

# Повышение энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки с использованием роторного частотного электропривода «ЭРАТОН-ФР»

Иванцов В.В.

В данной статье проводится оценка повышения энергоэффективности и производительности клетевой шахтной подъемной установки (ШПУ), предназначенной для подъема руды, за счет применения роторного частотно-регулируемого электропривода типа «ЭРАТОН-ФР» на примере ШПУ Казского филиала ОАО «Евразруда».

## 1. Общие показатели действующей шахтной подъемной установки

- 1.1. Тип подъемной машины: ЦР5·3,2/0,55
- 1.2. Тип подъемных сосудов: клеть-противовес
- 1.3. Количество обслуживаемых горизонтов — 4.
- 1.4. Высота подъема относительно поверхности для горизонта №1 — 450м, №2 — 520м, №3 — 590м, №4 — 660м.
- 1.5. Режимы работы ШПМ: 1) Подъем груза; 2) Перегон сосудов; 3) Осмотр ствола шахты; 4) Замена каната; 5) Замена сосудов; 6) Одноконцевой подъем (клеть, противовеса)
- 1.6. Параметры барабана
  - 1.6.1. Диаметр барабана - 5 м
  - 1.6.2. Ширина барабана - 3,2 м
  - 1.6.3. Момент инерции барабана - 260000 кг·м<sup>2</sup>
- 1.7. Параметры редуктора
  - 1.7.1. Тип редуктора - ЦО-22
  - 1.7.2. Коэффициент редукции - 10,5
  - 1.7.3. Момент инерции редуктора - 62500 кг·м<sup>2</sup>
- 1.8. Параметры шкива
  - 1.8.1. Момент инерции шкива - 52500 кг·м<sup>2</sup>
  - 1.8.2. Диаметр шкива - 5 м
- 1.9. Параметры клетки, груза, противовеса
  - 1.9.1. Масса пустой клетки (с прицепным устройством) - 7700 кг
  - 1.9.2. Масса пустой вагонетки, загоняемой в клеть - 4800 кг
  - 1.9.3. Максимальная масса груза в вагонетке - 8200 кг
  - 1.9.4. Типовая масса груза в вагонетке при подъеме груза - 7500 кг
  - 1.9.5. Типовая масса груза в вагонетке при спуске груза - 0 кг
  - 1.9.6. Количество людей в клетке при спуске-подъеме - 20 ед.
  - 1.9.7. Масса противовеса - 13750 кг
- 1.10. Параметры канатов
  - 1.10.1. Удельная масса головного каната - 10,6 кг/м
  - 1.10.2. Количество головных канатов - 1 шт.
  - 1.10.3. Количество хвостовых канатов - 0 шт.
  - 1.10.4. Длина струны каната - 60 м
- 1.11. Количество ступеней роторной станции и номиналы резисторов:
  - 1) 3,3 Ом; 2) 1,14 Ом; 3) 0,68 Ом; 4) 0,35 Ом;
  - 5) 0,17 Ом; 6) 0,1 Ом; 7) 0,046 Ом; 8) 0,017 Ом.
- 1.12. Ускорение, скорость
  - 1.12.1. Максимальное ускорение - 0,8 м/с<sup>2</sup>
  - 1.12.2. Максимальная скорость подъема-спуска груза - 9,2 м/с
  - 1.12.3. Максимальная скорость подъема-спуска людей - 4 м/с
  - 1.12.4. Скорость осмотра ствола шахты - 0,3 м/с
- 1.13. Параметры электродвигателей ШПМ
  - 1.13.1. Количество электродвигателей ШПМ - 2

1.13.2. Тип электродвигателей	АКН2-18-36-16 МУХЛ4	
1.13.3. Номинальная мощность	- 800	кВт
1.13.4. Номинальная скорость	- 370	об/мин
1.13.5. Напряжение статора	- 6000	В
1.13.6. Номинальный ток статора	- 109	А
1.13.7. КПД	- 93,9	%
1.13.8. $\cos\varphi$	- 0,76	
1.13.9. Напряжение ротора	- 950	В
1.13.10. Номинальный ток ротора	- 520	А
1.13.11. Момент инерции ротора	- 900	кг·м <sup>2</sup>
1.14. Усредненные показатели работы клетового подъема в течение суток		
1.14.1. Количество спусков клетки с людьми	- 3	
1.14.2. Количество подъемов клетки с людьми	- 3	
1.14.3. Количество спусков пустой клетки	- 3	
1.14.4. Количество подъемов пустой клетки	- 3	
1.14.5. Количество спусков клетки с пустой вагонеткой	- 260	
1.14.6. Количество подъемов клетки с пустой вагонеткой	- 2	
1.14.7. Количество спусков клетки с груженой вагонеткой	- 2	
1.14.8. Количество подъемов клетки с груженой вагонеткой	- 260	
1.14.9. Количество спусков клетки на мин. скорости	- 1	
1.14.10. Количество подъемов клетки на мин. скорости	- 1	
1.14.11. Общее количество подъемов-спусков за сутки	- 538	
1.14.12. Средняя масса груза в клету	- 12300	
1.15. Количество рабочих дней в году	- 310	

## 2. Кинематика действующей шахтной подъемной установки

Показатели кинематики клетового подъема были определены по результатам обработки данных регистратора работы шахтной подъемной установки (ШПУ) при подъеме руды с отметки -90, что соответствует высоте подъема 520 м. Показатели тахограммы движения клетки ШПУ при подъеме руды с отметки -90 представлены в Таблице 1 (спуск пустой вагонетки) и Таблице 2 (подъем груженой вагонетки).

