**Министерство общего и профессионального образования РФ**

**Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)**

**А.С. Соловьев**

# ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ЭКСКАВАТОРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Лекции

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**
**1999**

## ВВЕДЕНИЕ

Экскаваторы непрерывного действия: цепные многочерпаковые и роторные - обладают значительно большей производительностью, чем одноковшовые. Эти экскаваторы получили широкое применение при разработке грунтов с малой и средней крепостью, таких как бурый и каменный уголь, пески, глины и суглинистые породы при вскрышных работах на горных предприятиях с открытыми горными работами.

Способность цепных многочерпаковых экскаваторов производить отработку забоев, расположенных значительно ниже экскаватора позволяет применять их при выемке сильно обводненных месторождений, в том числе и донных месторождений в водоемах. С этой целью применяются также плавучие многочерпаковые экскаваторы – драги.

Производственные процессы разработки сравнительно мягких и однородных грунтов многочерпаковыми экскаваторами достаточно просто могут быть автоматизированы.

Экскаваторы непрерывного действия представляют собою агрегаты, содержащие не только механизмы для разработки грунтов, но и транспортные устройства, механизмы передвижения, вспомогательные механизмы.

Электроприводы механизмов экскаваторов отличаются большим разнообразием от простейших с асинхронными короткозамкнутыми двигателями до приводов постоянного и переменного тока с широким диапазоном регулирования.

В лекциях рассматриваются требования к электроприводам основных механизмов многочерпаковых и роторных экскаваторов и применяемые системы электроприводов.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСКАВАТОРОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Многочерпаковый экскаватор представляет собою самоходный агрегат, имеющий рабочий орган непрерывного действия, и предназначен для добычи и вскрытия месторождений полезных ископаемых. По типу рабочего органа многочерпаковые экскаваторы делятся на цепные, т.е. имеющие черпаковую цепь (рис.1,2), и роторные (рис.3, 4, 5).

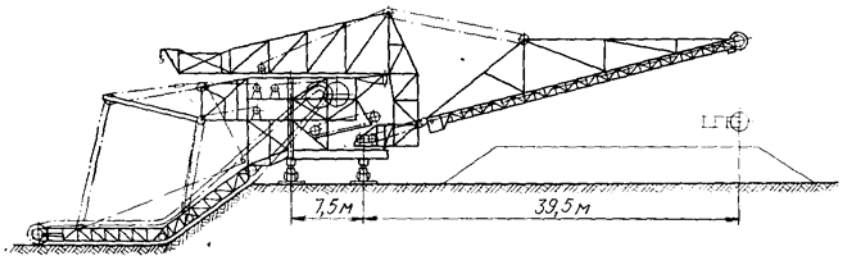


Рис.1 Многочерпаковый экскаватор нижнего черпания на рельсовом ходу с планирующим звеном

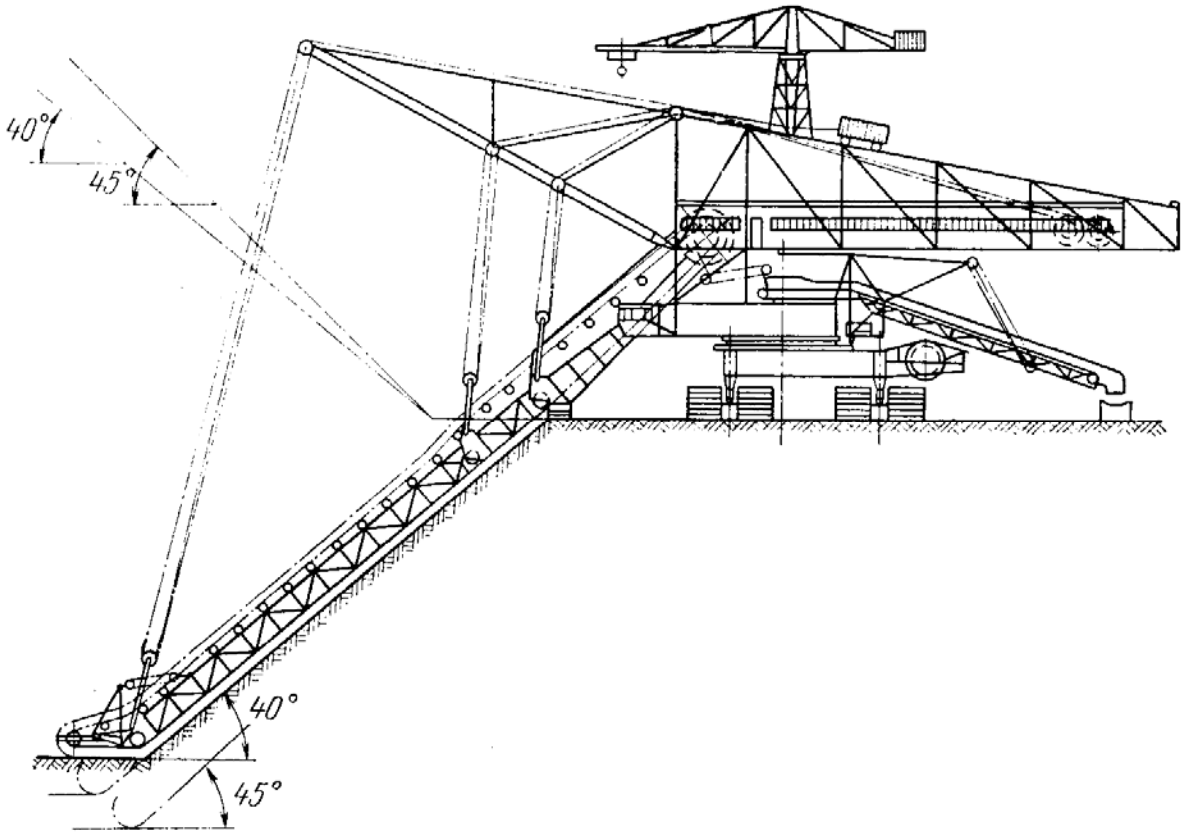


Рис. 2 Многочерпаковый экскаватор на гусеничном ходу

По способу черпания экскаваторы непрерывного действия делятся на экскаваторы верхнего черпания (рис. 3, 5), нижнего черпания (рис. 1, 2) и комбинированные (рис. 4) [2, 4, 6]. Роторные экскаваторы, в основном, работают с верхним черпанием, глубина нижнего черпания у них невелика, так как транспортировка породы от рабочего органа выполняется ленточными конвейерами, угол наклона которых ограничен. У цепных многочерпаковых экскаваторов горная масса транспортируется в черпаках, поэтому эти экскаваторы могут работать и с верхним и с нижним черпанием. При работе с нижним черпанием цепные экскаваторы могут разрабатывать сильно обводненные породы, в том числе и донные отложения водоемов. К классу цепных экскаваторов относятся и плавающие добычные агрегаты – драги [1].

