

## ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕВОДА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КЛЕТЕВОГО ПОДЪЕМА ШАХТЫ НА ЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

*В.Д. Рубан, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины*

По результатам проведенного обследования и произведенных расчетов, на примере клетцевого подъема №2 Центральной промплощадки шахты им. А.Ф. Засядько, показана целесообразность перевода асинхронного электропривода на частотное управление с блоком рекуперации электроэнергии в сеть.

В настоящее время на подъемных установках старых шахт и рудников эксплуатируются в основном асинхронные приводы шахтных машин, содержащие в своем составе асинхронные двигатели с фазным ротором и комплект электрооборудования (роторные сопротивления, высоковольтный реверсор, роторные панели управления, и станции управления динамическим торможением) [1]. При структурной простоте и невысокой стоимости привода, строительномонтажных работ и обслуживания, упомянутый привод обладает целым рядом недостатков. Использование силовой коммутационной аппаратуры для пуска и регулирования ограничивает применение асинхронного привода по мощности, это влечет за собой применение 2-х двигательных приводов. Асинхронный привод из-за нелинейности характеристик и низкого диапазона регулирования скорости не обладает регулировочными качествами необходимыми для шахтных подъемных машин, что затрудняет его автоматизацию, особенно в 2-х двигательном варианте. Вследствие применяемых средств управления (роторные сопротивления, устройства динамического торможения) привод является энергозатратным. Электроэнергия, расходуемая при пуске, движении с пониженными скоростями, торможении, является невозвратной и оплачивается потребителем. Данный электропривод имеет низкий коэффициент мощности который в зависимости от особенности рабочих диаграмм составляет 0,6 – 0,65 на скиповых и 0,35 – 0,5 на клетевых подъемах. Реактивная энергия в настоящее время также оплачивается.

В условиях обострения вопроса энергоэффективности недостатки упомянутой системы электропривода, с одной стороны, и стремление обеспечить подъемные установки современной полнообъемной системой автоматизации с другой, определили необходимость применения асинхронного электропривода с частотным регулированием скорости на переменном токе. Характеристики по управляемости и энергетике этих приводов не хуже систем привода на постоянном токе, при этом показатели надежности как у систем привода на переменном токе [2].

Целью данной работы является оценка эффективности перевода привода клетцевого подъема на частотное управление. Для ее реализации проведено обследование асинхронного электропривода подъема № 2 Центральной промплощадки шахты им. А.Ф. Засядько. По результатам обследования рассчитаны нагрузки и расходы электроэнергии для различных перемещений грузов при различных системах управления электроприводом. Для их сравнения и определения эффективности работы рассмотрены следующие варианты привода подъема:

Вариант 1 – существующий привод с асинхронными двигателями, регулированием скорости вращения изменением сопротивления в роторе и станцией динамического торможения;

Вариант 2 – привод с существующими асинхронными двигателями регулированием скорости вращения с помощью преобразователя частоты и станцией динамического торможения;

Вариант 3 – асинхронный привод с короткозамкнутыми двигателями, преобразователем частоты и блоком рекуперации электроэнергии.

Воздухоподающий ствол № 2 расположен на Центральной промплощадке шахты им. А.Ф. Засядько [3]. Кроме подачи воздуха в шахту ствол выполняет функцию перевозки людей и грузов на горизонт 802 м при наличии промежуточного горизонта 529 м. В 1987 го-

ду на стволе установлена подъемная машина типа 2Ц6×2,8 производства НКМЗ. Диаметр барабана подъемной машины составляет 6 м. Подъем людей и грузов осуществляется двумя двухэтажными клетями. Подъем уравновешен и не имеет уравновешивающих хвостовых канатов. Масса левой клетки составляет 8797 кг, а правой клетки – 8241 кг. Клетки подвешены к подъемной машине с помощью каната типа ГЛ – В – Н 1770. Масса погонного метра каната составляет 11,15 кг. Максимальное число людей, перемещаемых клетью, составляет 54 человека. Перевозка грузов по стволу производится с помощью грузовых вагонеток типа УВГ – 3,3. Масса вагонетки составляет 1308 кг. Номинальная масса груза в вагонетке – 5400 кг.

