

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

Иванцов В.В., к.т.н., доцент, заместитель генерального директора ЗАО "ЭРАСИБ" (декабрь 2011 г.)

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·м²
- 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·м²
- 1.8. Параметры шкива
 - 1.8.1. Момент инерции шкива — 52500 кг·м²
 - 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/с²

- 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 шт.
- 1.13.2. Тип электродвигателей АKN2-18-36-16 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·м²

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 (м/с²); V_{cp} — средняя скорость клетки на участке движения (м/с); t — интервал времени от начала движения до конца соответствующего участка (с); Δt — длительность участка движения (с); S — путь, пройденный клетью от начала движения до конца соответствующего участка (м); ΔS — путь, пройденный клетью на соответствующем участке (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 $a = 0,83$ м/с² до $V = 9,1$ м/с за $\Delta t = 11$ с на участке $\Delta S = 50,1$ м);
3. движение с постоянной скоростью ($a = 0$ м/с²; $V = 9,1$ м/с; $\Delta t = 43,5$ с; $\Delta S = 395,9$ м);
4. замедление вниз ($a = -0,69$ м/с²; $V_{cp} = 5,3$ м/с; $\Delta t = 11$ с; $\Delta S = 58,3$ м);
5. дотягивание вниз ($a = -0,06$ м/с²; $V_{cp} = 1,07$ м/с; $\Delta t = 14$ с; $\Delta S = 15$ м);
6. замедление вниз ($a = -0,27$ м/с²; $V_{cp} = 0,37$ 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 $a = 0,6$ м/с² до $V = 9,0$ м/с за $\Delta t = 15$ с на участке $\Delta S = 67,5$ м);
2. движение с постоянной скоростью ($a = 0$ м/с²; $V = 9,0$ м/с; $\Delta t = 38$ с; $\Delta S = 342$ м);
3. замедление вверх ($a = -0,45$ м/с²; $V_{cp} = 5,6$ м/с; $\Delta t = 15$ с; $\Delta S = 84,2$ м);
4. дотягивание вверх ($a = -0,08$ м/с²; $V_{cp} = 1,5$ м/с; $\Delta t = 18$ с; $\Delta S = 26,4$ м);
5. стопорение вверх ($a = -0,71$ м/с²; $V_{cp} = 0,4$ 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).

Таблица 1: Фактическая тахограмма движения клетки вниз с пустой вагонеткой

снятие	разгон	движение	замедл.	дотяг.	замедл.	посадка	пауза
--------	--------	----------	---------	--------	---------	---------	-------

	с кулаков	вниз	с пос. ск.	вниз	вниз	вниз	на кулаки	
a, м/с ²	0,00	0,83	0,00	-0,69	-0,06	-0,27	0,00	0,0
V _{ср} , 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
Δt, 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
ΔS, м	-0,3	50,1	395,9	58,3	15,0	0,7	0,4	0,0

Таблица 2: Фактическая тахограмма движения клетки вверх с грузеной вагонеткой

	разгон	движ.	замедл.	дотяг.	стопор.	пауза	посадка	пауза	цикл
	вверх	с пос. ск.	вверх	вверх	вверх		на кулаки		
a, м/с ²	0,60	0,00	-0,45	-0,08	-0,71	0,00	0,00	0,0	
V _{ср} , 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
Δt, 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	
ΔS, м	67,5	342,0	84,2	26,4	0,4	0,0	-0,4	0,0	

Согласно данных 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 ($M_{д}$, $N_{м}$) на валу электродвигателя для режимов подъема руды с отметки -90. Результаты расчетов представлены в Таблицах 3 и 4.