По способу погрузки различают экскаваторы с боковой (консольной) разгрузкой и портальные экскаваторы с бункерным устройством. Широкое практикуется при-

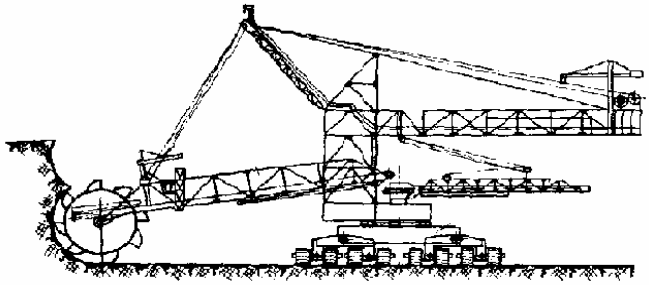

Рис.3 Роторный экскаватор верхнего черпания с невыдвижной стрелой

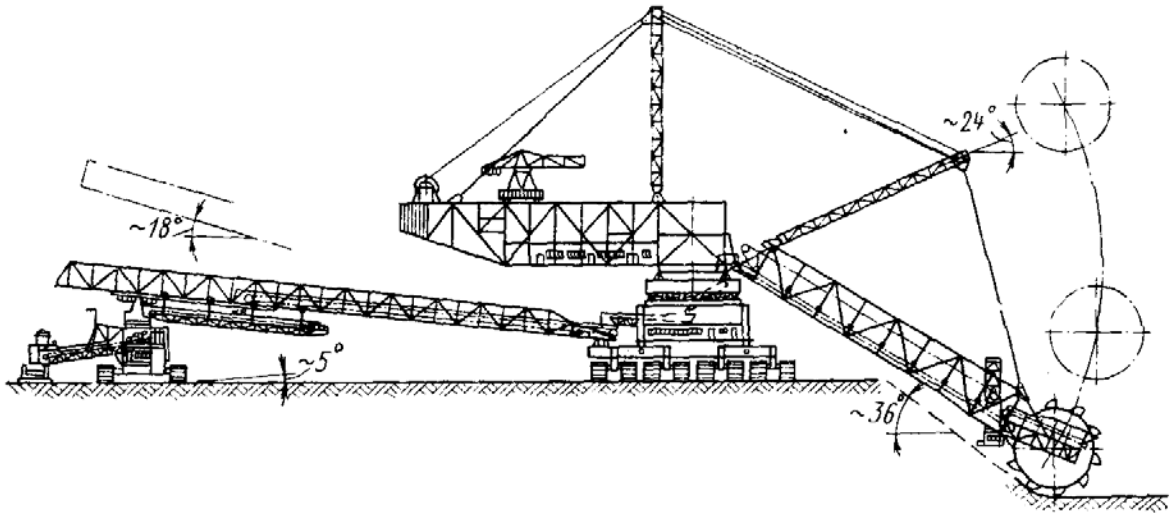


Рис.4 Роторный экскаватор комбинированного черпания
с невыдвижной стрелой

менение комплексов, в состав которых входит многочерпаковый или роторный экскаватор и конвейерная линия (рис. 2, 3). Использование комплексов обеспечивает непрерывный процесс добычи и транспортировки горной массы. Погрузка на конвейер также бывает консольная и портальная.

По конструкции ходового механизма различают гусеничные экскаваторы (рис.2 – 5) и экскаваторы на железнодорожном ходу (рис.1). Ново – Краматорский машиностроительный завод (Украина) выпускает экскаваторы на шагающе-рельсовом ходу [4].

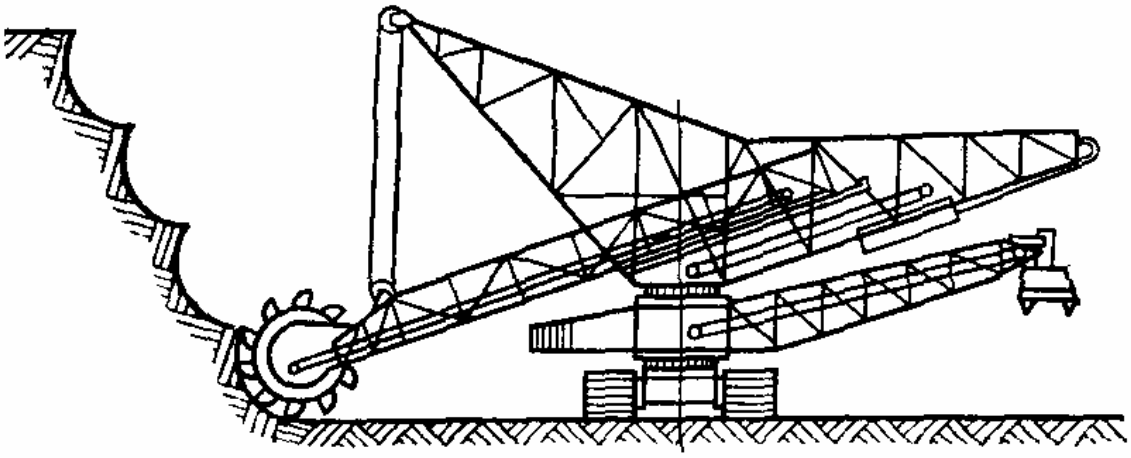

Рис. 5 Роторный экскаватор с выдвижной стрелой

При работе цепные экскаваторы непрерывно перемещаются вдоль забоя. Роторные экскаваторы в период работы неподвижны: перемещение рабочего органа (роторного колеса) достигается за счет поворота верхней платформы с роторной стрелой. Подача роторной стрелы или черпаковой цепи на забой, а также их подъем или опускание для снятия нового слоя (стружки), производится механизмами подачи и подъема, имеющими индивидуальные приводы.

Многочерпаковые экскаваторы обладают высокой производительностью, достигающей 10000м$^3$/час, масса их достигает 8000 т, а установленная мощность двигателей исчисляется тысячами киловатт. На горных предприятиях наибольшее распространение получили роторные экскаваторы на гусеничном и шагающе-рельсовом ходу. В России разработан типовой ряд карьерных роторных экскаваторов с теоретической производительностью 630, 1250, 2500, 5000 и 10000м$^3$/час в рыхлой массе и высотой черпания 12,5, 18, 25, 37,5 и 50 м [6], а также их модификаций с повышенным усилием копания для крепких грунтов.

## 1.2. ПОДВОД ЭНЕРГИИ К МНОГОЧЕРПАКОВЫМ ЭКСКАВАТОРАМ

Электроснабжение карьерных многочерпаковых экскаваторов осуществляется трехфазным переменным током при напряжении 6 кВ.

Питание многочерпаковых экскаваторов выполняется с помощью гибкого кабеля или трехфазной контактной сети. Последний способ целесообразно применять для

экскаваторов на рельсовом ходу, особенно для цепных экскаваторов, которые в процессе работы перемещаются вдоль забоя. В этом случае удобна так называемая свободная подвеска контактных проводов, которые лежат на изолированных держателях (рис.6).

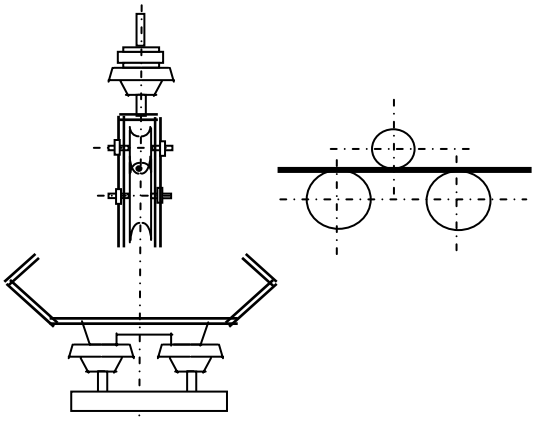

Рис. 6 Контактное токосъемное устройство (одна фаза)

По проводам скользят токоприемники, закрепленные на экскаваторе. При подходе экскаватора к опоре ролики токосъемного устройства приподнимают провода над держателями [5].