Привод подъемной машины осуществляется двумя высоковольтными асинхронными электродвигателями с фазным ротором типа АКН-2-18-43-20 производства Ленинградского электромеханического завода. Двигатели работают на общий одноступенчатый двухприводной редуктор типа ЦО-22 с передаточным числом  $i = 11,5$ . Двигатели через реверсор, включающий реверсивный пускатель направления вращения и пускатель динамического торможения, подключены на одну высоковольтную ячейку. Разгон и регулирование скорости осуществляется вручную от командоконтроллера с помощью роторной станции, разработанной ДНУ “Донецкуглеавтоматика”. Двигатели подъема оборудованы станцией динамического торможения типа ШДГ 6220 и рабочим тормозом.

Номинальные параметры двигателя АКН-2-18-43-20:

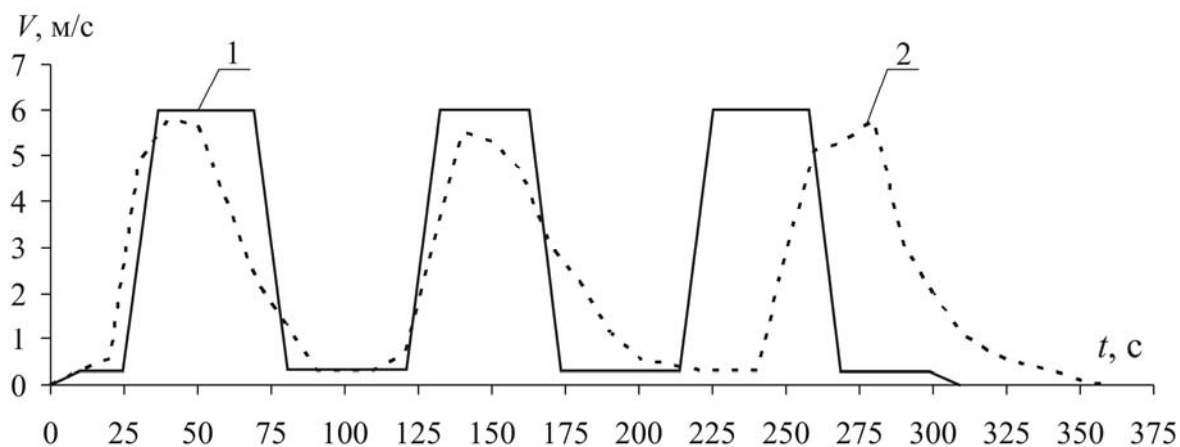
- мощность  $P_n = 800$  кВт;
- напряжение статора  $U_c = 6000$  В;
- ток статора  $I_c = 112$  А;
- момент двигателя  $M_n = 2650$  кГ м;
- перегрузочная способность  $M_{max}/M_n = 2,5$ ;
- КПД = 93,3 %;
- $\cos\varphi = 0,74$ ;
- напряжение ротора  $U_p = 1100$  В;
- ток ротора  $I_p = 445$  А;
- скорость вращения  $n_n = 294$  об/мин;
- маховый момент  $J = 3,5$  тс·м<sup>2</sup>;
- соединение обмоток – Y.

Расчетная скорость перемещения клетки при номинальной скорости вращения двигателей составляет 8,72 м/с. В настоящее время по состоянию ствола скорость при перевозке груза ограничена до 6 м/с, а при перевозке людей до 5 м/с. Расчетное ускорение в период разгона 0,52 м/с<sup>2</sup>, максимальное замедление в период динамического торможения 0,59 м/с<sup>2</sup>. Номинальные параметры динамического торможения: напряжение – 230 В; ток статора 150 – 225 А; скорость при спуске расчетного груза 0,5 м/с – 3,0 м/с. Скорость перемещения клетки при дотягивании, проверке ствола, навивке канатов и др. составляет 0,3 м/с [4]. Длительность подъема груза с горизонта 802 м составляет в среднем 5,5 – 6,0 минут.

