

РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕОСТАТОВ И НАСТРОЙКА КОНТАКТОРНЫХ ПАНЕЛЕЙ РУДНИЧНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

И. А. БАЛАШЕВ

Методы расчета реостатов

В различное время было предложено несколько методов расчета металлических реостатов для трехфазных асинхронных электродвигателей.

Основными из них являются следующие:

1. Метод, основанный на использовании круговой диаграммы. Этот метод разработан проф. В. С. Кулебакиным [1], а также другими авторами [4].
2. Метод механических характеристик, получивший в дальнейшем исключительное распространение. Этот метод имеет две разновидности: точный и упрощенный способы расчета.

Точный метод построен на использовании криволинейных механических характеристик асинхронного электродвигателя как естественных, так и реостатных.

Упрощенный метод построен на спрямлении упомянутых характеристик в виде прямолинейных лучей, исходящих из одного полюса—пересечения оси ординат и линии синхронной скорости.

Каждый из указанных методов имеет несколько модификаций, имеющих целью придать расчету простоту, наглядность и универсальность, широко используя обобщения и графические построения.

Для расчета реостатов асинхронных электродвигателей, применяемых в подъемных установках, точный метод с использованием криволинейных механических характеристик разработан ХЭМЗ'ом (Харьковский электромеханический завод), изготавливающим реостаты, контакторные панели и электродвигатели для данной цели усиленной конструкции [5, 16, 17].

Применение точного метода построения криволинейных характеристик позволяет уменьшить число пусковых ступеней до пяти-шести, главным образом за счет увеличения толчков динамического момента, создавая условия плавного пуска и трудности управления при остановке машины.

Кроме того во всех методах, претендующих на точность расчета и полное использование пусковых свойств электродвигателя, без оговорок принимается постоянство напряжения на зажимах статора. Это допущение ничем не оправдывается, так как шахтные сети практически не обеспечивают этих условий. Таким образом точный метод практически приводит к толчковому пуску и возможности перехода через опрокидывающий момент при понижении напряжения, и метод, претендующий на точность, оказывается далеко не точным.

Главным же недостатком как основных методов, так и метода ХЭМЗ'а следует считать тот факт, что расчет реостата производится без учета режима работы, т. е. диаграммы скорости и сил, имеющих место при выполнении подъемной установкой производственных операций. Это последнее условие конкретизируется так:

1. Пусковые и замедляющие характеристики электродвигателя должны удовлетворять техническим условиям операции подъема и спуска грузов.

2. Подъемная установка представляет из себя систему с упругой связью сосуда с машиной, и поэтому должно быть удовлетворено условие плавности пуска и остановки.

3. Должно быть обеспечено условие долговечности работы установки, что в значительной степени обеспечивается лишь в том случае, когда избыточный (динамический) момент имеет возрастающий характер.

Опыт эксплуатации и настройки подъемных установок, имеющих контакторное управление, показывает, что весьма часты случаи несоответствия мощности электродвигателя и нагрузочного режима: мощность первого излишне велика. В этих случаях создаются условия не только трудного управления машиной, но и аварийного ее состояния. Толчки пускового момента при этом получаются настолько велики, что узлы механической части подвергаются поломкам и происходит быстрый износ канатов.

Наблюдения и анализ опытных данных в конечном результате приводят к выводу, что расчет реостата для асинхронного электродвигателя подъемной установки по методу спрямленных характеристик, с учетом диаграмм режима работы установки (диаграммы скорости и сил), дает гораздо лучшие результаты, чем другие методы, претендующие на точность, но упускающие из виду более важные обстоятельства.

На основании изложенных соображений автором предложен графоаналитический метод расчета реостата с учетом диаграмм режима работы. Метод проверен неоднократно на практике, где он давал всегда хорошие результаты.

Как для проектируемой, так и для существующей установки диаграммы режима работы, т. е. диаграммы скорости и сил, известны. Так же известны номинальное напряжение и ток ротора и его номинальное скольжение или из каталожных данных или из паспорта электродвигателя. Этих данных достаточно для расчета реостата, обеспечивающего заданный режим работы. Условия эксплуатации: плавность пуска, возможность спуска груза, экстренный приподъем клетки над кулаками, осмотр канатов и ствола и т. д.—надлежит учитывать дополнительно.

Графоаналитический расчет

Для графоаналитического расчета реостата асинхронного электропривода подъемной машины должен быть задан режим работы подъемной установки и режим эксплуатации для данных условий, а также номинальные величины напряжения и тока ротора и скольжение.

Основными параметрами, которые определяют режим работы, являются:

1. Диаграмма скорости одного полного цикла подъема номинального груза.

2. Диаграмма крутящих моментов на валу барабана или диаграмма сил на радиусе навивки канатов, если барабаны цилиндрические.

Реостат должен быть спроектирован так, чтобы по возможности точнее обеспечить заданный режим работы при неустановившихся состояниях пуска и замедления, а также предусмотреть особенности технологического процесса подъемной операции.

В клетевых подъемных установках необходимо производить приподъем клетки над кулаками, а в скиповых—возможность плавного схода и входа в разгрузочные кривые, плавную посадку скипа на каретку дозатора и закрывание последнего, а также в обоих случаях плавность натяжения каната, во избежание возникновения в нем недопустимо больших напряжений от колебаний.