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

	н. сн	к. сн	н. разг	к. разг	н движ.	к движ.	н замед	к замед	н дотяг	к дотяг	н замед	к замед	н посад	к посад
	с кул	с кул	вниз	вниз			вниз	вниз	вниз	вниз	вниз	вниз	кулаки	кулаки
a, м/с ²	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
M _д , Нм	8189	8197	22285	21045	6958	-2843	-14611	-16054	-5328	-5699	-4812	-4831	-4676	-4686

Таблица 4: Зависимость момента на валу приводного электродвигателя при подъеме клетки с грузеной 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 ²	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
M _д , Нм	25949	24278	13525	5058	-3039	-5123	1466	812	-10394	-10403	2311	2311	2311	2322

Согласно данных Таблицы 3 при спуске в шахту пустой вагонетки момент электродвигателя ($M_{д}$) 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 ($P_{в} = M_{д} \cdot \omega > 0$). 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 ($P_{в} = M_{д} \cdot \omega < 0$), 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 грузеной вагонетки из шахты момент электродвигателя ($M_{д}$) 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 ($D1$, $D2$) с фазным ротором типа АКН2-18-36-16МУХЛ4 (номинальная мощность 800 кВт, номинальные обороты 370 об/мин), реверсоры ($P1$, $P2$) 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.

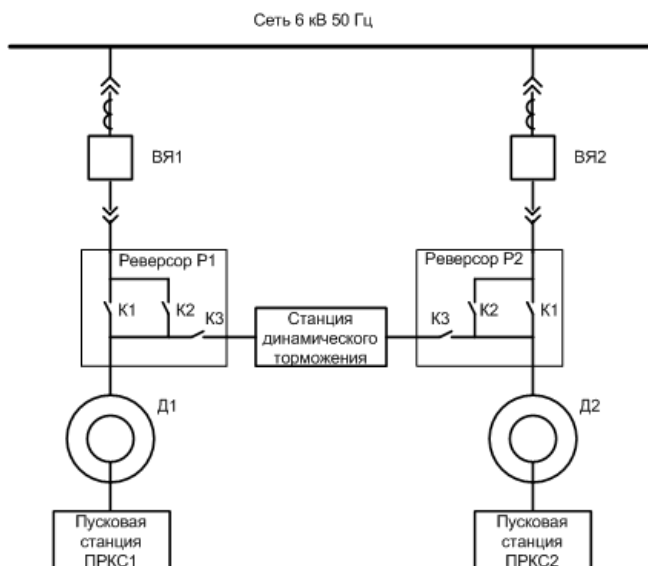


Рис. 1. Однолинейная структурная схема электропривода действующей ШПУ

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_B) 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

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

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.

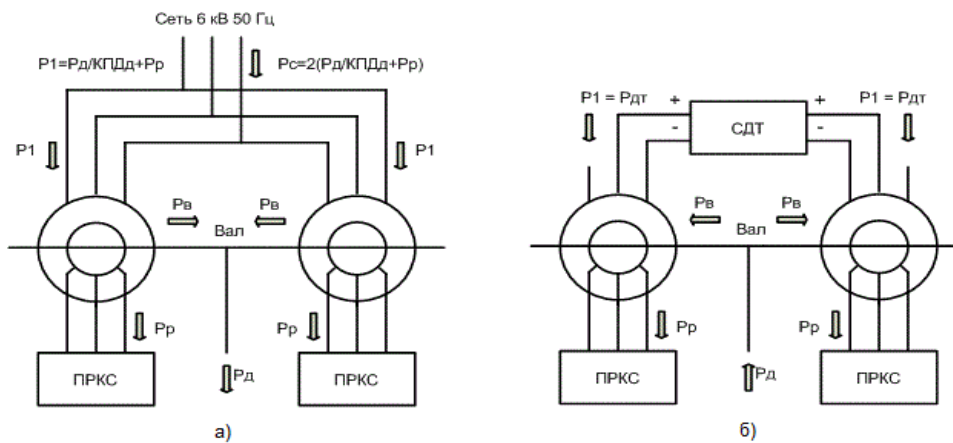


Рис. 2. Структурные схемы электропривода ШПУ в двигательном режиме (а) и в режиме торможения с отрицательным моментом (б)

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):

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

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

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

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 $K_{\eta} = N_B / N_C = 1\,028\,780 / 1\,994\,474 = 0,52$. 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 груженой 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 груженой 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 данных 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 позволят 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 ШПУ 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).