Проведенный за год анализ перевозок грузов по стволу показал, что количество перемещений клетки колеблется от 160 до 200 в сутки и в среднем составляет 190. В том числе:

- подъем людей – 32;
- спуск людей – 25;
- подъем груза с гор. 802 м на гор. 529 м – 26;
- спуск порожняка с гор. 529 м на гор. 802 м – 14;
- подъем груза с гор. 802 м на гор. 0 м – 15;
- спуск длинномера – 2;
- спуск груза с гор. 0 м на гор. 802 м – 21;
- спуск груза с гор. 529 м на гор. 802 м – 11;
- перегон клетки с гор. 0 м на гор. 802 м – 20;
- перегон клетки с гор. 529 м на гор. 802 м – 24.

Исходя из допустимого значения ускорения при разгоне и торможении и максимальной скорости движения клетки, а также учитывая, что из-за нарушений в стволе при прохождении горизонта 529 м обеими клетями скорость необходимо снизить до 0,3 м/с, можно построить расчетную диаграмму скорости перемещения клетки с горизонта 0 м на горизонт 802 м, которая показана на рис.1. Диаграммы скорости для спуска и подъема груза выглядят практически одинаково. На этом же рисунке показана фактическая диаграмма, полученная путем усреднения фактических значений скорости записанных при перемещении грузов по стволу между теми же горизонтами. Как видно из рис. 1, фактическая диаграмма скорости значительно отличается от расчетной как по времени, так и по форме кривой, так как зависит от работы конкретного оператора подъемной машины. Форма кривой 2 позволяет утверждать, что реальное потребление электроэнергии, а, следовательно, и ее потери больше расчетных.



1 – расчетная; 2 – фактическая

Рис. 1 – Диаграмма скорости клетки при подъеме груза с гор. 0 м на гор. 802 м.

Расчет моментов и мощности привода подъемной установки проведен по методике, изложенной в [5]. Рассчитанное усилие на окружности навивки для подъема и спуска груза между горизонтами 0 м и 802 м приведено на рис. 2. Максимальная перегрузка двигателей привода подъема составляет 1,22 от номинальной в течение 12 с, что не превышает паспортных данных двигателя. Аналогично проводим расчеты и для всех остальных перемещений клетки.

Мощность, потребляемую от сети электродвигателями для каждого периода диаграммы в двигательном режиме  $P_c$ , режиме динамического торможения  $P_m$ , а также часть мощности идущую на совершение работы по подъему (спуску) груза  $P_{\text{дв}}$  можно определить по формулам:

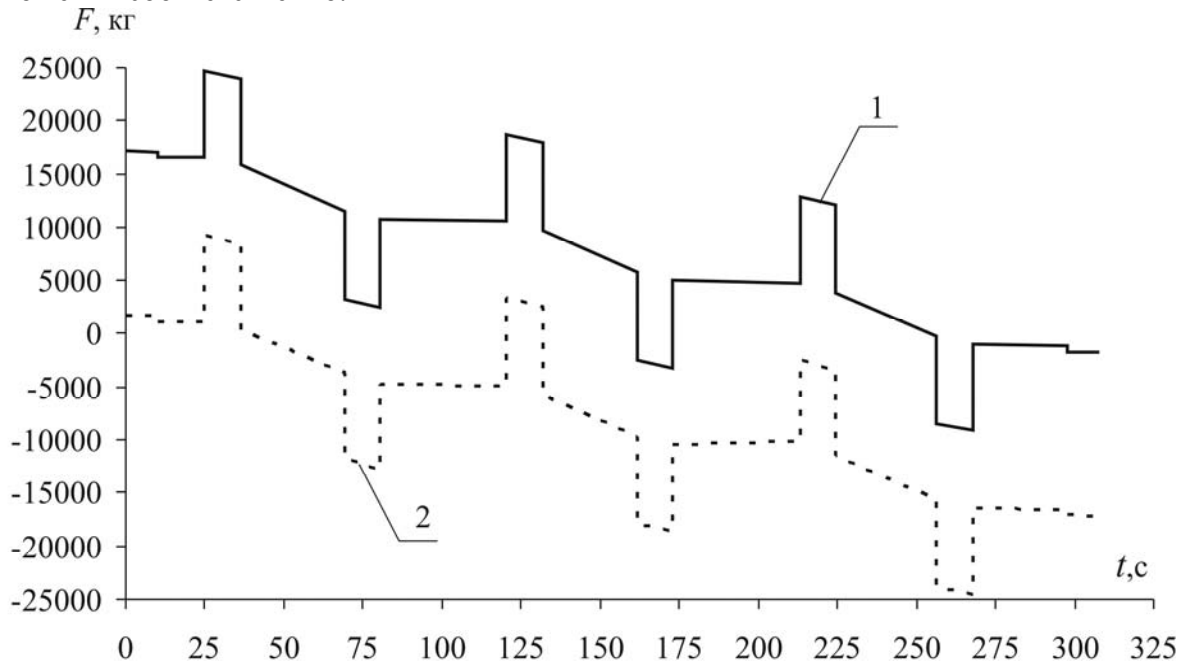
$$P_c = \frac{F_{cp} \cdot V_{\text{max}}}{102 \cdot \eta_{3n} \cdot \eta_{\text{дв}}}; \quad P_m = U_m \cdot I_m; \quad P_{\text{дв}} = \frac{F_{cp} \cdot V_{cp}}{102 \cdot \eta_{3n} \cdot \eta_{\text{дв}}}, \quad (1)$$