Ступенчатые металлические реостаты из чугунных элементов, принятые в подъемных установках, не всегда полностью удовлетворяют указанным требованиям, особенно в тех случаях, когда число ступеней реостата мало, вследствие чего при пуске и остановке машины изменение крутящего момен-

та привода происходит толчками. Задачу проектирования металлического реостата необходимо подчинить существенному требованию эксплуатации — уменьшению вредного влияния толчкообразного приложения крутящего момента на элементы подъемной установки.

План расчета

На рис. 1 и 2 приведены типовые диаграммы режима работы подъемной установки со скипами, разгружающимися через дно. Для заданного режима

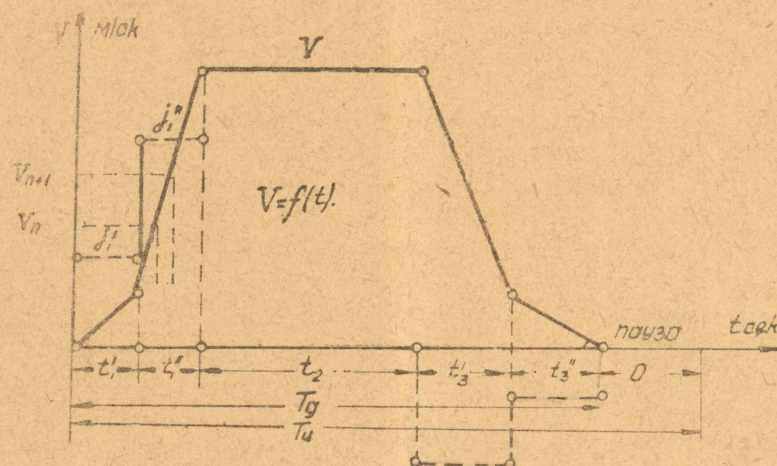


Рис. 1. Диаграмма скорости и ускорения скипового подъема с разгрузкой через дно.

необходимо рассчитать металлический реостат, стремясь при этом максимально удовлетворить требованию выполнения заданного режима и плавности

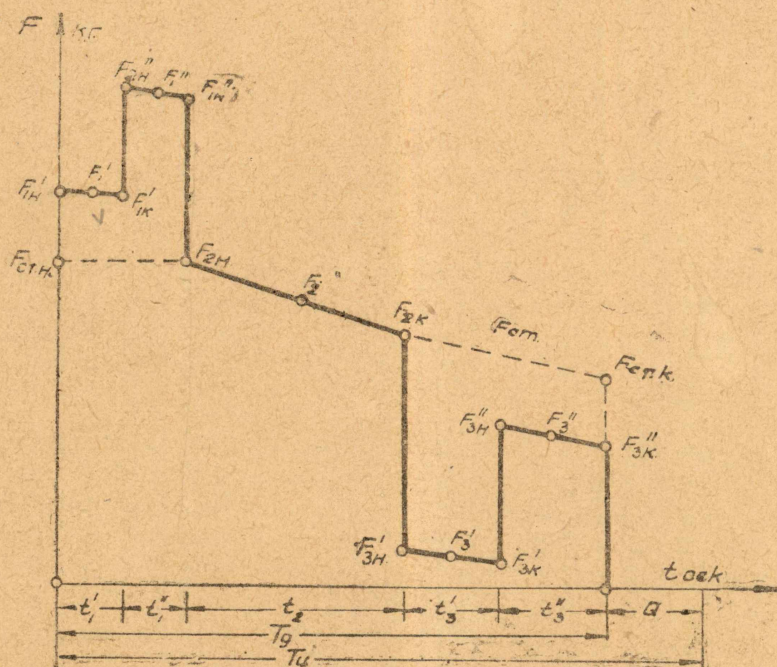


Рис. 2. Диаграмма сил скипового подъема.

нусковых характеристик для смягчения толчков. На рис. 3 показана диаграмма реостатных характеристик с учетом указанных выше требований.

Конкретно это выражается в том, что на диаграмму рис. 3 наносятся значения статических и движущих моментов (в данном случае—сил), а построение характеристик реостата подчинено вышеупомянутому требованию уменьшения начальных пусковых толчков и увеличения их по мере разбега.

Построение диаграммы характеристик поэтому производится в такой последовательности:

1. В координатных осях $S=f_1(M\%)$ по данному номинальному скольжению проводится прямая автоматической характеристики электродвигателя.

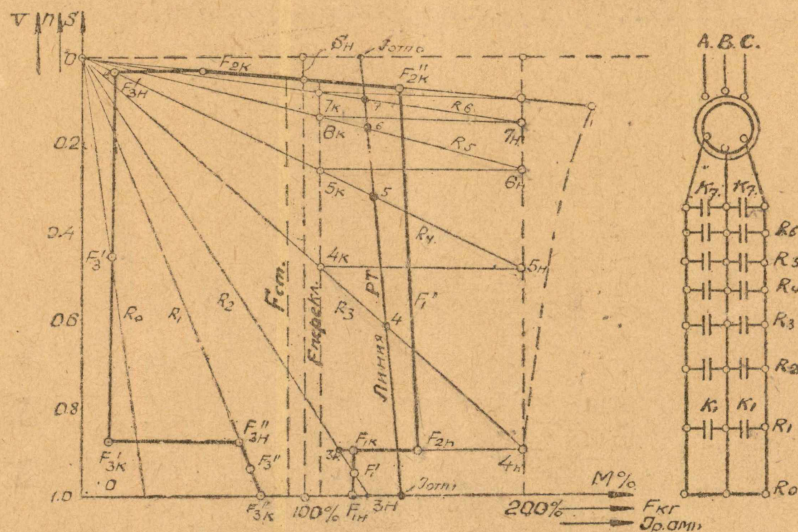


Рис. 3. Реостатные характеристики электродвигателя.