В Таблицах 1 и 2 использованы следующие обозначения:  $a$  — ускорение клетки на соответствующем участке движения ( $\text{м/с}^2$ );  $V_{\text{cp}}$  — средняя скорость клетки на участке движения ( $\text{м/с}$ );  $t$  — интервал времени от начала движения до конца соответствующего участка ( $\text{с}$ );  $\Delta t$  — длительность участка движения ( $\text{с}$ );  $S$  — путь, пройденный клетью от начала движения до конца соответствующего участка ( $\text{м}$ );  $\Delta S$  — путь, пройденный клетью на соответствующем участке ( $\text{м}$ ).

Тахограмма движения клетки вниз с пустой вагонеткой (Таблица 1) содержит следующие участки движения со среднестатистическими показателями:

- 1) снятие с кулаков (подъем клетки вверх на  $\Delta S = 0,3$  м от разгрузочной площадки за  $\Delta t = 1$  с);
- 2) разгон вниз (разгон клетки с  $a = 0,83$   $\text{м/с}^2$  до  $V = 9,1$   $\text{м/с}$  за  $\Delta t = 11$  с на участке  $\Delta S = 50,1$  м);
- 3) движение с постоянной скоростью ( $a = 0$   $\text{м/с}^2$ ;  $V = 9,1$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 43,5$  с;  $\Delta S = 395,9$  м);
- 4) замедление вниз ( $a = -0,69$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 5,3$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 11$  с;  $\Delta S = 58,3$  м);
- 5) дотягивание вниз ( $a = -0,06$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 1,07$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 14$  с;  $\Delta S = 15$  м);
- 6) замедление вниз ( $a = -0,27$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 0,37$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 2$  с;  $\Delta S = 0,7$  м);
- 7) посадка на кулаки (на загрузочной площадке  $\Delta t = 4$  с;  $\Delta S = 0,4$  м);
- 8) пауза на замену пустого вагона на груженный ( $\Delta t = 20$  с).

Тахограмма движения клетки вверх с груженой вагонеткой (Таблица 2) содержит следующие участки движения со среднестатистическими показателями:

- 1) разгон вверх (разгон клетки с  $a = 0,6$   $\text{м/с}^2$  до  $V = 9,0$   $\text{м/с}$  за  $\Delta t = 15$  с на участке  $\Delta S = 67,5$  м);
- 2) движение с постоянной скоростью ( $a = 0$   $\text{м/с}^2$ ;  $V = 9,0$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 38$  с;  $\Delta S = 342$  м);
- 3) замедление вверх ( $a = -0,45$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 5,6$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 15$  с;  $\Delta S = 84,2$  м);
- 4) дотягивание вверх ( $a = -0,08$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 1,5$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 18$  с;  $\Delta S = 26,4$  м);
- 5) стопорение вверх ( $a = -0,71$   $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{cp}} = 0,4$   $\text{м/с}$ ;  $\Delta t = 1$  с;  $\Delta S = 0,4$  м);
- 6) пауза  $\Delta t = 2$  с;
- 7) посадка на кулаки ( $\Delta t = 4$  с;  $\Delta S = 0,4$  м);

8) пауза на замену груженого вагона на пустой ( $\Delta t = 20$  с).

	снятие с кулаков	разгон вниз	движение с пос. ск.	замедл. вниз	дотяг. вниз	замедл. вниз	посадка на кулаки	пауза
a, м/с <sup>2</sup>	0,00	0,83	0,00	-0,69	-0,06	-0,27	0,00	0,0
V <sub>ср</sub> , м/с	-0,3	4,55	9,1	5,3	1,07	0,37	0,1	0,0
t, с	1,0	12,0	55,5	66,5	80,5	82,5	86,5	106,5
$\Delta t$ , с	1,0	11,0	43,5	11,0	14,0	2,0	4,0	20,0
S, м	-0,3	49,8	445,6	503,9	518,9	519,6	520,0	520,0

Таблица 1: Фактическая тахограмма движения клетки вниз с пустой вагонеткой

	разгон вверх	движ. с пос. ск.	замедл. вверх	дотяг. вверх	стопор. вверх	пауза	посадка на кулаки	пауза	цикл
a, м/с <sup>2</sup>	0,60	0,00	-0,45	-0,08	-0,71	0,00	0,00	0,0	
V <sub>ср</sub> , м/с	4,5	9,0	5,6	1,5	0,4	0,0	-0,1	0,0	
t, с	15,0	53,0	68,0	86,0	87,0	89,0	93,0	113,0	219,5
$\Delta t$ , с	15,0	38,0	15,0	18,0	1,0	2,0	4,0	20,0	
S, м	67,5	409,5	493,7	520,1	520,4	520,4	520,0	520,0	

Таблица 2: Фактическая тахограмма движения клетки вверх с груженой вагонеткой

Согласно данным Таблицы 1 и Таблицы 2 время цикла при подъеме руды с уровня -90 составляет 219,5 с при длительности паузы на загрузку клетки 20 с. Реально длительность паузы на загрузку клетки колеблется от 14 до 25 с.

### 3. Динамика действующей шахтной подъемной установки

На основе динамического уравнения М.М. Федорова и фактических тахограмм движения ШПУ (Таблицы 1 и 2) выполнен расчет диаграмм изменения момента ( $M_d$ ,  $H_M$ ) на валу электродвигателя для режимов подъема руды с отметки -90. Результаты расчетов представлены в Таблицах 3 и 4.