где  $F_{cp}$  – среднее усилие на окружности навивки;  $V_{\text{max}}$  и  $V_{cp}$  – максимальная и средняя скорости перемещения клетки соответственно;  $\eta_{3n}$  – КПД редуктора;  $\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя.  $U_m$  – напряжение динамического торможения;  $I_m$  – ток статора двигателей при динамическом торможении.

Электроэнергия, потребляемая от сети за цикл подъема (спуска)  $W_c$ , часть энергии, идущая на совершение полезной работы  $W_{\text{дв}}$ , потери электроэнергии на пусковых сопротивлениях  $W_c$  и при динамическом торможении  $W_m$  определяются по формулам:

$$W_c = \sum P_c \cdot t_{\partial\partial} + W_m; \quad W_{\partial\partial} = \sum P_{\partial\partial} \cdot t_{\partial\partial}; \quad W_R = W_c - W_{\partial\partial}; \quad W_m = \sum P_m \cdot t_m, \quad (2)$$

где  $t_{\partial\partial}$  и  $t_m$  – время работы привода в двигательном режиме и в режиме динамического торможения соответственно.



1 – при подъеме груза; 2 – при спуске груза

Рис. 2 – Диаграмма усилия на барабане подъемной машины при подъеме и спуске груза.

Используя формулы (1), (2), определены мощности на валу двигателей и потребление электроэнергии при перемещении груза по стволу между горизонтами 802 м и 0 м, а также составляющие этой электроэнергии. Аналогично определены те же параметры и для других перемещений клетки по стволу. Зная количество электроэнергии, потребляемое приводом подъема от сети за каждую перемещение, ее составляющие, а также количество перемещений в сутки можно определить среднее суточное потребление электроэнергии приводом подъема. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Энергетические затраты по перемещению клетки за сутки для существующего привода подъема (Вариант 1)

Технологическая операция	Кол-во операций в сутки	Электроэнергия, кВт·ч			
		Затрачиваемая на перемещение груза	Потери в пусковых резисторах	Потери на динамическое торможение	Потребляемая из сети
Спуск людей	25	26,88	112,70	103,75	243,30
Подъем людей	32	558,76	1322,64	27,20	1908,60
Спуск порожняка	14	4,76	9,10	22,96	36,82

Подъем груза с 802 на 0	15	315,80	666,13	9,60	991,53
Подъем груза с 802 на 529	26	348,01	818,02	0	1166,03
Спуск груза с 0 на 802	21	33,40	80,44	74,97	188,81
Спуск груза с 529 на 802	11	–	–	19,94	19,94
Спуск длинномера	2	0,16	3,22	18,92	22,30
Перегон клетки с 0 на 802	20	143,58	335,31	41,80	520,69
Перегон клетки с 529 на 802	24	11,62	22,47	39,36	73,45
<b>Всего</b>	<b>190</b>	<b>1442,97</b>	<b>3370,03</b>	<b>358,5</b>	<b>5171,47</b>