Система свободной подвески допускает боковую подвижность контактных проводов и не требует особой точности их установки. Конструкция опор контактной сети должна предусматривать возможность одновременной передвижки с рельсовыми путями.

Большое распространение для подвода энергии к многочерпаковым экскаваторам получили гибкие экскаваторные кабели. Высокая производительность многочерпаковых экскаваторов требует значительно больших перемещений по сравнению с одноковшовыми экскаваторами. Вследствие этого длина гибкого кабеля достигает нескольких сот метров. Для удобства эксплуатации гибкого кабеля на экскаваторах применяются кабельные барабаны, установленные непосредственно на экскаваторе или на прицепной тележке (у экскаваторов на рельсовом ходу).

Конец намотанного на барабан гибкого кабеля проходит через пустотелую опорную шейку вала барабана и присоединяется к контактным щеткам токосъемного устройства. Кабельные барабаны имеют электрические приводы, обеспечивающие автоматическое сматывание кабеля с барабана при удалении экскаватора от приключательного пункта и наматывания кабеля на барабан при движении в сторону приключательного пункта.

Допустимая нагрузка питающих гибких кабелей определяется их нагревом. Величина ее зависит от числа слоев кабеля на барабане, наличия промежутков между витками и условий вентиляции. Зависимость допустимой нагрузки от условий охлаждения гибкого кабеля на барабане приведена в таблице 1 [5].

Таблица 1

Допустимая нагрузка гибких кабелей при намотке на кабельный барабан (в % к допустимой нагрузке свободно лежащего кабеля)

| Условия намотки кабеля | Длительно допустимая нагрузка при числе слоев намотки | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| С промежутками между витками и искусственной вентиляцией | 85 | 75 | 70 | 65 |
| С промежутками между витками и естественной вентиляцией | 75 | 60 | 45 | 38 |
| Без промежутков между витками | 70 | 50 | 35 | 30 |

## 1.3.ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МНОГОЧЕРПАКОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Многочерпаковые экскаваторы представляют собою сложные агрегаты, включающие целый ряд механизмов с индивидуальными приводами.

К таким механизмам относятся:

1. Черпаковая цепь или роторное колесо;
2. Ходовой механизм – гусеничный, рельсовый или шагающий;
3. Поворотные механизмы верхней платформы (у поворотных экскаваторов), роторной стрелы, погрузочной консоли;
4. Подъемные механизмы для подъема отдельных звеньев черпаковой цепи, ее планировочных звеньев (рис.1,2), роторной стрелы (рис. 3 – 5), погрузочной консоли (рис.1 – 3);
5. Подающий механизм для выдвижения роторной стрелы (рис. 5);
6. Ленточные конвейеры роторной стрелы, промежуточные конвейеры, конвейеры разгрузочной консоли;
7. Вспомогательные механизмы: кабельный барабан, компрессоры, вентиляторы, насосы систем маслосмазки, монтажные краны и тельферы, натяжные устройства черпаковой цепи и ленточных конвейеров.

У плавучих многочерпаковых экскаваторов (драг) имеются маневровые лебедки, обеспечивающие перемещение драги при отработке забоя, а также оборудование для первой стадии обогащения добытой горной массы: дробилки, грохоты и т.п.

В лекциях рассматриваются электроприводы только основных механизмов: черпания, поворота, хода. При этом имеется в виду, что электроприводы таких механизмов, как вентиляторы, компрессоры, конвейеры изучаются отдельно. Приводы многих вспомогательных механизмов к тому же выполняются с использованием типовых

решений и не представляют сложности для изучения при знакомстве с литературой и при практической работе.

# 2. ЭЛЕКТРОПРИВОД ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ

## 2.1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ПРИВОДУ ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ

Привод черпаковой цепи работает в продолжительном режиме работы при неравномерной нагрузке. Колебания нагрузки вызваны как неоднородностью разрабатываемого грунта, так и периодическим врезанием в забой очередного ковша и высыпанием грунта из ковшей при разгрузке. Колебания нагрузки на валу привода составляют 55 – 150% среднего значения. Максимальные значения перегрузок достигают 170% [5].

Многочерпаковые экскаваторы работают в мягких, однородных грунтах, поэтому внезапное стопорение рабочего органа в забое является для них не расчетным, а аварийным режимом. В этом случае электрический привод может быть отключен защитой. В то же время при стопорении черпаковой цепи кинетическая энергия, запасенная в роторе двигателя, создает дополнительные перегрузки механических элементов. Для ограничения динамических усилий при стопорениях в приводах многочерпаковых экскаваторов применяются механические муфты предельного момента различных конструкций [5]. Более специфичен привод черпаковой цепи драг. Особенностью режимов его работы является то, что забой, место черпания при работе не наблюдается. К тому же основные районы дражных промыслов находятся в России в зоне вечной мерзлоты. Поэтому у драг значительные перегрузки приводов и стопорения более часты, чем у других цепных экскаваторов, что требует применения электроприводов с ограничением момента и тока двигателя таких же, как у одноковшовых экскаваторов [10].

Электрический привод черпаковой цепи должен отвечать следующим требованиям:

1. Иметь достаточный пусковой момент для создания усилий, достаточных для разгона механизма, и преодоления сил трения в несмазанных и загрязненных шарнирах цепи и на направляющих. Требуемая перегрузочная способность составляет 2,5 – 3;
2. Обеспечивать плавность пуска необходимую для ограничения динамических усилий при движении черпаковой цепи в местах изменения углов наклона черпаковой рамы, в натяжных устройствах, в шарнирах и роликах;
3. Иметь смягченную механическую характеристику, обеспечивающую при увеличениях нагрузки снижения скорости;
4. Иметь механическую защиту от перегрузок (предохранительную муфту);
5. Обеспечивать возможность регулирования скорости на 30% вниз от номинальной, а также получать низкую постоянную скорость для осмотров цепи, ремонтов, наладки, приведения предохранительной муфты в рабочее положение после срабатывания.

Таким требованиям к приводам черпаковой цепи отвечают асинхронные фазные двигатели с реостатным управлением. При большой мощности привода применяется двухдвигательный асинхронный привод. Предохранительные муфты в этом случае ставятся для каждого двигателя. Выравнивание загрузки двигателей достигается путем введения неотключаемых добавочных сопротивлений в роторные цепи обоих двигателей. Это обеспечивает также к смягчению их механических характеристик, но одновременно несколько снижает КПД электропривода.

Черпаковая цепь обычно имеет вспомогательный привод с асинхронным короткозамкнутым двигателем и редуктором, обеспечивающим скорость черпаковой цепи в пределах 10 – 20% от основной скорости. Вспомогательный привод служит для про-

ворачивания механизма при ремонтах и осмотрах. При работы основного привода вспомогательный редуктор отсоединяется от приводной станции черпаковой цепи с помощью сцепной муфты.

Приводы черпаковой цепи выполняются также с двигателями постоянного тока, управляемыми по системе Г-Д или ТП-Д [1, 10]. В этих электроприводах обеспечивается токоограничение, что делает их предпочтительными для приводов черпаковой цепи драг [1].

## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ

Мощность двигателя черпаковой цепи затрачивается на преодоление сопротивлений, связанных с черпанием, подъемом грунта к месту разгрузки, преодоление трений при перемещении груза и черпаков, и может быть представлена в виде суммы

$$P_{общ} = P_1+P_2+P_3+P_4+P_5-P_6, \qquad /2.1/$$

где $P_1$ – мощность, затрачиваемая на черпание грунта;
$P_2$ – то же, на подъем груза к месту разгрузки;
$P_3$ – то же, на преодоление трений, вызванных перемещением грунта;
$P_4$ – то же, на преодоление трений, возникающих при перемещении черпаковой цепи;
$P_5$ – то же на подъем грузовой ветви черпаковой цепи;
$P_6$ – уменьшение мощности от веса опускающейся ветви черпаковой цепи.

