплуатации подъемно-транспортной машины. Если машина работает, в основном, с постоянной скоростью и грузы большой массы опускает редко, то применение рекуперационных модулей может быть экономически совсем неэффективным. В противном же случае они могут быстро окупаться – в течение 1,5-2 лет.

В то время как рекуперация электроэнергии является способом снижения электропотребления,

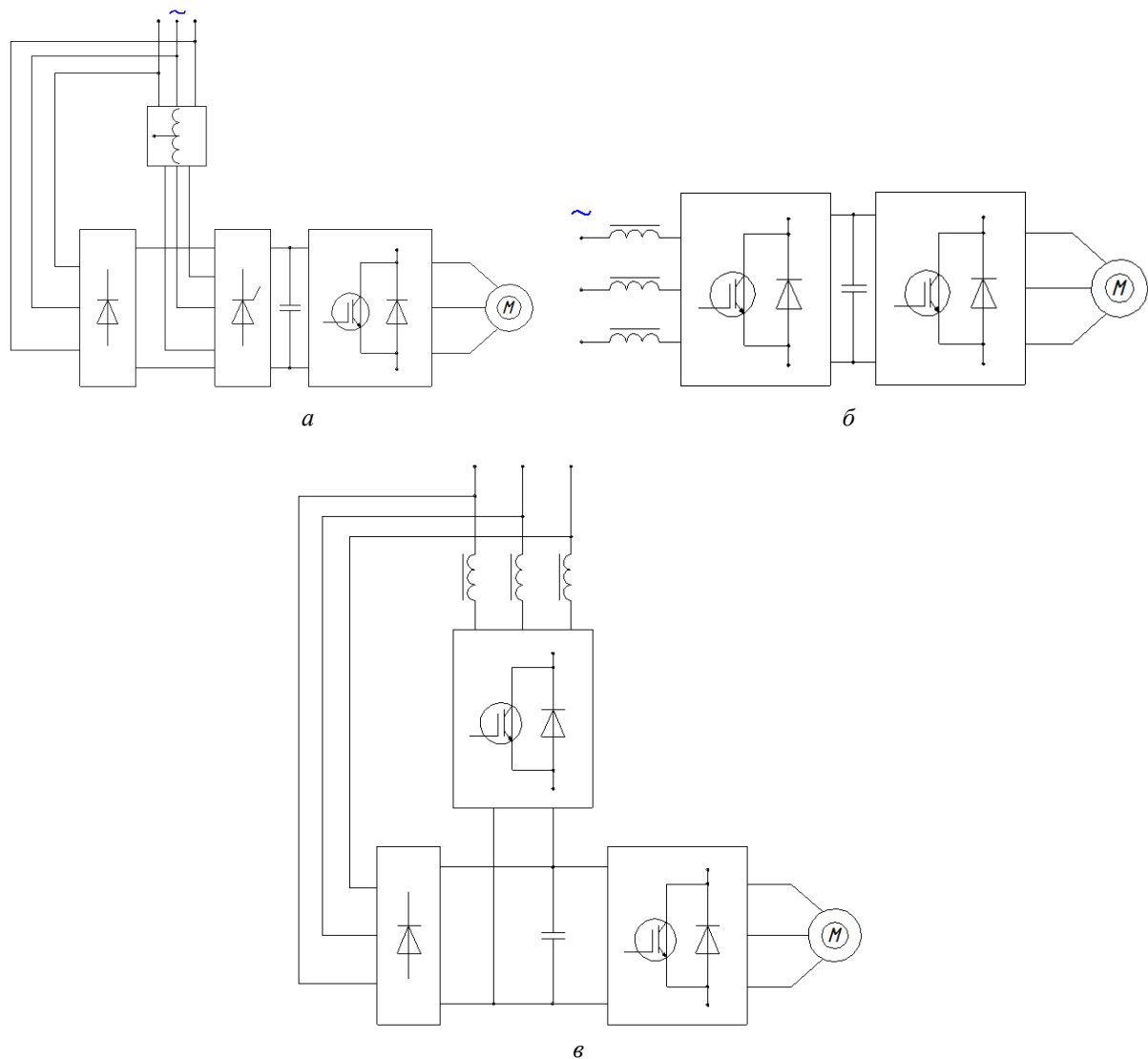


Рис. 1. Функциональные схемы силовой части ПЧ с рекуперацией:  
 а – с отдельным тиристорным инвертором;  
 б – с активным выпрямителем в составе преобразователя;  
 в – с отдельным активным выпрямителем

применимым в достаточно специфических условиях, существуют и способы энергосбережения, рассчитанные на менее ограниченное использование. Это, в частности, способы сокращения мощности, потребляемой приводами, путем уменьшения ее потерь непосредственно в агрегатах привода – в двигателях и преобразователях частоты.