	н. сн с кул	к. сн с кул	н. разг вниз	к. разг вниз	н движ.	к движ.	н замед вниз	к замед вниз	н дотяг вниз	к дотяг вниз	н замед вниз	к замед вниз	н посад кулаки	к посад кулаки
a, м/с <sup>2</sup>	0,0	0,0	0,83	0,83	0,0	0,0	-0,69	-0,69	-0,06	-0,06	-0,3	-0,3	0,0	0,0
V, м/с	-0,3	-0,3	0,0	9,1	9,1	9,1	9,1	1,5	1,5	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1
t, с	0,0	1,0	1,0	12,0	12,0	55,5	55,5	66,5	66,5	80,5	80,5	82,5	82,5	86,5
S, м	0,0	-0,3	-0,3	49,8	49,8	445,6	445,6	503,9	503,9	518,9	518,9	519,6	519,6	520,0

Таблица 3: Зависимость момента на валу приводного электродвигателя при спуске клетки с пустой вагонеткой

	н разг	к разг	н движ	к движ	н замед	к замед	н дотяг	к дотяг	н стоп	к стоп	н паузы	к паузы	н пос к	к пос к
a, м/с <sup>2</sup>	0,60	0,60	0,00	0,00	-0,45	-0,45	-0,08	-0,08	-0,71	-0,71	0,00	0,00	0,00	0,00
V, м/с	0,0	9,0	9,0	9,0	9,0	2,2	2,2	0,7	0,7	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1
t, с	0	15,0	15,0	53,0	53,0	68,0	68,0	86,0	86,0	87,0	87,0	89,0	89,0	93,0
S, м	0	67,5	67,5	409,5	409,5	493,7	493,7	520,1	520,1	520,4	520,4	520,4	520,4	520,0

Таблица 4: Зависимость момента на валу приводного электродвигателя при спуске клетки с пустой вагонеткой

Согласно данным Таблицы 3 при спуске в шахту пустой вагонетки момент электродвигателя ( $M_d$ ) имеет положительные значения на интервалах снятия с кулаков, разгона и движения с постоянной скоростью. На этих интервалах электродвигатели потребляют из сети активную мощность и передают ее на вал для выполнения полезной работы ( $P_v = M_d * \omega > 0$ ). На интервалах замедления, дотягивания и посадки на кулаки момент электродвигателя отрицателен, что соответствует режиму торможения электродвигателя. В режиме торможения с отрицательным моментом активная мощность вала отрицательна ( $P_v = M_d * \omega < 0$ ), что соответствует возврату энергии с вала в электродвигатель. Возвращаемую энергию с вала в электродвигатель

целесообразно вернуть в сеть. Если возврат энергии в сеть невозможен, энергия должна быть затрачена на нагрев элементов электропривода, что повышает непроизводительные затраты электроэнергии.

По данным Таблицы 4 при подъеме груженой вагонетки из шахты момент электродвигателя ( $M_d$ ) положителен на интервалах разгона, движения с постоянной скоростью, дотягивания и посадки на кулаки. На этих интервалах активная мощность из сети передается на вал электродвигателей и выполняет полезную работу. На интервалах замедления и стопорения момент отрицателен, электродвигатель в режиме торможения, активная мощность с вала возвращается в электродвигатель.

#### 4. Характеристика электропривода действующей шахтной подъемной установки

Однолинейная схема силовых цепей электропривода ШПУ, работающего в настоящее время на клетевой установке шахты, показана на рис. 1. Действующий электропривод подъемной установки содержит два электродвигателя (Д1, Д2) с фазным ротором типа АКН2-18-36-16МУХЛ4 (номинальная мощность 800 кВт, номинальные обороты 370 об/мин), реверсоры (Р1, Р2) в цепях статора электродвигателей, станцию динамического торможения (СДТ) и пусковые резисторно-контакторные станции (ПРКС1, ПРКС2) в цепях ротора электродвигателей. ПРКС содержит восемь ступеней переключения резисторов.

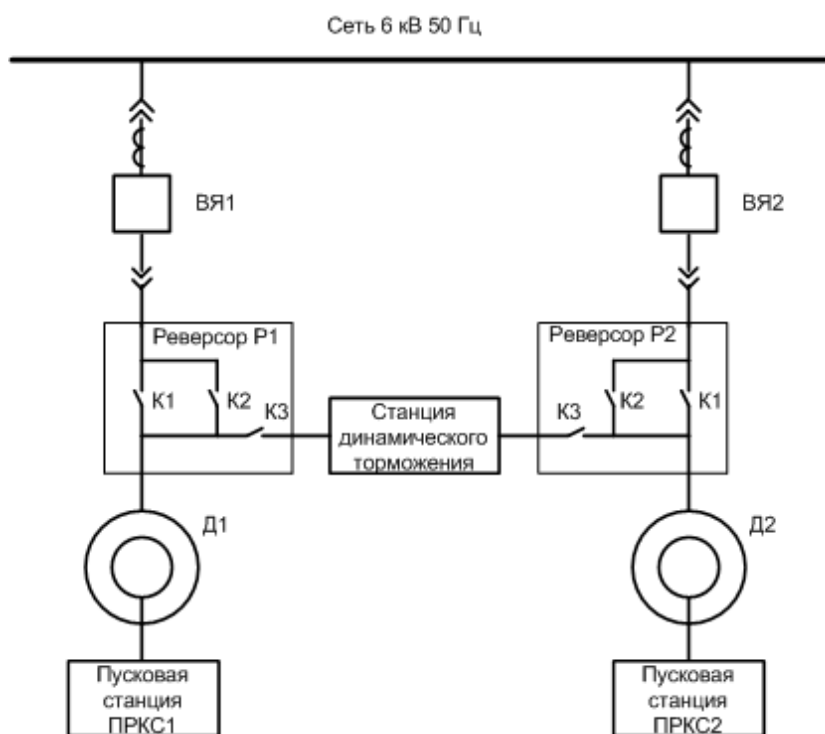


Рис. 1. Однолинейная структурная схема электропривода действующей ШПУ

На рис. 2 показаны структурные схемы силовых цепей электропривода ШПУ с ПРКС и СДТ, иллюстрирующие направления потоков активной мощности в системе при положительном моменте на валу электродвигателей (Рис. 2 а - двигательный режим) и при отрицательном моменте на валу (Рис. 2 б - режим торможения).