2. На оси абсцисс наносится в масштабе номинальное значение крутящего момента, равное 100%, которое определяется по мощности электродвигателя.

Номинальный крутящий момент электродвигателя на его валу будет

$$M_H = \frac{975 P(\text{квт})}{n_c} (\text{кг} - \text{м}). \quad (1)$$

Этот момент, приведенный к валу барабана, будет

$$M_{H6} = M_H i \cdot \eta_3 (\text{кг} - \text{м}), \quad (2)$$

где i —передаточное число редуктора и η_3 —к. п. д. зубчатой передачи.

Номинальное усилие на радиусе навивки при этом будет

$$F_H = \frac{M_{H6}}{R_6}. \quad (2')$$

Этому номинальному усилию на рис. 3 соответствует значение силы в 100%, отложенной на оси абсцисс, чем и определяется масштаб сил.

3. На рис. 3 наносим значение статических и движущих сил, взятых из диаграммы рис. 2 для всего цикла подъемной операции. Точки построения указаны соответствующими буквами, как они построены на диаграмме режима—рис. 2.

4. Имея план заданных сил, строим очевидные и необходимые для выполнения режима реостатные характеристики R_0, R_1, R_2 и R_3 , подчиняя их в то же время условию постепенного нарастания движущей силы: меньших вначале, когда машина неподвижна, и больших—после начала движения, когда движущее усилие становится больше статического. Основанием для такого принципа построения характеристик является положение, которое обосновы-

вается законами движения и подтверждается экспериментальными данными и теоретическими исследованиями, показывающими, что при неподвижном сосуде (вследствие упругих деформаций в канате) и начавшемся движении барабана в канате возникает колебательный процесс, значительно увеличивающий напряжение.

5. Общее количество ступеней, кроме указанных в п. 4, производится последовательным графическим построением так, чтобы колебание динамической составляющей силы укладывалось в пределах нижней границы равной $1.2 M_{ст}$, называемой моментом или током переключения, и верхней границы, определяемой опрокидывающим моментом, равным около двукратного от номинального.

При этом построении ориентирующей будет нанесенная линия движущих сил, расположенная в указанных выше пределах линий момента (тока) переключения и опрокидывающего момента, а также тот же основной принцип, что возрастание толчков пускового момента (приращение момента при переходе с одной ступени на следующую другую) должно возрастать по мере увеличения скорости, когда указанные толчки становятся менее опасными.

6. Первые реостатные характеристики R_0 и R_1 , кроме пусковых целей, также должны быть подчинены условию выполнения заданной тахограммы в третий период движения. Значение сил в этот период нанесено на рис. 3 и состоит из двух ступеней. Кроме того эти реостатные ступени используются для ремонтных целей в стволе и осмотра канатов при порожних скипах, а в некоторых случаях—для торможения противотоком. В последнем случае необходимо дополнительное условие наличия необходимого тормозного момента.

После окончательного размещения реостатных характеристик необходимо определить численное значение величины сопротивления для фиксирования характеристики в данном ее положении.

Для этого воспользуемся уравнением

$$R = R_n \frac{S^0/0}{M^0/0} . \quad (3)$$

Здесь R_n —номинальное сопротивление ротора, определяемое из номинальных значений напряжения и тока ротора, известных из паспорта электродвигателя, а именно:

$$R_n = \frac{U_{нр}}{\sqrt{3} I_{нр}} . \quad (4)$$

Значения величин скольжения— $S^0/0$ и момента $M^0/0$ берутся из построенной диаграммы рис. 3 для каждой данной характеристики. Величина сопротивления каждой ступени одной фазы ротора получается как разность предыдущего и последующего общего сопротивления цепи фазы ротора, т. е.

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R_0 - R_1 \\ r_2 &= R_1 - R_2 \\ &\vdots \\ r_n &= R_{n-1} - R_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Время разбега

На рис. 1 время разбега машины определено, исходя из постоянства динамической силы. При ступенчатом изменении этой силы время разбега определяется иначе.

Динамическая составляющая в уравнении динамики с цилиндрическими барабанами имеет вид

$$F = mj = m \frac{dv}{dt}. \quad (6)$$

Как видно из рис. 3, изменение динамической силы в функции скорости выражается отрезками прямых линий, т. е. имеет линейную зависимость, что позволяет определить аналитически продолжительность времени возрастания скорости от значения V_1 до V_2 под действием динамической силы, также изменяющейся линейно от F_1 до F_2 , как показано на рис. 4.

Из уравнения (6) имеем

$$dt = \frac{m}{F} \cdot dv$$

$$t_{1-2} = m \int_{V_1}^{V_2} \frac{dv}{F}. \quad (7)$$

Если динамическая сила постоянна, то

$$t_{1-2} = \frac{m}{F} (V_2 - V_1). \quad (8)$$

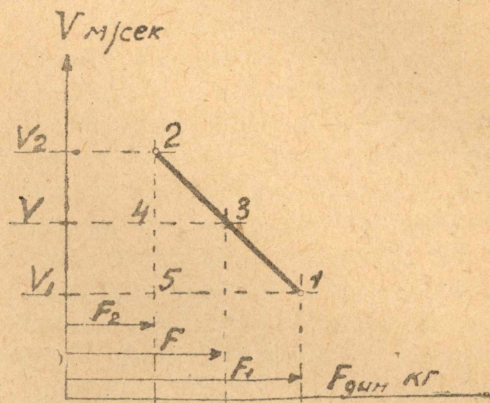


Рис. 4. Изменение скорости под действием изменяющейся динамической силы.