Мощность затрачиваемая на черпание грунта. Сопротивление грунта складывается из сопротивлений породы скалыванию и резанию, трения о грунт, сопротивления перемещения грунта в черпаке и призмы волочения перед черпаком.

Усилие потребное для черпания грунта, может быть определено по формуле

$$F=k_0\, k\, b\, h, \qquad /2.2/$$

где k – коэффициент сопротивления грунта скалыванию и резанию, Н/м$^2$ (Па);
b и h – ширина и высота стружки, м;
$k_0$ – коэффициент учитывающий, что черпание не является чистым резанием или скалыванием, а условия резания меняются из-за неоднородности грунта, а также необходимости волочение грунта перед ковшом. На практике коэффициент $k_0$ принимают равным 3,7 [5].

Умножив обе части равенства /2.2/ на длину черпания l, получим

$$Fl=k_0\, k\, b\, h\, l \qquad /2.3/$$

или $A=3{,}7kV, \qquad /2.4/$

где $A=Fl$ – работа черпания, Нм;
$V=bhl$ – объем вынутого грунта, м$^3$.

Полезная работа за час согласно формуле /2.4/ составит

$$A_{час}=3{,}7kQ, \qquad /2.5/$$

где Q – производительность, отнесенная к неразрыхленному грунту, м$^3$/час.

Необходимая мощность

$$P_1=A_{час}/(3600\cdot1000) \qquad /кВт/ \qquad /2.6/$$

или при подстановке формулы /2.5/

$$P_1\approx k\cdot Q\cdot 10^{-6}. \qquad /кВт/ \qquad /2.7/$$

Сопротивление резанию и скалыванию составляет:
для легких грунтов (песок рыхлый растительный грунт, слабый бурый уголь)……0,02÷0,06 МПа;
для средних грунтов (суглинки, пески со щебнем, глинистые грунты)……0,06÷0,1 МПа;
для тяжелых грунтов (тяжелые глины с каменистыми включениями).0,1÷0,25 МПа.

Мощность, затрачиваемая на подъем грунта. Величина этой мощности зависит от схемы экскавации. Рассмотрим простой случай нижнего черпания с постоянным углом наклона черпаковой цепи (рис.7). Более сложные схемы рассмотрены в книге Г.И. Дрейера [5].

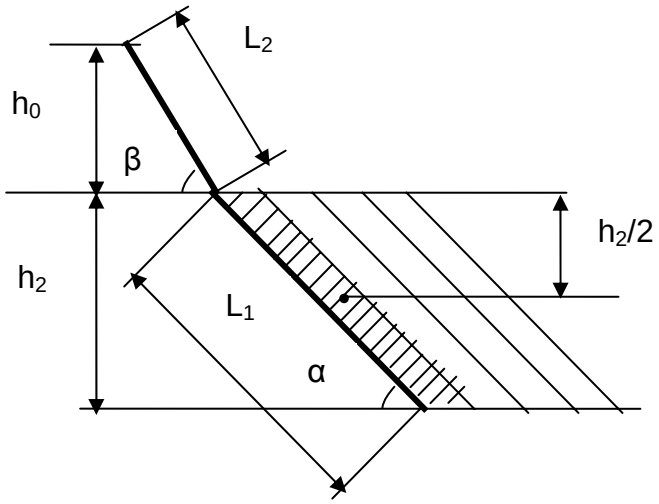


Рис.7 Схема экскавации многочерпакового экскаватора

При схеме черпания, приведенной на рис.7, уступ разрабатывается параллельными слоями. Центр тяжести слоя находится на глубине, равной половине глубины черпания $h_2$. Потому часовая работа на подъем грунта составит

$$A_{2час}=\gamma\cdot Q(h_0+h_2/2) , \qquad [Нм] \qquad /2.8/$$

где $\gamma$ – объемный вес грунта в массиве, $Н/м^3$.

Необходимая мощность

$P_2=A_{2час}/(3600\cdot1000) =2,8\cdot\gamma\cdot Q(h_0+h_2/2)\cdot10^{-7}$, кВт /2.9/

или с учетом рис.7

$P_2=2,8\cdot\gamma\cdot Q(L_2\sin\beta+h_2/2)\cdot10^{-7}$. кВт /2.10/

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения черпаковой цепи, возникающей от веса грунта в ковшах. Здесь и далее рассматриваем схему черпания рис.7. Часовая работа по преодолению сил трения от веса

$A_{3час}=L_2\cdot\mu\cdot\gamma\cdot Q\cdot\cos\beta + 0,5\cdot L_1\cdot\mu\cdot\gamma\cdot\psi\cdot Q\cdot\cos\alpha$, /2.11/

где $\mu$ - коэффициент трения стали о сталь (0,2÷0.4);

$\gamma\cdot Q\cdot\cos\beta$, $\gamma\cdot Q\cdot\cos\alpha$ составляющие веса груза, нормальные черпаковой раме и желобу (коэффициент 0,5 учитывает подъем грунта в среднем с половины глубины черпания;

$\psi$ – учитывает долю веса грунта, приходящуюся на черпаковую раму. Практически $\psi$=1/3.

Аналогично предыдущему случаю находим мощность

$$P_3 = 2,8\mu\gamma Q(L_2\cos\beta+\frac{L_1\cos\alpha}{6})\cdot10^{-7}, \text{кВт}. \qquad /2.12/$$

Мощность, затрачиваемая на подъем рабочей ветви черпаковой цепи может быть определена исходя из величины усилия при положении тела на наклонной плоскости.

$$P_4 + P_5 = (G_1(\sin\alpha+\frac{1}{3}\mu\cos\alpha) + G_2(\sin\beta+\mu\cos\beta))V\cdot10^{-3}, \text{кВт} \quad /2.13/$$

где $G_1$ – вес рабочей ветви черпаковой цепи в пределах черпаковой рамы, Н;

$G_2$ – то же в пределах черпакового желоба, Н;

$\alpha$ - угол наклона черпаковой рамы;

$\beta$ - угол наклона черпакового жолоба;

V – скорость черпаковой цепи, м/с.

Коэффициент 1/3 учитывает, что в пределах черпаковой рамы 2/3 веса цепи приходится на грунт.

Уменьшение затрат мощности от веса опускающейся ветви черпаковой цепи составит

$$P_6 = (G_1(\sin\alpha-\mu\cos\alpha) + G_2(\sin\beta-\mu\cos\beta))V\cdot10^{-3}, \text{кВт} \quad /2.14/$$

Общая мощность может быть определена по формуле /2.1/. С учетом КПД передачи и коэффициента запаса мощность электропривода определяется выражением

$P=1,1P_{общ}$. /2.15/

## 2.3. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ

Силовые цепи электропривода приведены на рис.8. Высоковольтный асинхронный двигатель с фазовым ротором 1М включается в сеть масляным выключателем QF. Между двигателем и механизмом имеется предохранительная муфта ПМ. Роторный реостат управляется контроллером с приводом от реверсивного асинхронного короткозамкнутого двигателя 3М. Вспомогательный привод с реверсивным асинхронным двигателем 4М и редуктором соединяется с главным приводом с помощью фрикционной муфты ФПМ с соленоидным приводом YC. Двигатель 2М обеспечивает работу систем маслосмазки.