Анализируя таблицу можно сказать, что расчетное суточное потребление электроэнергии электродвигателями подъема составляет 5,17 тыс. кВт·ч. Фактическое замеренное среднесуточное потребление электроэнергии составило 5,43 тыс. кВт·ч. При этом полезная электроэнергия, затрачиваемая на работу по перемещению грузов по стволу, даже с учетом потерь в электромеханическом оборудовании, составляет лишь 1,44 тыс. кВт·ч. Остальная электроэнергия затрачивается на динамическое торможение привода – 0,36 млн. кВт·ч и на потери в пусковых сопротивлениях – 3,37 млн. кВт·ч. Таким образом, суммарный коэффициент полезного действия электропривода при перемещении груза по стволу составляет около 28 %. В настоящее время существуют электроприводы с преобразователями частоты, которые, несмотря на свою относительную дороговизну, позволяют значительно повысить суммарный КПД электропривода по перемещению грузов.

Международный консорциум “Энергосбережение” в лице ООО “Укрэлектросервис” совместно с машиностроительными заводами Украины предлагает комплектные электроприводы переменного тока РЭН2В-ШПН-2000-УХЛ4 в высоковольтном исполнении для различных отраслей промышленности, в том числе для подъемных установок различного назначения (скиповые, клетевые, проходческие и др.). Данный привод позволяет использовать существующие двигатели, но наличие двух трансформаторов и отсутствие блока рекуперации электроэнергии снижает эффективность работы и уменьшает КПД привода подъема. Основные характеристики электропривода РЭН2В-ШПН-2000-УХЛ4: номинальное входное напряжение сети: 3~6000 В, 48 - 63 Гц; допустимые отклонения входного напряжения: от +10 % до – 15 %  $U_{ном}$ ; диапазон регулирования скорости  $D = 1:100$ ; форма выходного сигнала тока – синусоидальная; мощность статического преобразователя – 2 тыс. кВт; выходной коэффициент мощности – 0,90; коэффициент полезного действия – 0,97.

Используя диаграммы скорости и усилия на барабане подъемной машины для различных перемещений клетки, рассчитанные ранее, и учитывая, что применение тиристорных преобразователей частоты позволяет отказаться от роторных сопротивлений можно определить энергетические показатели электропривода грузоподъемного № 2 с частотно – регулируемым приводом без блока рекуперации (Вариант 2), за каждое перемещение клетки. Электрическая энергия, расходуемая в режиме динамического торможения, остается прежней. Электрическую мощность, потребляемую от сети электродвигателями в двигательном режиме можно определить по формуле:

$$P_c = \frac{F_{cp} \cdot V_{cp}}{102 \cdot \eta_{zn} \cdot \eta_{np}} \quad (3)$$

Электроэнергия, потребляемая от сети приводными электродвигателями подъема за технологическую операцию, определяется по формулам (2). Зная количество перемещений клетки производимых подъемной машиной в сутки можно рассчитать среднее суточное потребление электроэнергии приводом подъема при использовании преобразователей частоты РЭН2В-ШПН-2000-УХЛ4. При тех же значениях электроэнергии, затрачиваемой на работу по перемещению грузов по стволу, и электроэнергии затрачиваемой на динамическое торможение привод, полностью отсутствуют потери в пусковых сопротивлениях. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, предлагаемый электропривод подъема энергетически значительно более эффективен, чем существующий. Электродвигатели привода потребляют от сети в сутки 1,80 тыс. кВт·ч электроэнергии при той же энергии затрачиваемой на перемещение грузов. Применение преобразователей частоты позволяет почти в три раза сократить потребление электроэнергии и довести суммарный коэффициент полезного действия электропривода при перемещении грузов по стволу до 80 %.