При линейном изменении F , из подобия треугольников 2, 3, 4 и 1, 2, 5—рис. 4, имеем

$$\frac{F - F_2}{F_1 - F_2} = \frac{V_2 - V}{V_2 - V_1}$$

или

$$F = F_2 + \frac{F_1 - F_2}{V_2 - V_1} (V_2 - V) = F_2 + \frac{F_1 - F_2}{V_2 - V_1} \cdot V_2 - \frac{F_1 - F_2}{V_2 - V_1} \cdot V. \quad (9)$$

Вводя краткие обозначения

$$F_2 + \frac{F_1 - F_2}{V_2 - V_1} \cdot V_2 = m \text{ и } \frac{F_1 - F_2}{V_2 - V_1} = n,$$

получим

$$F = m - nv. \quad (10)$$

Подставив из (10) в уравнение (7) значение F , получим

$$t_{1-2} = m \int_{V_1}^{V_2} \frac{dv}{m - nv} = \frac{m}{n} \ln \frac{m - nV_1}{m - nV_2}. \quad (11)$$

Подставив в полученное решение вновь значения m и n , после преобразования получим

$$t_{1-2} = \frac{m(V_2 - V_1)}{F_1 - F_2} \cdot \ln \frac{F_1}{F_2}. \quad (12)$$

Индексы 1 и 2 относятся к изменению скорости и динамической силы (отсчитанной от статической) на данной ступени реостата от момента замыкания данного контактора до замыкания следующего контактора. По этому уравнению производится подсчет времени разбега машины.

В том случае, когда время выдержки на данной ступени реостата регулируется не одним реле времени, а комбинированно с помощью токового реле (типа РЭ-191) и реле времени (типа РЭ-100 или РЭ-180), отсчет значения динамической составляющей F_1 в формуле (12) производится не от точек пересечения горизонтальной линии с линией реостатных характеристик (точки $4н$, $5н$, $6н$ и $7н$ на рис. 3), а от пересечения линии отпуска токового реле— $I_{тр}$ с линиями реостатных характеристик, т. е. от точек 4, 5, 6 и 7 до точек $4к$, $5к$, $6к$, $7к$ на рис. 3. Последние точки располагаются на линии тока переключения ($F_{перекл}$).

В изложенном выше в общем виде способе графоаналитического метода расчета реостата для рудничной подъемной установки предполагалось:

а) автоматическая и все реостатные характеристики электродвигателя представляют собой лучи прямых линий, идущих из одного центра синхронной скорости;

б) величина динамического момента (динамической силы) за период разбега и замедления изменяется по линейному закону;

в) переходные электромагнитные процессы в электродвигателе не влияют заметным образом на динамику ускоренного и замедленного движения установки.

Сделанные допущения делают расчет наглядным, позволяют учесть специфические особенности подъемной установки, но в то же время вносят неизбежные, как и при всяком ином методе расчета, погрешности, хотя бы даже потому, что величина сопротивлений при нагревании изменяется в зависимости от степени нагрева, при подборе ящиков сопротивлений неизбежны отклонения и т. д. Опыт показывает, что сделанные допущения, упрощая расчет, не вносят значительной погрешности, и результат расчета вполне удовлетворяет практическим требованиям.

ПРИМЕР I. Подъемная установка, оборудованная 4-тонными скипами, производит подъем угля с глубины 250 м. Тип барабанов $2 \times 5 \times 1.7$, мертвый вес скипов 4,0 т, масса движущихся частей, приведенных к радиусу навивки,—6000, коэффициент зубчатой передачи 1:10,2, максимальная скорость 6 м/сек, длина разгрузочного пути 3 м.

Кинематический режим подъема представлен на рис. 5. Длительность цикла $T_{ц}=67$ сек, длительность движения 61 сек. На основании полученных кинематических элементов стро-

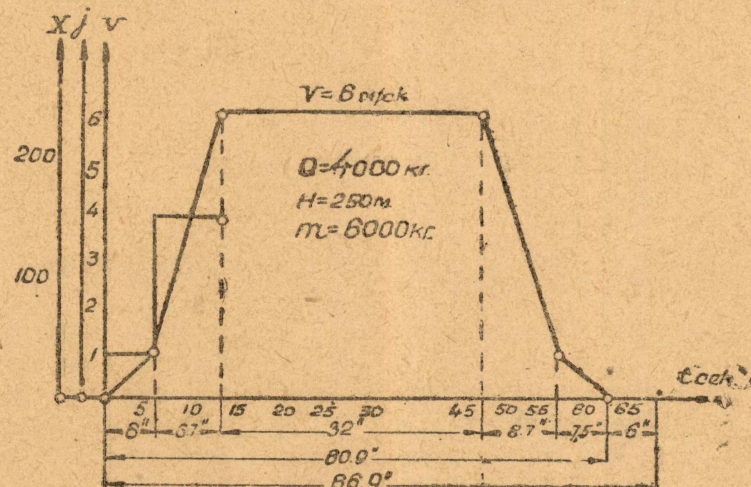


Рис. 5. Кинематика подъема 4-тонн. скипами.