В двигательном режиме (рис. 2 а) активная мощность из сети 6 кВ 50 Гц ( $P_c$ ) через цепи статоров (Р1) и валы электродвигателей ( $P_v$ ) затрачивается на подъем груза ( $P_d$ ). При этом часть мощности статоров электродвигателей (Р1) поступает в ротор ( $P_p$ ) и расходуется в ПРКС на нагрев сопротивлений. Величину потерь мощности в сопротивлениях ПРКС двух электродвигателей в этом режиме ( $P_{pd}$ ) можно оценить по следующему соотношению

$$P_{pd} = 2 \cdot 3 \cdot (U_{po} \cdot (V_c - V) / V_c)^2 / R_p, \quad (1)$$

где  $U_{po}$  – фазное напряжение ротора при нулевой скорости;

$V_c$  – скорость клетки при синхронной скорости двигателей (9,35 м/с);  
 $V$  – скорость клетки в данный момент времени;  
 $R_p$  – сопротивление фазы ротора в данный момент времени.

В режиме торможения (рис. 2 б) электродвигатели отключаются от сети и в ротор вводятся сопротивления. При отрицательном моменте на валу электродвигателей мощность с вала ( $P_b$ ) поступает в электродвигатели. Поскольку в ШПМ используется динамическое торможение с отключением статора от сети 6 кВ 50 Гц и подключением двух фаз к источнику постоянного тока СДТ, вся мощность, поступающая с вала электродвигателей, расходуется на нагрев электродвигателей и нагрев роторных сопротивлений ПРКС. Величину потерь мощности в элементах электропривода ШПМ в режиме динамического торможения ( $P_{пт}$ ) можно оценить по следующему соотношению

$$P_{пт} = 2 * P_b = 2 * M_d * \omega = 2 * M_d * 2 * \pi * n_c * V / V_c / 60, \quad (2)$$

где  $M_d$  – момент на валу двигателей при торможении;  
 $n_c$  – синхронная скорость вала электродвигателей;  
 $V_c$  – скорость клетки при синхронной скорости двигателей (9,35 м/с);  
 $V$  – скорость клетки в данный момент времени.

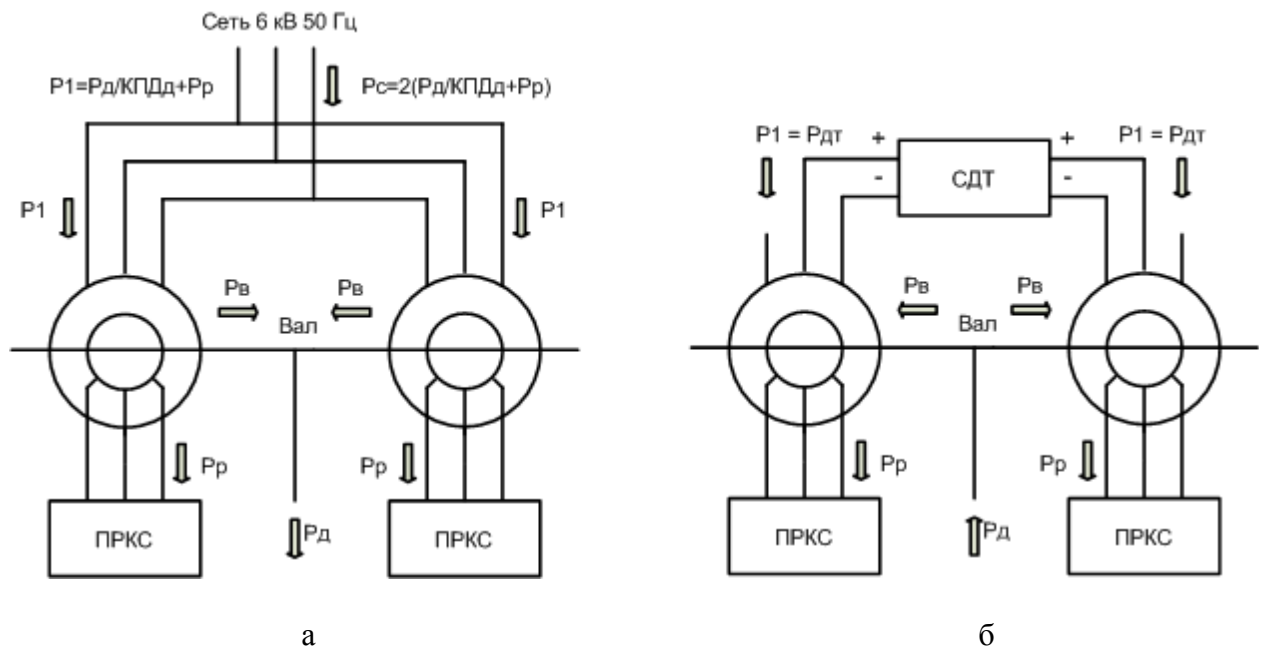


Рис. 2. Структурные схемы электропривода ШПУ в двигательном режиме (а) и в режиме торможения с отрицательным моментом (б)

На основе приведенных соотношений выполнен расчет потерь электроэнергии за год (310 рабочих дней) в электроприводе ШПУ ( $N_{pc}$ ), электроэнергии, затраченной на выполнение полезной работы по вращению вала ( $N_b$ ), и электроэнергии, потребленной из питающей сети ( $N_c = N_{pc} + N_b$ ) с существующим оборудованием ПРКС и СДТ для основного режима подъема руды из шахты с горизонта -90 (260 подъемов в смену):

$$N_{pc} = 965\,694 \text{ кВт*час}; \quad (3)$$

$$N_b = 1\,028\,780 \text{ кВт*час}; \quad (4)$$

$$N_c = 1\,994\,474 \text{ кВт*час}. \quad (5)$$

Расчет затрат электроэнергии показывает, что для выполнения полезной работы по подъему-спуску грузов было затрачено  $N_b = 1\,028\,780$  кВт\*час электроэнергии, а на нагрев роторных

сопротивлений ПРКС было затрачено 965 694 кВт\*час. Коэффициент полезного использования электроэнергии составил  $K_{п} = N_b / N_c = 1\,028\,780 / 1\,994\,474 = 0,52$ . Если энергию скольжения

ротора не использовать на нагрев роторных сопротивлений, а вернуть в сеть, то общее потребление электроэнергии ШПУ в рассматриваемом примере снизится на 48%.