Цепи управление приводом приведены на рис.9. Включение главного привода черпаковой цепи может быть проведено только в том случае если:

1. Включена система маслосмазки вала барабана черпаковой цепи, т.е. включен контактор 1К;
2. Фрикционная муфта вспомогательного привода (ФПМ рис.8) разъединена. При этом замкнут контакт концевого выключателя 5SQ;
3. Предохранительная муфта ПМ находится в рабочем положении (контакт концевого выключателя 2SQ замкнут);
4. Черпаковая цепь исправна; концевые выключатели улавливающих устройств 4SQ и 6SQ замкнуты;
5. Пусковой реостат полностью введен; при этом замкнут контакт концевого выключателя 1SQ.1;
6. Давление сжатого воздуха в пневматической системе нормальное (замкнут контакт реле давления ВР);
7. Приемный конвейер включен (замкнут контакт 11К).

Контактор 1К двигателя маслосмазки включается кнопками 1SB или 2SB, а главный двигатель – кнопками 5SB или 6SB. При этом включается промежуточный контактор 2К, который включает контакторы 3К и 4К. Замыкание контактов 3К подает питание катушке электромагнитного привода масляного выключателя QF. После включения QF контактор 4К отключается, и дальнейшее питание соленоида масляного выключателя поддерживается через экономическое сопротивление R.

Управление реостатом производится вспомогательным двигателем 3М. Включение двигателя производится контактами контактора 8К, который включается сразу же после включение масляного выключателя QF (если реостат полностью введен, то контакты концевого выключателя 1SQ.2 замкнуты и реле 6К включено).

При полностью выведенном реостате замыкаются контакты 1SQ.3, 1SQ.4 и размыкается контакт 1SQ.2. Последний разрывает цепь реле 6К, что приводит к отключению вспомогательного привода. Одновременно замыкающийся контакт 1SQ.3 включает контактор 5К, замыкающий ротор главного двигателя накоротко (см. рис.8). Контакт 1SQ.4 подготавливает цепь контактора 7К.

Отключение привода черпаковой цепи производится нажатием кнопки 7SB или 8SB, что приводит к отключению контакторов 2К, 3К и 5К.

С отключением 5К включается контактор 7К вспомогательного двигателя 3М и реостат возвращается в исходное положение для нового пуска.

Контактор 10К служит для включения электромагнита пневматического вентиля YA, подающего воздух в пневматическую систему зажатия предохранительной муфты. Для возвращения этой муфты в рабочее положение после срабатывания служит вспомогательный привод с двигателем 4М.