ится диаграмма действующих сил во время подъема, построение которой показано на рис. 6. Основанием для построения служит уравнение динамики при цилиндрических барабанах без хвостового каната

$$F = kQ + p(H - 2x) + mj \quad (13)$$

Здесь $k = 1.15$, $Q = 4000$ кг, $H = 250$ м, $m = 6000$ и ускорения j показаны на диаграмме.

На основании диаграммы сил определяем эффективное усилие и мощность на радиусе шавивки

$$P_{\text{эф}} = \frac{F_{\text{эф}} \cdot V}{102 \eta_3}, \quad (14)$$

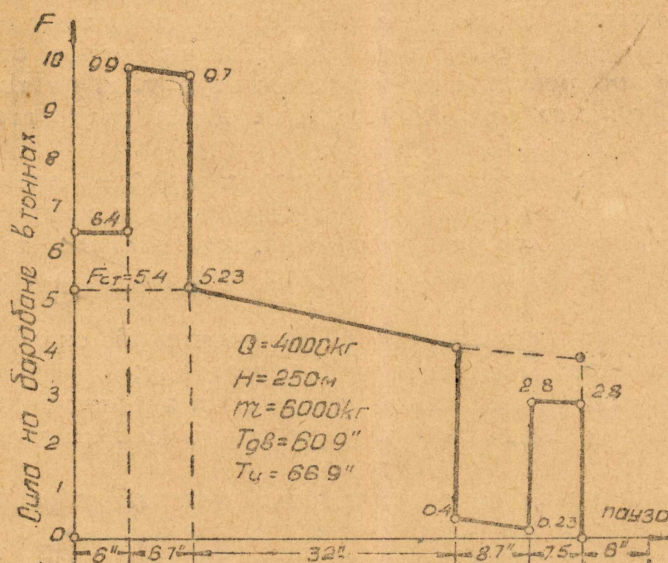


Рис. 6. Диаграмма сил одного цикла подъема 4-тонн. скипами.

где

$$F_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\sum F^2 t}{t_2 + 0.5(t_1 + t_3) + \frac{0}{4}}}$$

Значение сил показано на рис. 6.

В результате получаем $F_{\text{эф}} = 5900 \text{ кг}$,

и $P_{\text{эф}} = 380 \text{ квт}$.

Строительная номинальная мощность мотора принята в 400 квт, 250 об/мин, с данными ротора

$$\begin{aligned} I_{\text{нр}} &= 500 \text{ а,} \\ U_{\text{нр}} &= 520 \text{ в,} \\ S_{\text{н}} &= 5\% \end{aligned}$$

Эти данные являются достаточными для расчета реостата.

Построение реостатных характеристик

Построение реостатных характеристик для данного конкретного случая показано на рис. 7. Точками 1—10 показано значение действующих сил за весь цикл подъема, взятых из диаграммы заданного режима работы—рис. 6.

Положение характеристик R_0 , R_1 и R_2 определяется необходимостью обеспечить осуществление запроектированной диаграммы сил, как это показано на рис. 7.

Для построения дальнейших характеристик R_3 , R_4 и т. д. необходимо определить пределы колебания ускоряющей динамической силы. Обычно колебания динамической силы (или момента) определяют так:

а) нижний предел, называемый током переключения (в масштабе токов статора или ротора), должен быть на 15—20% выше тока, необходимого для преодоления статической силы. Последняя на диаграмме показана величиной в 5.4 т;

б) верхний предел или пик моментов определяется величиной опрокидывающего момента электродвигателя, принимаемого для крупных электродвигателей около 200% от номинального момента.

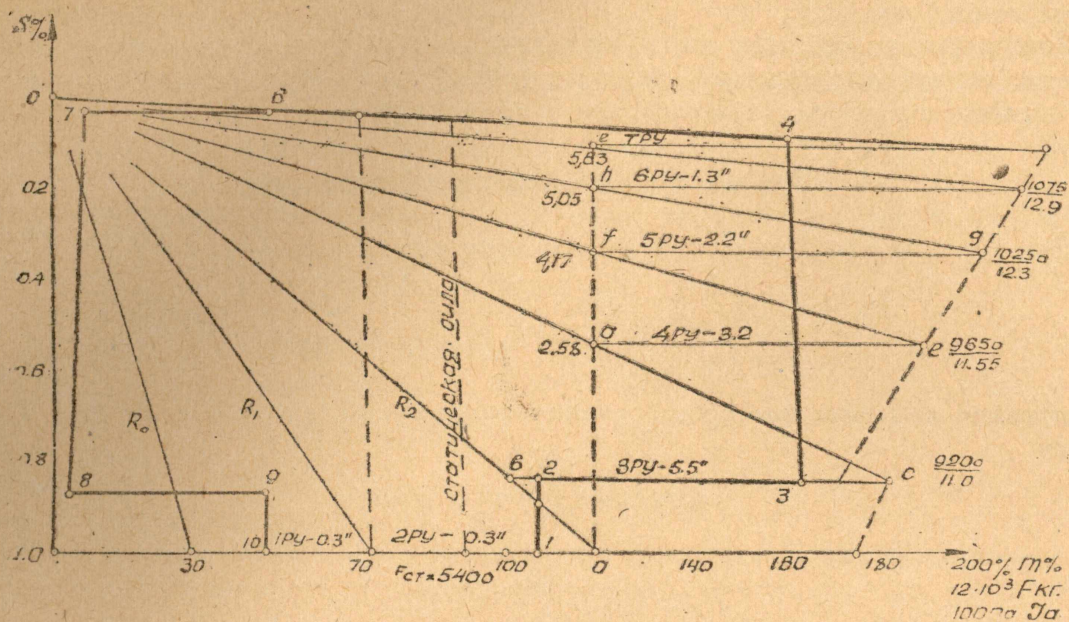


Рис. 7. Реостатные характеристики подъемного двигателя с 4-тонн. скипами.