Еще более низкие энергетические показатели действующий электропривод имеет в режимах спуска/подъема людей на пониженной скорости 4 м/с и при осмотре ствола шахты на скорости 0,3 м/с из-за еще больших потерь электроэнергии в роторных сопротивлениях. Однако, эти режимы не являются определяющими из-за их относительно небольшого количества (2-3%). С учетом этих режимов непроизводительные потери энергии в роторных сопротивлениях составляют около 50% потребляемой из сети электроэнергии.

Таким образом, используемый электропривод подъемной установки с роторными резисторно-контакторными станциями управления и динамическим торможением имеет низкие энергетические показатели. При разгоне, торможении и работе ШПМ на пониженной скорости расходуется значительная электроэнергия, идущая на нагрев роторных сопротивлений ПРКС, нагрев электродвигателя и износ механических тормозов. Непроизводительная расходуемая электроэнергия повышает себестоимость продукции и снижает прибыль.

Кроме низких энергетических показателей действующий электропривод имеет неудовлетворительные управляющие свойства. Так из-за необходимости выравнивания токов электродвигателей искусственно увеличен наклон механической характеристики электродвигателей за счет роторных сопротивлений на последней ступени ПРКС. Это привело к снижению скорости электродвигателей при подъеме грузовой вагонетки (Таблица 2) по сравнению со спуском пустой вагонетки (Таблица 1), что увеличило время цикла и снизило производительность ШПУ. Невозможность формирования требуемого момента электродвигателей при разгоне и торможении электродвигателей с ПРКС привело к снижению ускорения и увеличению времени разгона и торможения грузовой клетки с 11 с (Таблица 1) до 15 с (Таблица 2), что также снизило производительность ШПУ. Для исключения этих недостатков необходимо применить электропривод, обеспечивающий стабилизацию скорости электродвигателей и формирование заданного ускорения клетки независимо от нагрузки электродвигателей.

Существенные недостатки используемого электропривода связаны со станцией динамического торможения, которая не может обеспечить высокую точность торможения клетки из-за низких управляющих свойств электродвигателя в режиме динамического торможения. Для обеспечения высоких управляющих свойств электродвигателей и обеспечения высокой точности торможения необходимо применить электропривод с управляемым рекуперативным торможением.

Таким образом, действующий электропривод с ПРКС и СДТ имеет низкие энергетические показатели с коэффициентом полезного использования электроэнергии около 50% и низкую точность управления, которая приводит к снижению производительности ШПУ.

## **5. Характеристика системы управления действующей ШПУ**

В настоящее время управление шахтной подъемной установкой осуществляется оператором в ручном режиме. Ручное управление ШПУ в комбинации с низкими управляющими свойствами используемого электропривода приводит к значительному снижению производительности подъемной установки. Доказательством этому служат следующие данные. Например, «*Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий металлургии с подземным способом разработки ВНТП 13-2-93*», ориентированные на применение высокоточных регулируемых электроприводов, рекомендуют обеспечивать путь подхода к приемной площадке на ползучей скорости не более 2 (двух) метров (п.п. 5.1.28). При этом согласно п.п. 11.1, 11.2 и 11.3 «*Общесоюзных норм технологического проектирования шахтных подъемных установок ОНТП 5-86*», рекомендованных к применению «*Нормами технологического проектирования рудников цветной металлургии с подземным способом разработки ВНТП 37 86*» (п.п. 4.1.3), скорость подхода к приемной площадке не должна превышать 0,5 м/с. При выполнении этих условий время подхода клетки к приемной площадке составит  $\Delta t = 2 / 0,5 = 4$  с. Согласно данным Таблиц 1 и 2 среднестатистическое время подхода клетки к приемным площадкам действующей ШПУ составляет 14 с и 18 с соответственно, т.е. в сумме 32 с вместо рекомендованных  $4 + 4 = 8$  с. Увеличение времени подхода к приемным площадкам и соответствующее увеличение времени цикла с рекомендованных 8 с до 32 с происходит из-за низкой точности управления ШПУ и боязни оператора совершить аварию. Очевидно, что используемый электропривод с низкими управляющими свойствами и ручное управление оператором не позволяют обеспечить высокую

точность управления ШПУ и минимизацию времени цикла за счет уменьшения продолжительности подхода клетки к приемным площадкам. Сокращение времени цикла и повышение производительности может обеспечить только высокоточный электропривод и автоматическая система управления ШПУ. Применение такой системы в рассматриваемом примере подъема руды с уровня -90 позволит сократить время цикла на  $\Delta t = 32 - 8 = 24$  с, т.е. с 219,5 с до  $219,5 - 24 = 195,5$  с и поднять производительность ШПУ на  $24 / 219,5 * 100 = 11\%$ .

Низкая точность электропривода и ручное управление ШПМ также приводит к повреждению механического оборудования подъемной установки и повышает эксплуатационные затраты.

## 6. Характеристика электропривода с роторными преобразователями частоты типа «ЭРАТОН-ФР-800-950-520»

Предлагается модернизировать ШПУ за счет применения высокоточного и энергоэффективного частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) с преобразователями частоты типа «ЭРАТОН-ФР-800-950-520» производства ЗАО «ЭРАСИБ», которые устанавливаются между цепями ротора АД ФР и питающей сетью, взамен имеющихся роторных пусковых резисторно-контакторных станций (ПРКС) и станции динамического торможения (СДТ). При этом старая станция управления с ПРКС и СДТ остается в горячем резерве с целью повышения надежности ШПУ.