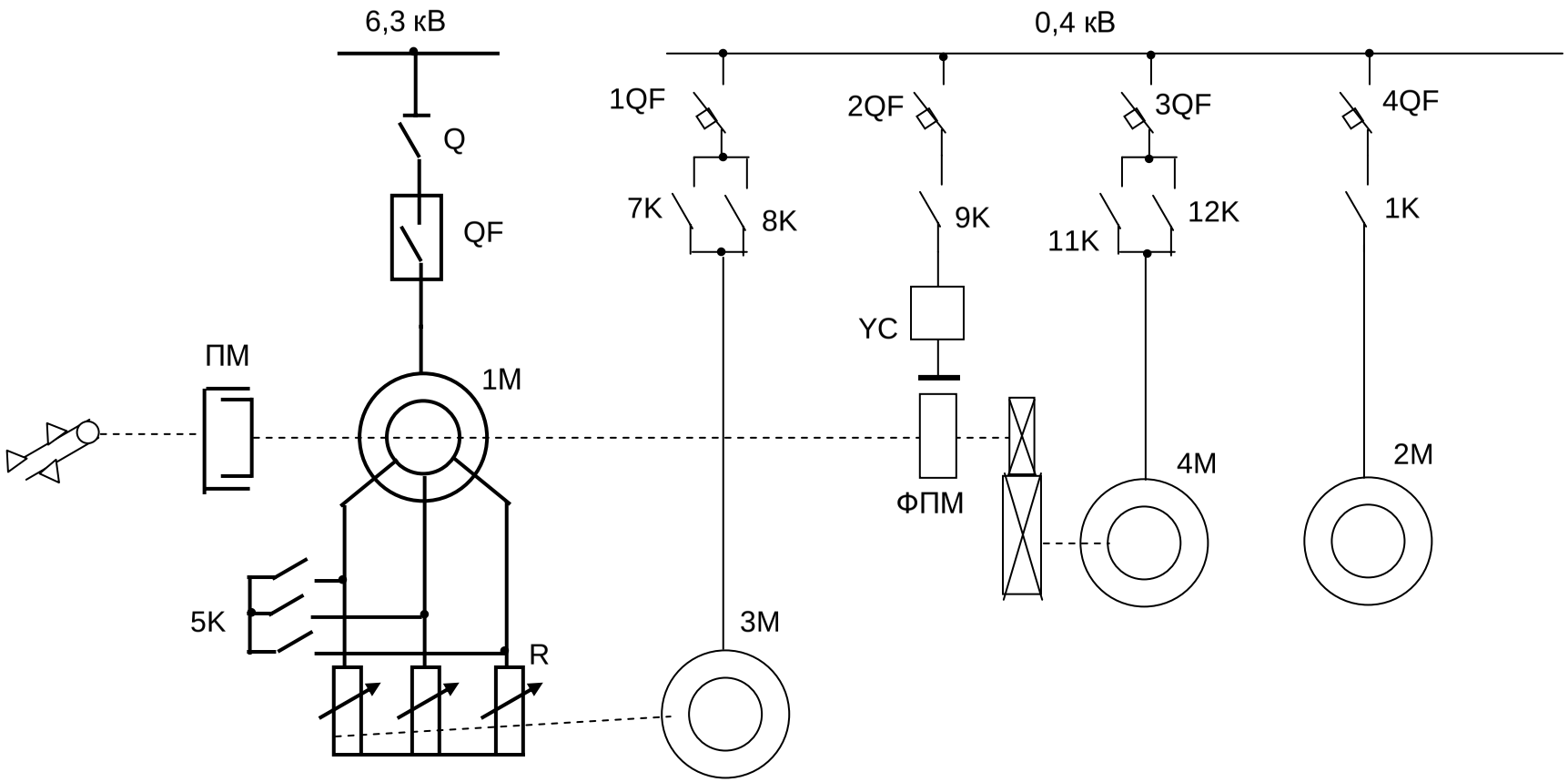


Рис.8 Главные цепи электропривода черпаковой цепи

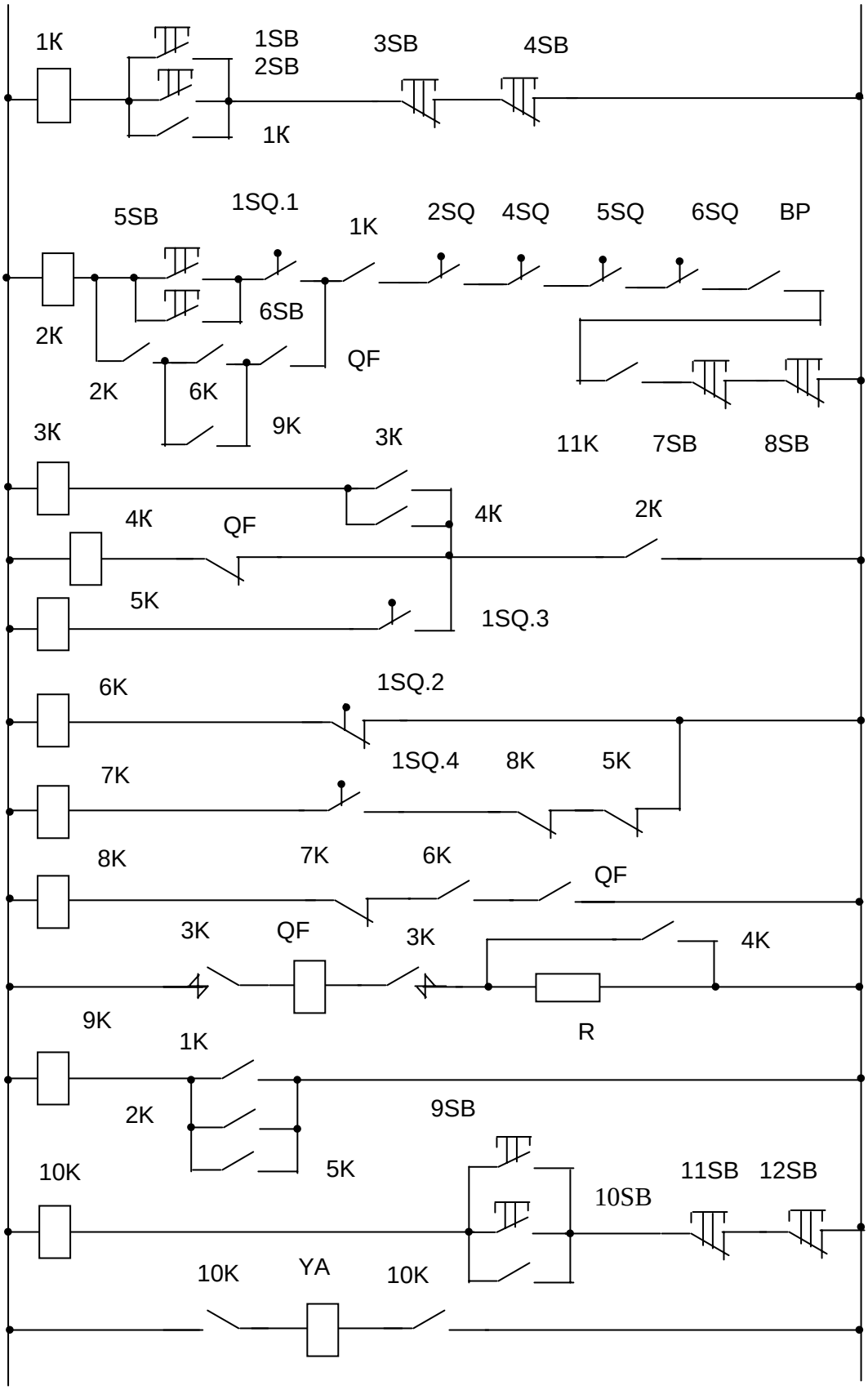


Рис.9 Цепи управления приводом черпаковой цепи

# 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД РОТОРНОГО КОЛЕСА

## 3.1. РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРНОГО КОЛЕСА

Привод роторного колеса состоит из двигателя, предохранительной муфты и редуктора.

При нормальном режиме резания окружная скорость на режущей кромке черпаков составляет 1÷4 м/с. Роторное колесо при этом вращается со скоростью 3÷6 об/мин, что при использовании двигателей с номинальной скоростью 750÷1000 об/мин требует применения редуктора с передаточным числом 1:100 ÷ 1:400.

Нагрузка привода роторного колеса также характеризуется значительной неравномерностью, наличием постоянных перегрузок при врезании очередного ковша в забой. Стрела роторного экскаватора при работе изгибается под действием нагрузки. В связи с этим в ней возникают механические колебания как в вертикальной плоскости, так и в плоскости поворота [3, 6]. Эти колебания, накладываясь на основную скорость резания и поворота, вызывают изменения сечения снимаемой стружки и нагрузки привода. Перегрузки привода при работе достигают 200% к среднему значению, что требует как электрической защиты привода, так и ограничения механических перегрузок с помощью муфт предельного момента.

## 3.2. ВЫБОР МОЩНОСТИ ПРИВОДА РОТОРНОГО КОЛЕСА

Мощность на валу роторного колеса может быть представлена в виде суммы двух составляющих

$$P_{общ}=P_1+P_2, \qquad /3.1/$$

где $P_1$ – мощность, затрачиваемая на черпание грунта;

$P_2$ – то же, на подъем грунта.

Усилие, необходимое для черпания грунта, может быть определено так же, как и у цепных экскаваторов с той разницей, что и роторных экскаваторов черпаки срезают стружку переменной толщины (рис.10). Средняя толщина стружки составляет 2/3 ее максимальной толщины. Соответственно уменьшается среднее усилие и мощность. Вводя в формулу /2.7/ поправочный коэффициент, получим

$$P_1=0{,}7кQ\cdot10^{-6}\text{ , кВт} \qquad /3.2/$$

Для определения мощности, необходимой для подъема грунта рассмотрим диаграмму наполнения и высыпания грунта из черпаков (рис. 10). Из диаграммы видно, что на подъем грунта во время заполнения ковша затрачивается почти такая же работа, как и в период его опорожнения. В среднем с достаточной для практики точностью можно считать, что подъем полного черпака производится на высоту, равную половине диаметра роторного колеса, т.е. работа, затрачиваемая на подъем грунта за один час равна

$$A_{час}=0{,}5\gamma QD_p,\ \text{Нм} \qquad /3.3/$$

а мощность аналогично формулам /2.8 – 2.9/

$$P_2=1{,}4\gamma QD_p\cdot 10^{-7}.\ \text{кВт} \qquad /3.4/$$

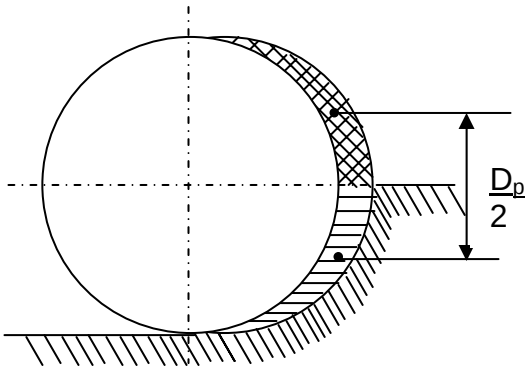


Рис.10 Сечение стружки, снимаемой роторным колесом

Общая мощность на валу двигателя роторного колеса

$$P_{общ}=1{,}05(P_1+P_2)/\eta \qquad /3.5/$$

## 3.3. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ РОТОРНОГО КОЛЕСА

Требования к электроприводу роторного колеса определяются прежде всего разнообразием условий как горно-геологических, так и технологических, в которых возможна работа экскаватора. Наиболее подробно эти вопросы рассмотрены в монографиях В.М. Владимирова и др. [2, 6].