Потери в двигателе имеют различную физическую природу и локализируются в его разных элементах – в статоре, роторе и др. Они складываются из электрических, магнитных, механических и так называемых добавочных составляющих [2]. Электрические потери возникают в обмотках статора и ротора, и их мощности  $P_{ЭС}$  и  $P_{ЭР}$  определяются прежде всего плотностью тока и падением напряжения в этих обмотках, а они, в свою очередь, сопротивлением обмоток. Магнитные потери порождаются гистерезисом и вихревыми токами, главным образом, в статоре. Мощность магнитных потерь  $P_{МС}$  зависит от конструкции стальных элементов статора и от способа их изготовления – от наклепа

при штамповке, от особенностей замыкания листов стали в пакете, от их толщины и пр. Причинами механических потерь, имеющих мощность  $P_{МЕХ}$ , являются трение в подшипниках, в скользящем контакте «щетка – кольцо», трение ротора о воздушную среду. Последнее создает вентиляционные потери, в которые также включают мощность кинетической энергии отходящего от двигателя воздуха и потери в вентиляторе, если он применяется. В ряде случаев двигателя охлаждаются не воздухом, а водой, и соответствующие потери также относят к вентиляционным и учитывают в  $P_{МЕХ}$ . Что касается добавочных потерь мощности  $P_{ДП}$ , то они вызваны наличием в двигателе полей рассеяния, пульсаций поля в зубцах ротора и статора и существенно зависят от строения зубцов, токов в обмотках статора и пр.

Влияя на факторы, создающие перечисленные потери, в процессе конструирования и производства двигателя, можно увеличить полезную мощность на его валу  $P_{ДВ}$ , повысить его КПД

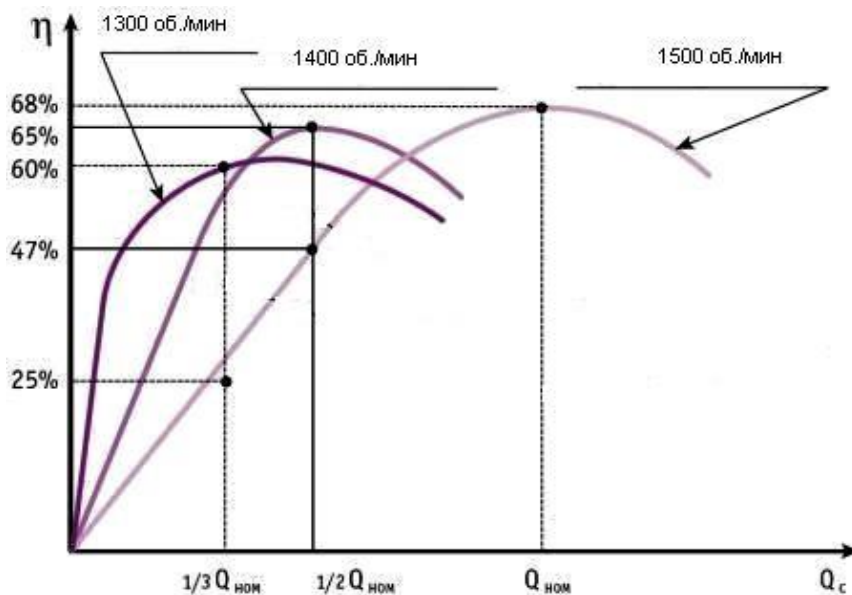


Рис. 2. Характер изменения  $\eta_H$  в зависимости от расхода жидкости  $Q$  при различных скоростях вращения

$$\eta_{ДВ} = 1 - \frac{P_{ЭС} + P_{ЭР} + P_{МС} + P_{МЕХ} + P_{ДП}}{P_{ДВ} + P_{ЭС} + P_{ЭР} + P_{МС} + P_{МЕХ} + P_{ДП}}$$

и сделать его более энергоэкономичным. Аналогично через факторы, создающие потери, можно повышать энергоэкономичность и преобразователей частоты.

Мощность потерь преобразователей обычно представляют как сумму мощности потерь выпрямителя  $P_B$  и мощности потерь инвертора напряжения  $P_I$  [3]. Мощность  $P_B$  выражается в виде

$$P_B = P_{ВХ} + P_{ВВ} + P_{СФ},$$

где  $P_{ВХ}$  – мощность потерь в обмотках входных коммутирующих реакторов,  $P_{ВВ}$  – мощность потерь в вентилях выпрямителя,  $P_{СФ}$  – мощность потерь в сглаживающем фильтре на выходе выпрямителя.