Преобразователи частоты, оборудованные блоком рекуперации, позволяют электроэнергию, вырабатываемую при спуске грузов и торможении возвращать в сеть. Такие преобразователи являются наиболее энергетически эффективными и, несмотря на свою относительную дороговизну, позволяют еще больше повысить суммарный КПД электропривода по перемещению грузов [6].

Таблица 2 – Энергетические затраты по перемещению клетки за сутки для привода подъема с частотным управлением (Вариант 2)

Технологическая операция	Кол-во операций в сутки	Электроэнергия, кВт·ч			
		Затрачиваемая на перемещение груза	Потери в пусковых резисторах	Потери на динамическое торможение	Потребляемая из сети
Спуск людей	25	26,94	–	103,75	130,69
Подъем людей	32	558,76	–	27,20	585,96
Спуск порожняка	14	4,76	–	22,96	27,72
Подъем груза с 802 на 0	15	315,80	–	9,60	325,40
Подъем груза с 802 на 529	26	348,01	–	0	348,01
Спуск груза с 0 на 802	21	33,40	–	74,97	108,37
Спуск груза с 529 на 802	11	–	–	19,94	19,94
Спуск длинномера	2	0,16	–	18,92	19,08
Перегон клетки с 0 на 802	20	143,58	–	41,80	185,38
Перегон клетки с 529 на 802	24	11,62	–	39,36	50,98
<b>Всего</b>	<b>190</b>	<b>1443,03</b>	–	<b>358,5</b>	<b>1801,53</b>

Государственное предприятие НИИ ХЭМЗ предлагает комплектный электропривод переменного тока в составе четырехквadrантного комплектного преобразователя переменного тока со звеном рекуперации АКМ-1045-017, 690 В, 874 А и двух короткозамкнутых двигателей с принудительным охлаждением и усиленной изоляцией типа АДЧ-17-57-16У3, 800 кВт,

690 В, с номинальной скоростью 365 об/мин производства Харьковского электромеханического завода (Вариант 3). Недостатком данного предложения является необходимость замены существующих двигателей или их перемотка на напряжение 690 В. Предлагаемые двигатели типа АДЧ-17-57-16У3 по габаритным и присоединительным размерам полностью соответствуют двигателям АКН-2-18-43-20 и устанавливаются на существующие фундаменты.

Статор каждого двигателя питается от отдельного реверсивного преобразователя частоты. Преобразователи соединены между собой по схеме «ведущий – ведомый» и питаются от общего силового трансформатора, подключенного к сети 6 кВ. Контроль движения подъемного сосуда выполняет специализированное микропроцессорное устройство – монитор подъема АНМ – 100, получающий информацию от прецизионного датчика импульсов, установленного на валу шахтной подъемной машины.

Технология приводов переменного тока серии АКМ расширяет диапазон скорости двигателя от нулевой скорости до скорости, значительно превышающей номинальную, увеличивая тем самым производительность ведомого оборудования. Когда требуется меньшая производительность, привод снижает скорость и экономит электроэнергию. Главное преимущество приводов АКМ состоит в универсальности оборудования в том числе использовании силовых транзисторов по технологии IGBT и метода прямого регулирования момента, а также общепромышленной интерфейсной шины. Коэффициент полезного действия преобразователя частоты достигает 0,97.

Используя диаграммы скорости и усилия на барабанах подъемной машины для различных перемещений клетки, рассчитанные ранее, и учитывая, что применение четырехквadrантных преобразователей частоты с блоком рекуперации позволяет электроэнергию, вырабатываемую при спуске грузов и торможении возвращать в сеть, можно определить количество электроэнергии, потребляемое приводом подъема от сети за каждое перемещение клетки. Мощность, отдаваемая в сеть электродвигателями в тормозном режиме, определяется по формуле.

$$P_m = - \frac{F_{cp} \cdot V_{cp} \cdot \eta_{з.л} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{пр}}{102} \quad (4)$$

Зная количество перемещений клетки в сутки по формулам (2), (4) можно рассчитать среднее суточное потребление электроэнергии приводом подъема при использовании преобразователя частоты АКМ-1045-017, 690 В, 874 А. Результаты расчета приведены в табл. 3. Знак “ – “ в таблице говорит о том, что электроэнергия возвращается в сеть.