Необходимые для черпания момент и мощность определяются сечением снимаемой стружки, которое зависит от соотношения скорости поворота платформы с роторной стрелой и скорости вращения роторного колеса. Отношение скорости подачи к скорости резания является одной из основных характеристик процесса резания, причем, как известно, существует отношение, соответствующее минимальной энергоемкости процесса разрушения. Однако, при постоянном сечении стружки с ростом крепости грунта начинает возрастать усилие резания. Для сохранения постоянства мощности привода в этом случае рекомендуется снижать скорость резания и подачи (так называемая параметрическая стабилизация). Изложенный метод обладает рядом недостатков. Габаритные размеры и стоимость двигателей определяются не мощностью, а моментом, поэтому работа с постоянным сечением стружки при увеличении крепости грунта связана с завышением стоимости привода. С точки зрения использования двигателя рационально при увеличении нагрузки привода снижать сечение стружки за счет уменьшения скорости поворота роторной стрелы (скорости подачи). Поддержание постоянства мощности главного привода резания получило широкое применение в горнодобывающих машинах. Следует иметь в виду, что роторные экскаваторы являются высокопроизводительными машинами, к тому же часто работающими в комплексе с непрерывным конвейерным транспортом. Для повышения эффективности работы таких комплексов обеспечивать работу с постоянной производительностью и полной загрузкой транспортных устройств. Достичь этого можно лишь при некотором завышении мощности привода роторного колеса и некотором недоиспользовании мощности при

нормальной крепости грунта. При работе в грунтах большей крепости привод будет использоваться лучше, но при очень крепких породах вновь приходится идти на ограничение мощности за счет снижения скорости подачи.

Из сказанного следует, что привод роторного колеса может быть выполнен как нерегулируемый. Однако, такой привод обладает рядом недостатков. Прежде всего по условиям разгрузки ковшей роторного колеса иногда приходится снижать его скорость на 10 – 15%, а при разработке суглинков и глин – до 35%. Поэтому более рациональны системы электроприводов роторного колеса, обеспечивающие диапазон регулирования до (1,4÷1,7):1, как это рекомендуется в монографии Ю.Т. Калашникова и др. [9]. При этом для более эффективного использования на экскаваторах средней и большой производительности привод роторного колеса должен иметь плавное регулирование.

Для ремонтных и наладочных работ в приводе должна быть предусмотрена возможность получения постоянной низкой скорости.

Механическая характеристика привода должна обладать достаточной жесткостью. В противном случае колебания нагрузки приведут к колебаниям скорости и момента двигателя, что, как указывается в монографиях Д.П. Волкова [3] и Ю.Т. Калашникова [9] может вызвать резонансные явления в металлоконструкциях экскаватора.

Возможность появления чрезмерных перегрузок привода роторного колеса требует, чтобы характеристика привода обеспечивала ограничение тока и момента двигателя, т.е. имела "экскаваторную" форму [10]. Следует иметь в виду, что основная часть кинетической энергии запасается в якоре двигателя роторного колеса, поэтому при резких стопорениях ограничение момента не обеспечивает механическую часть ль динамических перегрузок. Это вызывает необходимость применения в приводах роторного колеса механических муфт предельного момента.

Система электропривода должна иметь защищенное исполнение в связи с тем, что двигатель роторного колеса расположен на конце роторной стрелы в непосредственной близости к забою.

Расположение двигателя на конце стрелы ограничивает его вес, что исключает возможность применения тихоходных двигателей.

## 3.4. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ РОТОРНОГО КОЛЕСА

Нерегулируемые электроприводы роторного колеса получили применение на экскаваторах с небольшой емкостью ковшей, например на экскаваторе ЭРГ – 400 – 17/5 [8]. В электроприводе используется асинхронный короткозамкнутый двигатель мощностью 250 кВт, с номинальной скоростью 750 об/мин. Напряжение двигателя 380 В. Для снижение пусковых токов используется добавочное сопротивление в цепи статора. После разгона двигателя это сопротивление шунтируется. Снижение пускового момента при таком способе пуска не является недостатком, так как роторное колесо пускается вхолостую.

У экскаваторов с большой емкостью черпаков электропривод роторного колеса выполнен по системе Г-Д с различными способами возбуждения генератора.

Роторные экскаваторы с большой производительностью (1600 $м^3$/час и более) являются уникальными машинами, поэтому подробное описание их электроприводов в лекциях не приводится. Эти электроприводы подробно описаны в монографии Ю.Т. Калашникова и др. [9]. Отметим, что для возбуждение генератора в приводе роторного колеса экскаватора ЭРШР – 1600 применяется реверсивная схема силовых магнитных усилителей, подробно описанная в учебном пособии по электроприводу одноковшовых экскаваторов [10], а у экскаваторов большой производительности ЭРШР – 5000, ЭРШРД – 5000 применяется тиристорное возбуждение генераторов. Системы управления электроприводов построены по принципу параллельной коррекции с суммирую-

щим звеном. Основной обратной связью является жесткая обратная связь по скорости, для чего в электроприводах имеются тахогенераторы. У экскаваторов ЭРШР – 5000, ЭРШРД – 5000 в схемах управления предусмотрена обратная связь по току с отсечкой, обеспечивающая токоограничение, а у экскаватора ЭРШР – 1600 защита от перегрузки выполнена только с помощью тепловой и максимальной защит.

Электропривод роторного колеса экскаватора ЭРШРД – 5250 выполнен по схеме асинхронного вентильного каскада. Принципиальная схема силовой части электропривода приведена на рис. 11. Пуск электропривода роторного колеса производится при включении масляного выключателя QF1. Масляный выключатель QF2 выключен и при пуске работает только двигатель М1. Регулирование тока в роторе производится за счет введение встречной ЭДС вспомогательной машины постоянного тока М3 в цепь выпрямленного тока ротора. Для выпрямления тока роторов двигателей М1 и М2 имеются неуправляемые выпрямители UV2 и UV3. Дроссель L служит для сглаживания выпрямленного тока. Подключение машины постоянного тока М3 производится контактором КМ2. После разгона роторного колеса контакт КМ2 кратковременно открывается и при разомкнутой роторной цепи контактами масляного выключателя QF2 включается в сеть статор двигателя М2. Выемка грунта производится при работе обоих двигателей. Встречная ЭДС машины М3 регулируется путем изменения тока в обмотке независимого возбуждения L1M3 с помощью управляемого тиристорного преобразователя UV1. Мощность скольжения асинхронных двигателей М1 и М2 через машины М3 и М4 возвращается в сеть. В электроприводе предусмотрен режим электродинамического торможение роторного колеса. Для перехода в этот режим масляный выключатель QF1 отключает оба двигателя от сети, но статоры их остаются соединенными между собой контактами QF2. Контактор КМ2 отключает машину М3 от выпрямителей, и с помощью контактора КМ3 в роторы обоих асинхронных двигателей подается постоянный ток от машины М3, являющейся в этом случае генератором.

Управление электроприводом производится по системе подчиненного регулирования, как это описано в монографиях Ю.Т. Калашникова [9] и Г.Б. Онищенко [7]. В электроприводе организован контур регулирования выпрямленного тока ротора. Поскольку момент двигателя пропорционален выпрямленному току ротора, то контур тока с ПИ – регулятором является контуром регулирования момента. Это делает электропривод аналогичным по свойствам электроприводу постоянного тока.

## 4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПОВОРОТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Электроприводы поворота стрелы роторных экскаваторов выполнены по системе Г-Д с возбуждением генератора от силовых магнитных усилителей (экскаватор ЭРШР-1600) или тиристорных возбудителей (экскаваторы ЭРШРД-5000, ЭРШРД-5250). Электроприводы имеют систему управления с отрицательной обратной связью по скорости и отсечкой по току. В связи с тем, что геометрические размеры поворачиваемой части экскаватора очень велики, для ограничения динамических нагрузок в электроприводах используются задатчики скорости, а также гибкие обратные связи по напряжению и току, затягивающие переходные процессы изменения момента и скорости.