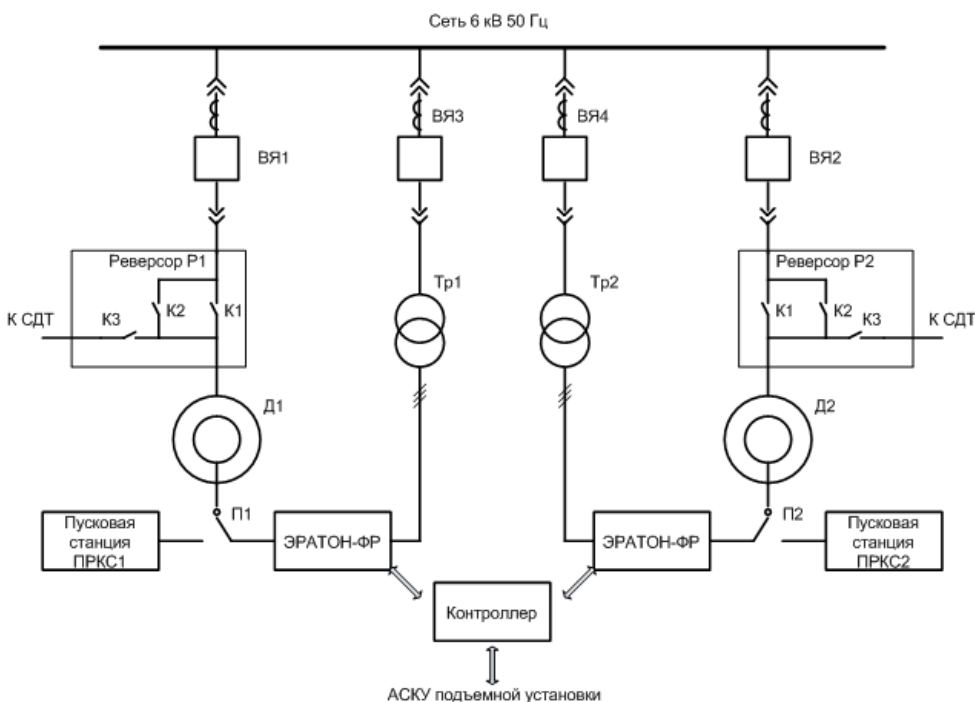


Рис. 3. Однолинейная схема силовых цепей электропривода ШПУ с ПЧ «ЭРАТОН-ФР»

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 КЗ 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 выравнением 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 уравновешенности 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

$$P_C = 2 * (P_B / \text{КПД}_D + P_P * (1 - \text{КПД}_{ПЧ})). \quad (6)$$

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

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

$$P_C = 2 * (P_B * \text{КПД}_D - P_P / \text{КПД}_{ПЧ} * (1 - \text{КПД}_{ПЧ})). \quad (7)$$

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.

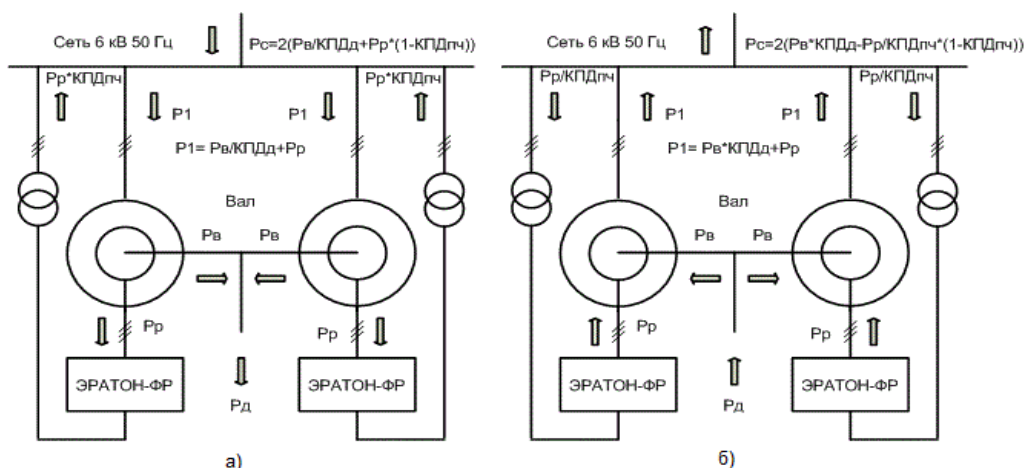


Рис. 4. Структурные схемы электропривода ШПМ с направлениями потоков активной мощности в двигательном режиме (а) и режиме рекуперативного торможения (б)

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%.