Мощность  $P_I$  можно представить как

$$P_I = P_{СК} + P_{ВЫХ},$$

где  $P_{СК}$  – мощность потерь в силовых ключах инвертора,  $P_{ВЫХ}$  – мощность потерь в обмотках его выходного реактора.

Отсюда КПД преобразователя частоты

$$\eta_{ПЧ} = 1 - \frac{P_{ВХ} + P_{ВВ} + P_{СФ} + P_{СК} + P_{ВЫХ}}{P_{ПЧ} + P_{ВХ} + P_{ВВ} + P_{СФ} + P_{СК} + P_{ВЫХ}},$$

где  $P_{ПЧ}$  – активная мощность, передаваемая преобразователем двигателю.

Величину КПД преобразователя частоты  $\eta_{ПЧ}$  сегодня повышают двояко: за счет совершенствования схем преобразователей и путем применения прогрессивных элементов. Первое направление чаще всего реализуют с помощью новых вариантов

входных и выходных реакторов, связывающих преобразователь с сетью питания и с двигателем. Такие реакторы обеспечивают некоторое уменьшение  $P_{ВХ}$  и  $P_{ВЫХ}$ , но, обычно, не более, чем на 3-5%. Несмотря на существенные различия новых схем, большинство преобразователей частоты имеют общие принципиальные решения в силовой части. Новые же элементы (GTO – тиристоры, транзисторы типов IGBT, MOSFET, MCT и др.) дают возможность сократить энергопотребление преобразователей за счет уменьшения  $P_{ВВ}$  и  $P_{СК}$ , достигающего до 10-12%.

Рассмотренные способы сокращения потерь энергии в электроприводах в настоящее время позволяют получать КПД последних

$$\eta_{П} = \eta_{ДВ} \cdot \eta_{ПЧ} = 0,91 \div 0,93.$$

Однако это возможно только при рациональном управлении ими. Но управление приводами – лишь часть управления транспортирующей машиной в целом, а потому закон управления, оптимальный для всей машины, может быть далеко неоптимальным для электропривода, может быть далеко неоптимальным для всей машины. Это вызвано тем, что в элементах машины, приводимых в движение электроприводом, возникают свои потери энергии. Как правило, они обусловлены силами сопротивления типа сил трения и возрастают с увеличением производительности машины и скоростей движения ее механизмов.

Но высокая производительность машины требуется не всегда. Поэтому для снижения потерь зачастую целесообразно снижать указанные скорости. Уменьшение скорости электропривода при этом может сопровождаться уменьшением его КПД, но для всей машины он может возрасти, поскольку рост потерь привода может перекрываться сокращением потерь в других частях машины. Примером может служить транспортер с гидросистемой, содержащей

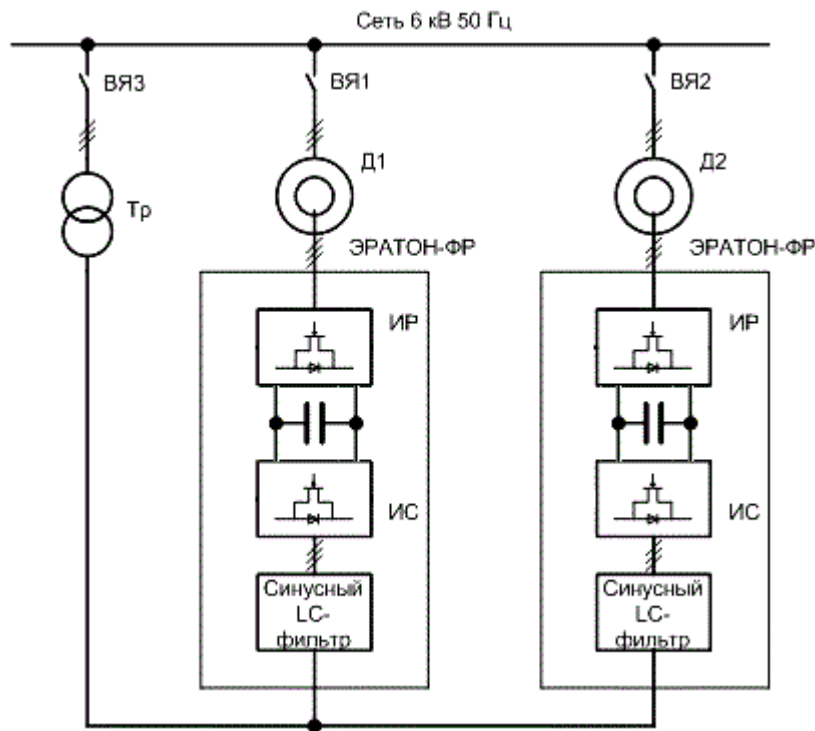


Рис. 3. Структурная схема пускорегулирующего устройства двухдвигательного конвейера на базе «ЭРАТОН-ФР»

гидронасос, с частотно-регулируемым электроприводом. Насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия  $\eta_H$  – отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Характер изменения  $\eta_H$  в зависимости от расхода жидкости  $Q$  при различных скоростях вращения показан на рис. 2 [4].