Наличие у современных роторных экскаваторов невыдвижной стрелы приводит к тому, что для снятия очередной стружки должно измениться положение центра поворота при неизменном радиусе (рис. 12). В результате в плоскости поворота стружка приобретает серповидную форму. Зависимость толщины стружки от угла поворота

$$b = b_0 \cdot \cos\alpha, \qquad /4.1/$$

где $\alpha$ – угол поворота стрелы от оси, перпендикулярной фронту забоя;

$b_0$ – толщина стружки при $\alpha=0$.

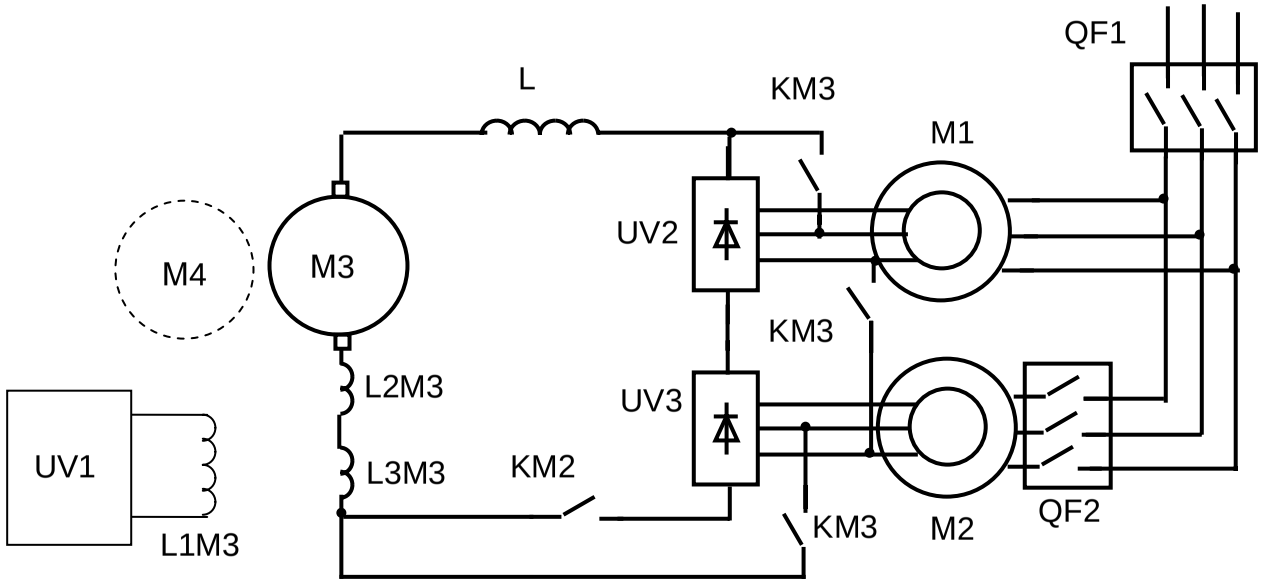


Рис.11 Схема лавных цепей электропривода роторного экскаватора ЭРШРД – 5250

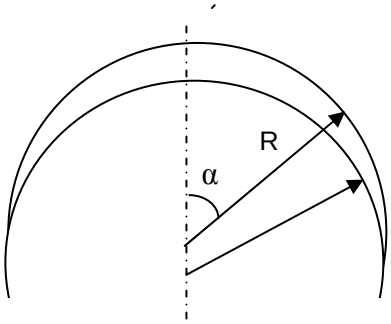


Рис.12 Форма стружки при резании грунта
экскаватором с невыдвижной стрелой

Для сохранения неизменной производительности при повороте экскаватора необходимо изменять скорость при повороте обратно пропорционально толщине стружки, т.е.

$$\omega = \omega_0/\cos\alpha, \qquad /4.2/$$

где $\omega_0$ – скорость поворота при $\alpha=0$.

Для реализации такого изменения скорости имеется функциональный преобразователь, в качестве которого в некоторых схемах управления экскаваторами применялись синус-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ).

При этом закон изменения скорости согласно формуле/4.2/ выдерживается при углах поворота не более ±60˚. После двукратного увеличения дальнейшее возрастание скорости ограничивается.

Электроприводы поворота разгрузочной консоли и разворота экскаваторов выполнены по системе Г-Д (у экскаваторов ЭРШР-1600, ЭРШРД-5000) или ТП-Д (у экскаватора ЭРШРД-5250). В системах управления этих экскаваторов также обязательно применяются задатчики интенсивности для ограничения темпа разгона и замедления.

Электроприводы поворотных и разворотных механизмов имеют активную нагрузку, поэтому при останове и выключении электроприводов происходит наложение механических тормозов. При этом якорные цепи электроприводов размыкаются, что снимает задачу ограничения "остаточного" тока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электроприводы роторных и цепных многочерпаковых экскаваторов достаточно многообразны по исполнению силовых схем и систем управления. В связи с этим возникает проблема унификации и создания типовых систем автоматизированного электропривода для основных механизмов экскаваторов. Перспективным направлением развития экскаваторных электроприводов является применение регулируемых электроприводов переменного тока на основе тиристорных преобразователей частоты. Системы управления целесообразно строить на базе микропроцессорной техники. Это позволит обеспечить не только управление отдельными электроприводами, но и в целом производственными процессами выемки грунтов, их транспортирования, отсыпки пород вскрыши в отвалы и т.п.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. *Бариев Н.В.* Тиристорный привод драг. – М.: Недра, 1975.
2. *Беляков Н.В., Владимиров В.М.* Рабочие органы роторных экскаваторов. – М.: Машиностроение, 1967.
3. *Волков Д.П., Каминская Д.А.* Динамика электромеханических систем экскаваторов. – М.: Машиностроение, 1971.
4. *Домбровский Н.Г.* Многочерпаковые экскаваторы, - М.: Машиностроение, 1982.
5. *Дрейер Г.И.* Электрооборудование многочерпаковых экскаваторов, - М.: Углетехиздат, 1956.
6. Карьерные роторные экскаваторы/ *В.М. Владимиров, А.И. Шендеров, Ю.Т. Калашников и др.* – Киев: Техника, 1968.
7. *Онищенко Г.Б., Локтева И.Л.* Асинхронные вентильные каскады и машины двойного питания. – М.: Энергия, 1979.
8. Роторный экскаватор ЭРГ – 400 – 17/5./ *Е.Ф. Колесников, А.Г. Минчин, И.Я. Ничик и др.* – М.: Недра, 1970.
9. Системы электропривода и электрооборудование роторных экскаваторов/ *Ю.Т. Калашников, А.О. Горнов, В.Н. Остриров и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1988.
10. *Соловьев А.С., Соловьев В.С.* Электропривод одноковшовых экскаваторов. – Л.: Издание Ленинградского горного института, 1978.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение
1. Общие сведения
   1.1 Краткая характеристика экскаваторов непрерывного действия
   1.2 Подвод энергии к многочерпаковым экскаваторам
   1.3 Основные механизмы многочерпаковых экскаваторов
2. Электропривод черпаковой цепи
   2.1 Режимы работы и требования к приводу черпаковой цепи
   2.2 Определение мощности привода черпаковой цепи
   2.3 Схемы управления электроприводами черпаковой цепи
3. Электрический привод роторного колеса
   3.1 Режимы работы электропривода роторного колеса
   3.2 Выбор мощности электропривода роторного колеса
   3.3 Требования к электроприводу роторного колеса
   3.4 Системы электроприводов роторного колеса
4 Электроприводы поворотных механизмов
Заключение
Библиографический список