Однолинейная структурная схема электропривода ШПУ с роторными преобразователями частоты «ЭРАТОН-ФР-800-950-520» показана на рис. 3 (схема подключения к сети 6 кВ уточняется при выполнении проекта).

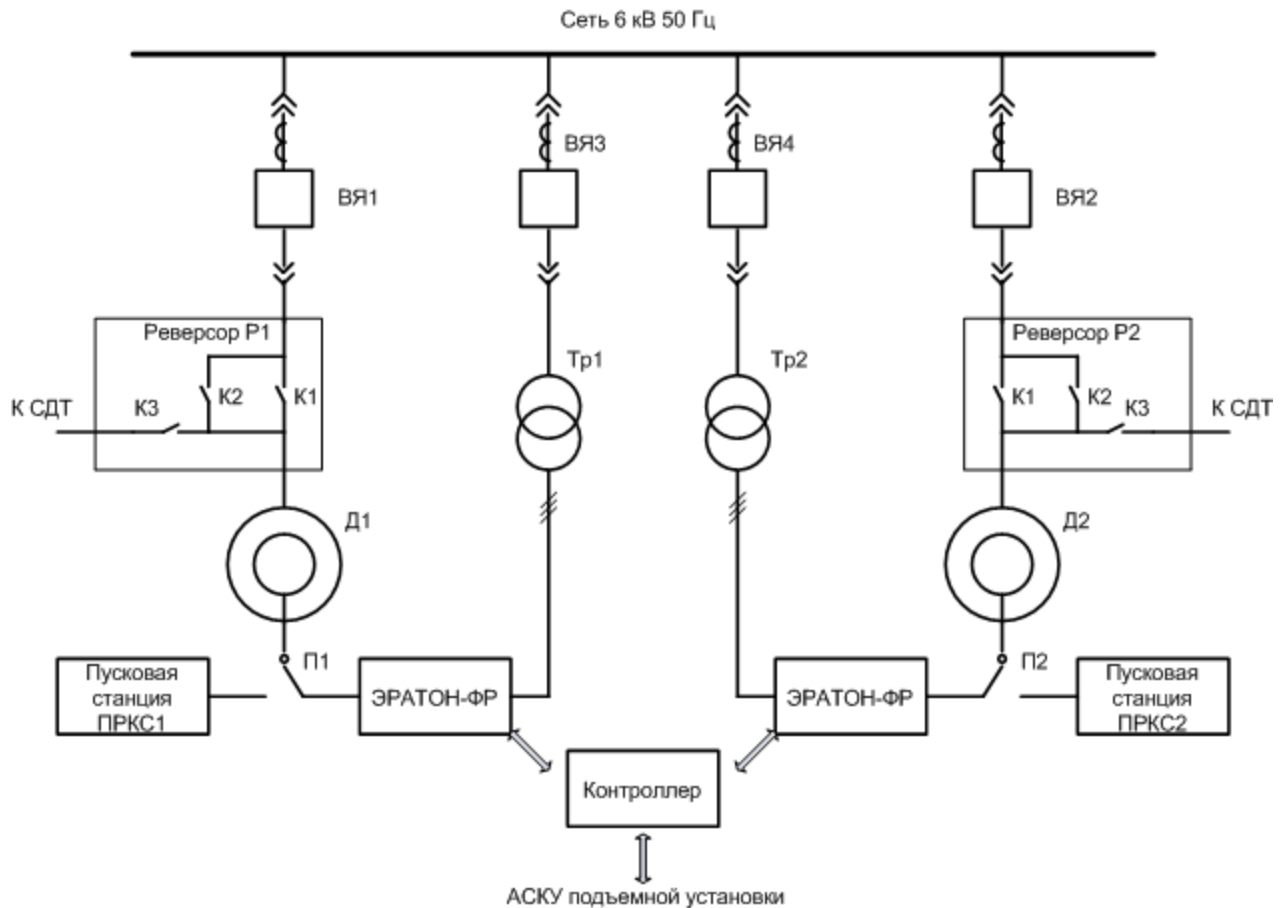


Рис. 3. Однолинейная схема силовых цепей электропривода ШПУ с ПЧ «ЭРАТОН-ФР»

Для частотного управления электродвигателями ШПУ между цепями ротора и питающей сетью 6 кВ 50 Гц устанавливаются два преобразователя частоты «ЭРАТОН-ФР-800-950-520». К роторам электродвигателей преобразователи подключаются через механические переключатели П1, П2. К питающей сети каждый преобразователь подключается через два согласующих

трансформатора (Тр1, Тр2) и две высоковольтные ячейки (ВЯ1, ВЯ2). Резервные пусковые станции ПРКС1, ПРКС2 могут подключаться к роторам электродвигателей через роторные переключатели П1, П2. Реверсоры Р1 и Р2 при работе преобразователей используются для реверса направления вращения электродвигателей Д1 и Д2 за счет изменения порядка чередования фаз напряжений статора аналогично существующему электроприводу с ПРКС, но станция динамического торможения не используется и отключена контакторами К3 реверсоров Р1, Р2. Между автоматизированной системой контроля и управления (АСКУ) установки и преобразователями частоты «ЭРАТОН-ФР» устанавливается контроллер связи с системой управления ШПУ, обеспечивающий обмен цифровой информацией и командами с автоматизированной системой управления и контроля подъемной установки (АСКУ ПУ).

Преобразователь частоты типа «ЭРАТОН-ФР» предназначен для преобразования напряжения питающей сети с постоянной частотой 50 Гц в трехфазное напряжение ротора с регулируемой амплитудой и частотой и регулирования величины и направления потока активной мощности в цепи ротора, определяющей момент электродвигателя.