Максимум КПД насоса с уменьшением скорости вращения смещается влево и снижается. Анализ требуемого изменения скорости насосного агрегата при изменении расхода в гидросистеме показывает, однако, что с уменьшением расхода снижение скорости вращения имеет практический смысл. Если рассмотреть работу агрегата при расходе меньше номинального (вертикальные линии А и В), то нельзя не заметить, что в этих режимах действительно целесообразно работать с пониженной скоростью вращения. Коэффициент полезного действия насоса будет выше, чем при работе с номинальной скоростью, и если рост  $\eta_H$  превысит возможное уменьшение  $\eta_H$  (что не исключено из-за несовпадения  $Q_{НОМ}$  и номинальной частоты вращения двигателя), то получается экономия энергии при эксплуатации всей гидросистемы.

Как отмечается в [3], довольно большой эффект от экономии энергозатрат можно получить также путем уменьшения масс механизмов транспортирующих машин, повышения качества взаимодействия их деталей, коррекцией переходных процессов в агрегатах, применением многодвигательных конструкций.

Замена одного двигателя двумя и более с сохранением суммарной мощности дает позитивный

результат, поскольку суммарный момент инерции двух двигателей в рамках одной серии оказывается меньше момента инерции одного двигателя полной мощности. Этот результат убедительно демонстрируется, например, опытом эксплуатации мощных двухдвигательных конвейеров, построенных на относительно недорогих и надежных устройствах плавного пуска и регулирования скорости асинхронных электродвигателей с фазным ротором с преобразователями частоты типа «ЭРАТОН-ФР», разработанными ЗАО «ЭРАСИБ» [5]. В основу устройств положена схема, подобная показанной на рис. 1, б, а сами они выглядят так, как изображено на рис. 3.

Согласно [6], пускорегулирующее устройство каждого двигателя «ЭРАТОН-ФР» представляет собой последовательное соединение двух транзисторных инверторов напряжения (роторного – ИР и сетевого – ИС) с накопительным конденсатором в промежуточном звене постоянного тока. Инверторы управляются по закону синусоидальной широтно-импульсной модуляции и обеспечивают плавный пуск и регулирование скорости электродвигателей за счет обмена энергией между ротором каждого электродвигателя и высоковольтной питающей сетью. Для электромагнитной совместимости ИС с сетью в преобразователе использован «синусный» LC-фильтр, который не пропускает высокочастотные составляющие напряжения сетевого инвертора в питающую сеть.

Роторный инвертор преобразователя «ЭРАТОН-ФР» обеспечивает плавное нарастание момента электродвигателя до пуска и плавное бесступенчатое увеличение скорости электродвигателя в процессе разгона за счет векторного управления

моментом электродвигателя с сохранением постоянного заданного динамического момента (постоянного ускорения) в процессе всего пуска. Темп разгона программируется. В процессе разгона конвейера ИР электропривода обеспечивают выравнивание токов роторов электродвигателей. После окончания разгона они же обеспечивают стабилизацию скорости конвейера и выравнивание нагрузки электродвигателей. Стабилизация номинальной скорости конвейера обеспечивается с точностью 1%, а выравнивание токов роторов – с точностью 5%.

Работая в режиме рекуперации, сетевой инвертор преобразователя «ЭРАТОН-ФР» возвращает мощность скольжения двигателя в питающую сеть через согласующий трансформатор без потерь мощности в пусковых резисторах. Это обеспечивает экономию электроэнергии при пусках и позволяет регулировать скорость конвейера в широких пределах без потерь мощности в пускорегулирующих устройствах электропривода.

Пускорегулирующие устройства на базе «ЭРАТОН-ФР» были применены на конвейерной линии угольного разреза «Бачатский» (Кемеровская обл.), на крутонаклонном конвейере карьера «Мурунтау» (Узбекистан) и др. В составе приводов конвейера использовались по два электродвигателя типа АКЗ 13-62-8У2, имеющие следующие паспортные параметры: номинальная мощность – 630 кВт, напряжение питания – 6000 В и частота вращения – 750 об/мин.