Если исходить из этих пределов колебания моментов, то можно получить реостат, состоящий из 5 ступеней, но тогда толчки динамического момента при переходе с одной ступени на другую будут доходить выше 8 *m*.

Уместно упомянуть, что в данной подъемной установке реостат был запроектирован проектной организацией с большими приращениями динамической силы, доходящими до 10 *m*, вследствие чего при пробных испытаниях, после монтажа, были поломаны траверзы расцепного устройства свободного барабана, что вызвало длительный простой шахты. Чтобы уменьшить толчки при пуске, приращение динамического момента было уменьшено до 5 *m*, чего удалось достигнуть при 7 ступенях реостата. С семиступенчатым реостатом машина работает свыше 5 лет, без существенных аварий по вине реостата.

Эта часть в расчете металлического реостата является весьма существенной, и неосторожное назначение пределов изменения динамического момента приводит к аварийному состоянию оборудования, хотя при этом получается небольшое число ступеней реостата.

Более подробный анализ опыта эксплуатации установок с металлическими реостатами дает основание утверждать, что число аварий механической части и быстрый износ канатов находят свое объяснение именно в малом числе ступеней пускового реостата. В подтверждение справедливости этого утверждения можно было бы привести большой фактический материал, говорящий не в пользу ступенчатого пуска крупных реверсивных подъемных машин.

В резолюциях технической конференции по восстановлению шахт Донецкого бассейна (г. Сталино) изд. 1945 г. [21] также находим „В отношении улучшения стационарного оборудования“ пункт 4, говорящий, что „необходимо пересмотреть число ступеней на магнитных станциях крупных подъемных машин в сторону их увеличения, в связи с наблюдающимся неплавным пуском моторов на пятиступенчатых станциях“.

Со своей стороны считаем целесообразным, в целях безаварийной и долговечной работы крупных подъемных установок, имеющих массу, приведенную к радиусу навивки, свыше 4—5 тысяч единиц, обеспечивать плавным пуском.

чего удастся достигнуть при 7, 8 ступенях реостата, в зависимости от номинального скольжения ротора. Последнее необходимо иметь порядка 4—5%, что в крупных тихоходных электродвигателях, с фазным ротором, не всегда имеет место.

Диаграмма реостатных характеристик, рис. 7, дает возможность определить величину сопротивления всех ступеней реостата и подобрать реостат из каталожного сортамента ящиков сопротивлений.

Расчет величины сопротивлений

Для расчета сопротивлений пользуемся уравнением (3)

$$R = \frac{U_{\text{нр}}}{\sqrt{3} I_{\text{нр}}} \cdot \frac{S\%}{M\%} = \frac{520}{\sqrt{3} \cdot 500} \cdot \frac{S\%}{M\%} = 0,6 \frac{S\%}{M\%}. \quad (15)$$

Подставляя соответствующие значения скольжения и момента из рис. 7, получим

$$R_0 = 0,6 \frac{100}{30} = 2 \text{ ома}$$

$$R_1 = 0,6 \frac{100}{70} = 0,86 \text{ ома}$$

$$R_2 = 0,6 \frac{100}{120} = 0,50 \text{ ома}$$

$$R_3 = 0,6 \frac{84}{184} = 0,274 \text{ ома}$$

$$R_4 = 0,6 \frac{55}{193} = 0,171 \text{ ома}$$

$$R_5 = 0,6 \frac{34}{206} = 0,0794 \text{ ома}$$

$$R_6 = 0,6 \frac{20}{215} = 0,0558 \text{ ома}$$

$$R_7 = 0,6 \frac{11}{220} = 0,030 \text{ ома.}$$

Теперь определим сопротивление каждой ступени по формуле (5):

$$r_1 = R_0 - R_1 = 1,14 \text{ ома}$$

$$r_2 = R_1 - R_2 = 0,36 \text{ ома}$$

$$r_3 = R_2 - R_3 = 0,226 \text{ ома}$$

$$r_4 = R_3 - R_4 = 0,103 \text{ ома}$$

$$r_5 = R_4 - R_5 = 0,0916 \text{ ома}$$

$$r_6 = R_5 - R_6 = 0,0236 \text{ ома}$$

$$r_7 = R_6 - R_7 = 0,0258 \text{ ома.}$$

$$\text{Сумма } \Sigma r = 1,970 \text{ ома}$$

Время выдержки реле времени контакторов

Время нахождения ступени реостата под током определяется временем выдержки реле времени контакторов.

Это время определяется по формуле (12) и по диаграмме характеристик рис. 7. Токовое реле отсутствует и выдержка времени на данной ступени регулируется только реле времени.

Для реле ускорения 1РУ и 2РУ, как предварительных ступеней, обеспечивающих плавное нарастание момента, время выдержки определяется собственным временем реле около 0.3 сек. Для последующих реле имеем—реле 3РУ и 4РУ

$$t_{a-b} = \frac{6000 \cdot 1}{1800 - 600} \cdot \ln \frac{1800}{600} = \frac{6}{1.2} \cdot 1.1 = 5.5 \text{ сек},$$

$$t_{c-d} = \frac{6000 (2.85 - 1)}{5650 - 1850} \cdot \ln \frac{5650}{1850} = 3.2 \text{ сек и т. д.}$$

Подсчитанные таким образом выдержки времени показаны на соответствующих характеристиках рис. 7.