Преобразователь частоты «ЭРАТОН-ФР-800-950-520» содержит два транзисторных инвертора напряжения — сетевой и роторный, которые объединены общим звеном постоянного тока с накопительным конденсатором. Между сетевым инвертором и согласующим трансформатором установлен силовой трехфазный LC-фильтр, который не пропускает высокочастотные пульсации в питающую сеть 50 Гц. Сетевой инвертор преобразует переменное напряжение сети 50 Гц в постоянное напряжение на конденсаторе и обеспечивает передачу энергии из звена постоянного тока в сеть 50 Гц и обратно. Роторный инвертор преобразует напряжение конденсатора в однофазное переменное напряжение с регулируемой амплитудой и частотой. Роторные инверторы формируют трехфазное регулируемое напряжение ротора электродвигателя.

За счет структуры силовых цепей с двумя транзисторными инверторами (роторным и сетевым), связанными звеном постоянного тока, преобразователь «ЭРАТОН-ФР» обеспечивает передачу активной мощности скольжения из ротора в питающую сеть, а также из сети в цепь ротора электродвигателя. Рекуперация энергии скольжения АД ФР в сеть обеспечивает плавный пуск и работу в двигательном режиме без потерь мощности в резисторах пусковой станции. При этом из питающей сети потребляется только мощность, передаваемая на вал электродвигателя. Изменение направления потока активной мощности в цепи ротора электродвигателя на противоположный (из сети в цепь ротора) переводит электродвигатель в режим рекуперативного торможения с возвратом энергии вала через электродвигатель в питающую сеть. При этом осуществляется рекуперативное торможение электродвигателя с минимальными потерями мощности в электродвигателе и преобразователе частоты.

Работа электропривода ШПУ с преобразователями частоты «ЭРАТОН-ФР» осуществляется следующим образом. При нулевой скорости двигателей (наложен механический тормоз) преобразователи частоты «ЭРАТОН-ФР» создают в роторе электродвигателей трехфазные напряжения, совпадающие по частоте, амплитуде и фазе с ЭДС ротора, наведенной статорной обмоткой. При этом ток ротора и момент электродвигателя равны нулю. Для плавного пуска электродвигателей система регулирования снижает напряжение преобразователей, что приводит к плавному увеличению тока роторов и момента электродвигателей. После выбора зазоров и люфтов в механических передачах снимается механический тормоз и электродвигатели плавно разгоняются за счет регулирования амплитуды и частоты напряжения, подаваемого преобразователями «ЭРАТОН-ФР» на обмотки роторов электродвигателей. При этом цифровая система автоматического регулирования преобразователей задает определенные значения токов роторов и моментов электродвигателей, которые обеспечивают требуемое ускорение при разгоне и необходимую скорость после разгона электродвигателей. Для торможения электродвигателей система регулирования снижает ток ротора и момент электродвигателей, а при необходимости быстрого торможения также изменяет и знак момента электродвигателя. При этом выполняется плавное торможение электродвигателей с возможностью возврата энергии торможения с вала в питающую сеть. После достижения нулевой скорости накладывается механический тормоз, после чего снижается до нуля ток ротора и момент электродвигателя. Для изменения направления вращения двигателей переключается порядок чередования фаз статора реверсорами Р1, Р2 и



электропривод подготавливается к запуску для движения ШПУ в обратном направлении. Далее процессы повторяются.

**Замена ПРКС и СДТ на ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР-800-950-520» обеспечивает:**

- работу двухдвигательной подъемной установки с выравниванием нагрузки электродвигателей с точностью не хуже 5%;
- надежную работу электропривода ШПУ в условиях «слабых» промышленных сетей;
- работу двухдвигательной ШПУ с одним двигателем в экстренных случаях;
- выбор зазоров в механических передачах и плавное натяжение канатов ШПУ;
- формирование с высокой точностью требуемой многопериодной диаграммы скорости подъемной машины независимо от изменения нагрузки;
- плавный разгон сосудов ШПУ за заданное время без потерь мощности в цепи ротора электродвигателя за счет возврата мощности скольжения ротора через преобразователь «ЭРАТОН-ФР» в питающую сеть;
- стабилизацию скорости сосудов ШПУ в периоды равномерного движения с точностью не хуже 1% независимо от степени уравниваемости и характера изменения конечных усилий;
- рекуперативное торможение с возвратом энергии движущихся масс в питающую сеть в периоды равномерного движения сосудов ШПУ при изменении знака конечного усилия;
- замедление сосудов ШПУ за заданное время с формированием требуемого усилия любого знака;
- рекуперативное торможение электродвигателей с возвратом энергии движущихся масс в питающую сеть в периоды замедления сосудов ШПУ при формировании отрицательных тормозных усилий;
- малое время замедления и высокую точность остановки ШПУ без применения механического тормоза, который включается только после полной остановки ШПУ;
- работу ШПУ на пониженных скоростях в режимах маневрирования, дотягивания, посадки на кулаки, осмотра ствола шахты без непроизводительных потерь электроэнергии в роторной управляющей станции;
- компенсацию реактивной мощности, потребляемой асинхронными электродвигателями ШПУ, без применения дополнительных компенсаторов реактивной мощности.

За счет перечисленных выше достоинств ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» обеспечивает снижение потребления электроэнергии ШПУ по сравнению с электроприводом на базе ПРКС за счет снижения потребления электроэнергии в периоды разгона, замедления перед остановкой и при движении на ползучих скоростях при подходе к приемным площадкам.

Дополнительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет рекуперативного торможения электропривода ШПУ с ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» в периоды равномерного движения сосудов при изменении знака конечного усилия с возвратом энергии с вала в сеть. Такие режимы возникают при подъеме клетки с людьми из шахты, подъеме пустой клетки из шахты и др.