Сравнение указанных конвейеров с подобными, но однодвигательными с двигателями мощностью 1200 кВт показало, что при тех же условиях эксплуатации вторые конвейеры расходуют электроэнергию при пусках на 6% больше, чем первые. Конечно, двухдвигательный конвейер заметно дороже однодвигательного, но при использовании разработок ЗАО «ЭРАСИБ» дополнительные затраты на него окупаются не более, чем за полгода [7]. Это обусловлено тем, что наряду с экономией при пусках весьма ощутимый эффект при эксплуатации конвейеров с преобразователями «ЭРАТОН-ФР» и аналогичными им можно получать и при управлении скоростью конвейеров в зависимости от нагрузки так, как это делалось в описанном выше транспортере с

гидросистемой. Показательным в этом отношении может служить опыт шахты Вестфален в Германии и предприятия КВК АННА в Польше. На германской шахте были проведены исследования конвейера с приводом мощностью 320 кВт путем установления скорости конвейера, пропорциональной массе поступающего на него груза. Со скоростью 0-0,25 номинальной конвейер работал 47,6% всего времени работы, со скоростью 0,25-0,65 номинальной – 42,3% времени, а со скоростью 0,65-1 номинальной – 10,1% времени. На польском предприятии почти такой же конвейер со скоростью 0–0,4 номинальной работал 53,3% времени эксплуатации, со скоростью 0,4-0,6 номинальной – 38,3% времени, со скоростью 0,6-0,8 номинальной – 7,1%, со скоростью 0,8-1 номинальной – 1,3%. В том и другом случаях экономия электроэнергии по сравнению с нерегулируемым конвейером составила порядка 39%. Помимо этого, как показал опыт КВК АННА, на 50% увеличился срок безаварийной работы грузонесущего органа конвейера, снизился износ его вращательных элементов. За три года работы было заменено 43,8% вращающихся деталей, а на конвейере с нерегулируемой скоростью – 71,8%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Певзнер, Е.М. Электрооборудование грузоподъемных кранов / Е. М. Певзнер, Е.В. Попов, М.И. Аксенов, Г.Б. Онищенко. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 360 с.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
4. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
5. <http://www.erasib.ru/eratonfr/>
6. <http://www.masters.donntu.edu.ua>
7. <http://www.passatfild.org/articles/>

**Liberman Ya. L.<sup>1</sup>**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Gorbunova L.N.<sup>2</sup>**, C. Sc. in Engineering, Associate Professor.

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russia, Yekaterinburg, ul. Mira, 19

<sup>2</sup> Siberian Federal University, 660041, Russia, Krasnoyarsk, pr. Svobodniy, 79/10,

## WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION BY TRANSPORTING MACHINES

**Abstract:** The article discusses ways to reduce the power consumption by transporting machines, such as energy recovery with the help of special modules included in an adjustable drive, as well as reducing the power consumed by drives by reducing its losses directly in the drive units - in motors and frequency converters. It shows the energy savings in open-pit coal mines and underground mines when replacing one engine with two or more while maintaining the total power of the conveyor and adjusting its speed depending on the load on the belt.

**Keywords:** *energy consumption, transporting machines, recovery, drive, frequency converter.*

**Article info:** *received October 01, 2019*

**DOI:** *10.26730/1816-4528-2019-5-23-28*

#### REFERENCES

1. Pevzner, E.M. Elektrooborudovanie gruzopod'emnyh kranov / E. M. Pevzner, E.V. Popov, M.I. Aksenov, G.B. Onishchenko. – M.: Rossel'hozakademiya, 2009. – 360 s.
2. Vol'dek, A.I. Elektricheskie mashiny / A.I. Vol'dek. – L.: Energiya, 1978. – 832 s.
3. Braslavskij, I.YA. Energoberegayushchij asinhronnyj elektroprivod / I.YA. Braslavskij, Z.SH.

Ishmatov, V.N. Polyakov. – M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2004. – 256 s.

4. Belov, M.P. Avtomatizirovannyj elektroprivod tipovyh proizvodstvennyh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov / M.P. Belov, V.A. Novikov, L.N. Rassudov. – M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2004. – 576 s.

5. <http://www.erasib.ru/eratonfr/>

6. <http://www.masters.donntu.edu.ua>

7. <http://www.passatltd.org/artcles/>

#### Библиографическое описание статьи

Либерман Я.Л. Горбунова Л.Н. Способы снижения энергопотребления транспортирующих машин // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 5 (145). – С. 23-28.

#### Reference to article

Liberman Ya. L., Gorbunova L.N. Ways to reduce energy consumption by transporting machines. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 5 (145), pp. 23-28.