Полное время разбега до выхода на автоматическую характеристику равно 13.6 сек, вместо расчетных 12.7 сек. по рис. 5.

Тепловой расчет сопротивлений

На оси абсцисс рис. 7 наносим в масштабе роторных токов силу тока ротора, имея в виду, что 100% шкалы соответствует номинальное значение тока в роторе, равное

$$I_{np} = \frac{400 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 520 \cdot 0.9} = 500 \text{ а.}$$

За время пуска электродвигателя сила тока на ступенях меняется по величине, а также различно время пребывания данной ступени под током. Эти изменения показаны на рис. 8, построенном по данным рис. 7.

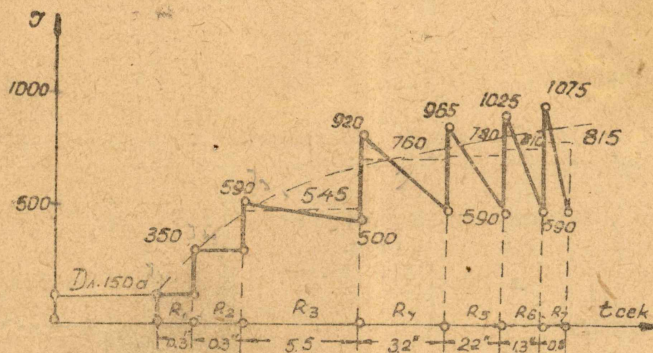


Рис. 8. Изменение тока на ступенях реостата во времени.

Сначала определим эффективные значения токов на отдельных ступенях по формуле средне-квадратичных величин

$$I_{эф} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}}. \quad (17)$$

Подсчет показывает, что можно в данном случае пользоваться средне-арифметическим значением

$$I_{\text{эф}} \cong \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (18)$$

Подсчитанные таким образом эффективные токи приведены на рис. 8 пунктиром.

Как видно из диаграммы, величина эффективных токов за время пуска меняется. Для оценки теплового действия этих токов необходимо определить эквивалентный ток на данной ступени.

Величина эквивалентного тока определяется по общей формуле

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum I_{\text{эф}}^2 t}{\sum t}} \quad (19)$$

Для нашего случая формула будет иметь вид

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2}{t_1 + t_2}} \quad (20)$$

Кроме того, необходимо определить относительную продолжительность нахождения данной ступени под током, которая определяется по формуле

$$ПВ\% = \frac{t_c \cdot 100}{T} \quad (21)$$

Так как в каталожных данных указывается допустимая величина тока при определенной продолжительности включения, например, 12.5 или 20%, то необходимо полученные по формуле (21) фактические продолжительности включения пересчитать на стандартные. Пересчет производится по формуле теплового баланса

$$I_1^2 ПВ_1\% = I_2^2 ПВ_2\% \quad (22)$$

т. е. при приведении к 12.5% продолжительности включения будем иметь

$$I = I_c \sqrt{\frac{ПВ\%}{12.5}} \quad (23)$$

Подсчитанные таким способом токи на ступенях приведены в табл. 1.

Таблица 1. Приведенные токи на ступенях

Ступень	Токи на ступени <i>a</i>	Эквивален. ток <i>a</i>	Длительн. нахождения ступ. под током сек	ПВ %	Привед. ток в <i>a</i> к $ПВ\%_{10} = 12.5\%$	Примечание
<i>R</i> ₀	150					
<i>R</i> ₁	150					
<i>R</i> ₂	150 и 350	270	0.6	0.88		
<i>R</i> ₃	270—545	525	6.1	9.8	445	
<i>R</i> ₄	525—760	618	9.3	13.7	646	
<i>R</i> ₅	618—780	650	11.5	16.9	755	
<i>R</i> ₆	650—810	670	12.8	18.8	821	
<i>R</i> ₇	670—815	678	13.6	20.0	1085	

Ступень выбирается по длительному току 150 *a*.

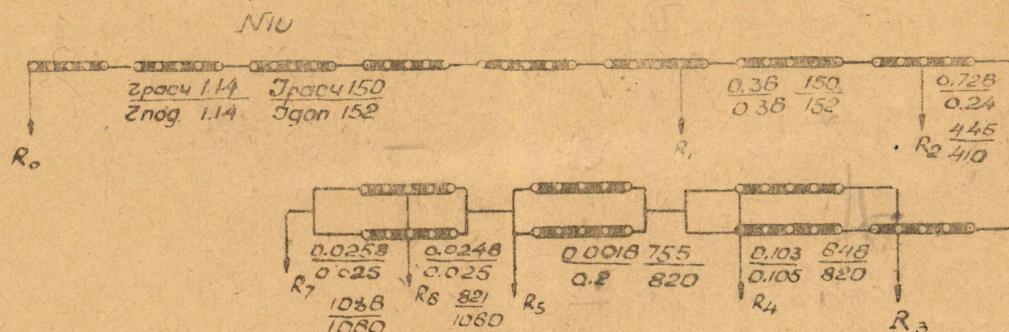
То же

Длительность цикла 68 сек.

Подбор ящиков сопротивлений

Подбор ящиков сопротивлений по току и величине омического сопротивления показан на рис. 9.