Возможности экономии электроэнергии иллюстрируют структурные схемы электропривода ШПУ с роторными преобразователями «ЭРАТОН-ФР», изображенные на рис. 4. На рис. 4 а приведена однолинейная схема электропривода, на которой показаны направления потоков активной мощности в цепях электропривода, работающего в двигательном режиме с положительным моментом на валу, обеспечивающим передачу активной мощности из питающей сети на вал ШПУ. В этом режиме мощность скольжения ротора электродвигателей через роторные преобразователи частоты «ЭРАТОН-ФР» возвращается в сеть. При этом из сети потребляется мощность, поступающая на вал ШПУ для выполнения полезной работы ( $P_d$ ), и мощность потерь в электродвигателях и преобразователях частоты

$$P_c = 2 * (P_v / \text{КПД}_d + P_p * (1 - \text{КПД}_{\text{пч}})). \quad (6)$$

При высоких значениях коэффициента полезного действия (КПД) преобразователей частоты «ЭРАТОН-ФР» ( $\text{КПД}_{\text{пч}} = 0,98$ ) в двигательном режиме из сети потребляется активная мощность, близкая к мощности вала ШПУ.

На рис. 4 б показана схема электропривода с направлениями потоков активной мощности, соответствующими режиму рекуперативного торможения электропривода с отрицательным моментом на валу ШПУ. В этом режиме активная мощность с вала ШПУ ( $P_d$ ) через электродвигатели возвращается в питающую сеть за вычетом потерь в электродвигателях и преобразователях частоты

$$P_c = 2 * (P_v * \text{КПД}_d - P_p / \text{КПД}_{пч} * (1 - \text{КПД}_{пч})). \quad (7)$$

При высоких значениях  $\text{КПД}_{пч}$  в режиме рекуперативного торможения в сеть возвращается активная мощность, близкая к мощности, возвращаемой с вала в электродвигатели.

Работа электропривода с минимальными потерями мощности в цепях ротора электродвигателей, а также возврат мощности с вала ШПМ в питающую сеть в режимах рекуперативного торможения за счет применения роторных преобразователей частоты «ЭРАТОН-ФР» обеспечивает высокую энергоэффективность электропривода ШПУ.

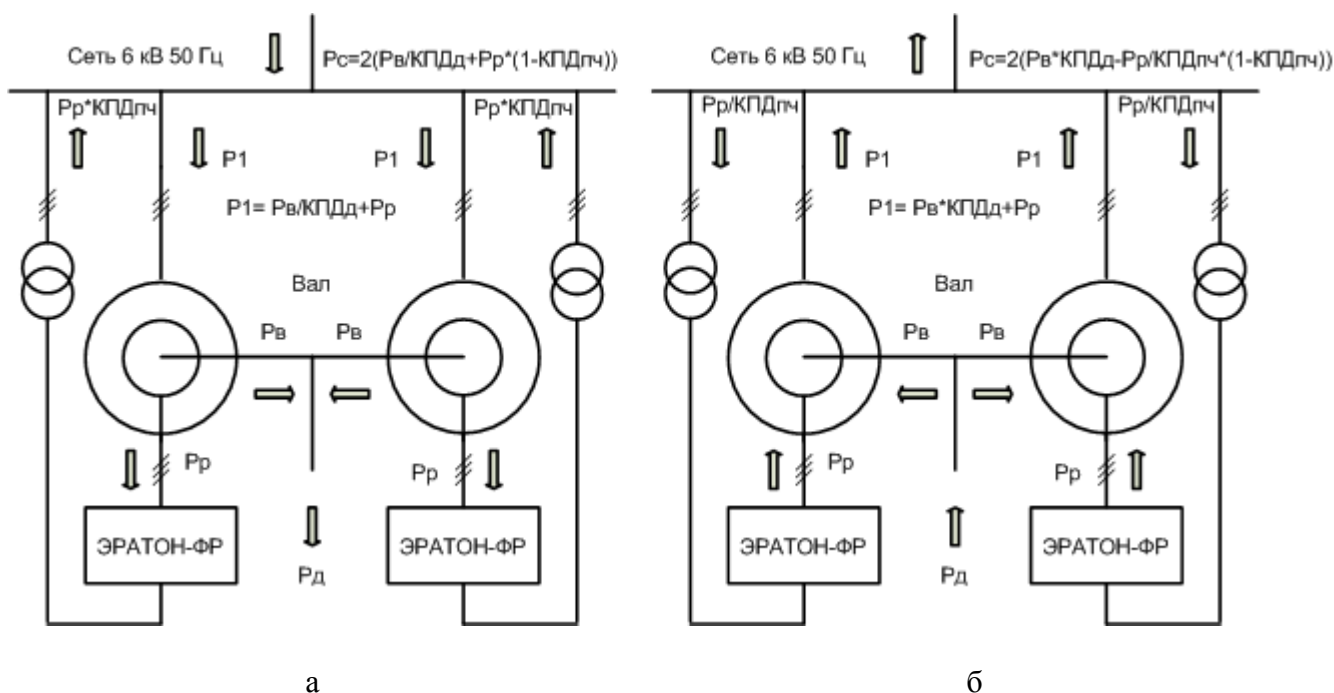


Рис. 4. Структурные схемы электропривода ШПМ с направлениями потоков активной мощности в двигательном режиме (а) и режиме рекуперативного торможения (б)

За счет формирования требуемой диаграммы скорости с плавным разгоном, регулированием и стабилизацией скорости, плавным замедлением и точной остановкой сосудов ШПУ с ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» способен уменьшить путь и время движения клетки на ползучей скорости до рекомендуемых значений (2–3 м), сократить время цикла и увеличить производительность ШПУ, а также исключить проскакивания и удары клетки, что продлит срок службы механизмов и снизит эксплуатационные затраты.

## 7. Заключение

Модернизация действующего электропривода ШПУ с использованием роторного частотного электропривода типа «ЭРАТОН-ФР» производства ЗАО «ЭРАСИБ» в рассматриваемом примере клетевой ШПУ Казского филиала ОАО «Евразруда» позволит снизить потребление электроэнергии подъемной установкой на 50% и повысить производительность ШПУ на 10-12%.