Таблица 3 – Энергетические затраты по перемещению клетки за сутки для привода подъема с частотным управлением и блоком рекуперации (Вариант 3)

Технологическая операция	Кол-во операций в сутки	Электроэнергия, кВт·ч			
		Затрачиваемая на перемещение груза	Потери в пусковых резисторах	При спуске и торможении	Потребляемая из сети
Спуск людей	25	26,94	–	-312,88	-285,94
Подъем людей	32	558,76	–	-26,06	532,70
Спуск порожняка	14	4,76	–	-77,42	-72,66
Подъем груза с 802 на 0	15	315,80	–	-17,43	298,37
Подъем груза с 802 на 529	26	348,01	–	0	348,01
Спуск груза с 0 на 802	21	33,40	–	-317,72	-284,32

Спуск груза с 529 на 802	11	0	–	-37,73	-37,73
Спуск длинномера	2	0,16	–	-29,15	-28,99
Перегон клетки с 0 на 802	20	143,58	–	-106,59	36,99
Перегон клетки с 529 на 802	24	11,62	–	-111,71	-100,09
<b>Всего</b>	<b>190</b>	<b>1443,03</b>	<b>–</b>	<b>-1036,69</b>	<b>406,34</b>

Анализируя таблицу можно сказать, что электропривод подъема по Варианту 3 энергетически более эффективен, чем по Варианту 1 и даже чем по Варианту 2. Электродвигатели привода подъемной машины потребляют от сети в сутки 0,41 тыс.кВт·ч электроэнергии, что почти в 13 раза меньше, чем у существующего и почти в 4,5 раза меньше, чем у привода по Варианту 2. При тех же значениях электроэнергии, затрачиваемой на работу по перемещению грузов по стволу и отсутствии потерь в пусковых сопротивлениях снижение электроэнергии, потребляемой от сети, достигается за счет возврата в сеть электроэнергии при спуске грузов и торможении, которая достигает 1,04 тыс. кВт·ч.

Для определения экономической эффективности системы электропривода подъемной машины для клетового подъема № 2 Центральной промлощадки шахты им. А.Ф. Засядько сравним энергетические показатели рассмотренных вариантов приводов с различными системами регулирования скорости. Потребление электроэнергии для этих вариантов за сутки и за год, а также ожидаемая экономия электроэнергии приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Затраты электроэнергии по сравниваемым вариантам

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Суточное потребление электроэнергии, кВт·ч	5171,47	1801,53	406,34
Годовое потребление электроэнергии, тыс. кВт·ч	1887,59	657,56	148,31
Годовая экономия электроэнергии, тыс. кВт·ч	–	1230,03	1739,28

Экономическая целесообразность замены существующей системы привода шахтной машины включающего асинхронные двигатели с фазным ротором, роторную станцию и станцию динамического торможения на систему привода с частотным управлением и блоком рекуперации при постоянном повышении цены на электроэнергию очевидна. Годовая экономия электроэнергии составит около 1740 тыс. кВт·ч.

#### Список литературы

1. Тиристорный электропривод рудничного подъема / А.Д. Динкель, В.Е. Католиков, В.И. Петренко [и др.]. – М.: «Недра», 1977. – 312 с.
2. М.М. Казачковський Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти (навчальний посібник) – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 197 с.
3. Разработка технических предложений по энергосбережению применительно к системам тепло- и электропотребления шахты им. А.Ф. Засядько: отчет о НИР (заключит.): 445 / ООО «Энергия»; рук. Булат А.Ф.; исполн.: Лукинов В.В. [и др.]. – Днепропетровск, 2006. – 126 с.
4. М.Н. Василевский Асинхронный привод шахтных подъемных машин – М.: «Недра», 1964. – 447 с.
5. Н.К. Правицкий Рудничные подъемные установки – М.: Госгортехиздат, 1963. – 416 с.
6. М.М. Казачковський Комплектні електроприводи (навчальний посібник) – Дніпропетровськ: НГА України, 2003. – 226 с.