Для облегчения подбора приводятся электрические характеристики в таблице 2 и допускаемые рабочие токи в таблице 3, для чугунных элементов



[Рис. 9. Схема комплектования ящиков сопротивлений.]

ящиков, причем данные приведены для ходовых типов, получивших широкое применение в рудничных подъемных машинах.

Таблица 2. Электрические данные стандартных ящиков сопротивлений из 20 элементов

№ ящика	Сопротив. ящика в омах	Сопротив. одного элемента в омах	Постоян. времени нагрева сек.	Тип элемента	Примечание
5	0.1	0.005	850	СБ-5	В ящике 20 элементов и 5 выводных башмаков. Схема ящика 6+4+4+6
7	0.14	0.007	820	СБ-7	
10	0.20	0.010	635	СБ-10	
14	0.28	0.014	555	СБ-14	
20	0.40	0.020	575	СБ-20	
28	0.56	0.028	432	СБ-28	
40	0.80	0.040	547	СБ-40	
55	1.10	0.055	408	СБ-55	
80	1.60	0.080	550	СБ-80	
110	2.20	0.110	423	СБ-110	

Таблица 3. Допускаемые рабочие токи в амперах для чугунных элементов ящиков сопротивлений (при температуре нагрева 300°C)

Рабоч. период сек.	ПВ %	№ элементов									
		5	7	10	14	20	28	40	55	80	110
0-30	12.5	580	490	410	346	289	245	205	173	147	123
"	20	465	392	328	277	232	197	164	139	118	99
Длит.	100	216	181	152	128	107	91	76	64	54	46

Для расчета реостата удобно пользоваться формуляром. Расчетный формуляр для рассмотренного выше примера приведен в таблицах 4 и 5.

Расчетный формуляр

Таблица 4. А. Основные параметры подъемной установки

Наименование элемента	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Высота подъема	H	м	250	Два скипа
Полезно поднимаемый груз . . .	Q	кг	4000	
Мертвый вес сосуда	Q_m	кг	4200	
Барабаны—тип	—	—	$2 \times 5 \times 1.7$	
Приведенная масса к радиусу навивки	m	тем	6000	Опред. по диагр. сил
Зубчатая передача	i	—	10.2	
Мощность электродвигателя 3-фаз. асинхронного	P	квт	400	
Максимальная скорость подъема .	V	м/сек	6.0	
Номинальная сила тока ротора .	$J_{нр}$	а	500	Опред. из заданной производительности
Номинальное напряжение ротора (линейное)	$U_{нр}$	в	520	Опред. по мощности двигателя или из его паспорта
Номинальное скольжение	S_n	%	5	То же
Экстренная перегрузка	$\gamma_{экс}$	отсутствует		

Таблица 5. Б. Расчет реостата

Обозначен. ступени	Расчет сопротивл. тив. фазы $R_{0и}$	Сопротив. ступени $r_{0и}$	Время нахождения ступени под током сек.	Эквив. ток на ступень α	ПВ %	Привед. ток к $PB=12.5\%$	Подобранная величина сопротивления 0.01	Допустимая сила тока по каталогу α	№ ящиков по каталогу
R_0	2.0	—	—	150	—	Длит.	—	150	По длит.
R_1	0.86	1.14	0.3	150	—	"	1.14	} тельному току	10
R_2	0.50	0.36	0.6	270	0.88	"	0.36		"
R_3	0.274	0.226	6.1	525	9.0	445	0.24		10
R_4	0.171	0.103	9.3	618	13.7	646	0.105		10×2
R_5	0.0794	0.0916	11.5	650	16.9	755	0.1	820	10×2
R_6	0.0558	0.0236	12.8	670	18.8	821	0.025	1060	5×2
R_7	0.030	0.0258	13.6	678	20.0	1036	0.025	1060	5×2

$$\Sigma r = 1.970$$

$$\Sigma = 1.995$$

Пояснения к таблицам формуляра—рис. 4 и 5.

1. Расчетная величина сопротивления на фазу ротора определяется по формуле

$$R = \frac{U_{нр}}{\sqrt{3} J_{нр}} \cdot \frac{S\%}{M\%} \quad (24)$$

2. Время нахождения ступени под током находится во времени выдержки реле ускорения. Последнее подсчитывается по формуле:

$$t = \frac{m(V_2 - V_1)}{F_1 - F_2} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (25)$$

3. Эффективный ток определяется по формуле

$$J_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{J_1^2 + J_2^2 + J_1 J_2}{3}} \quad \text{или} \quad J_{\text{эф}} \cong \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (26)$$

4. Эквивалентный ток на ступени реостата определяется по формуле

$$J_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum F_2 t}{\sum t}} \quad (27)$$

5. Относительная продолжительность нахождения ступени под током находится по формуле

$$PB_{0/0} = \frac{t_c 100}{T_{\text{ц}}} \quad (28)$$

6. Приведенный ток к $PB_{0/0} = 12.5\%$ определяется по формуле

$$J = J_{\text{экв}} \sqrt{\frac{PB_{0/0}}{12.5}} \quad (29)$$

7. При выборе заводских ящиков сопротивлений необходимо комплектовать их из одного или двух типов для удобства замены в эксплуатации.

ПРИМЕР 2. Расчет реостата для клетевой грузоподъемной установки (лебедка ПМ-16)

Характеристика установки

Подъемная установка состоит из двух одноэтажных клеток с полезно поднимаемым грузом 1000 кг и весом одной порожней вагонетки 700 кг. На уровне рудничного двора и на верхней приемной площадке клетки становятся на кулаки.

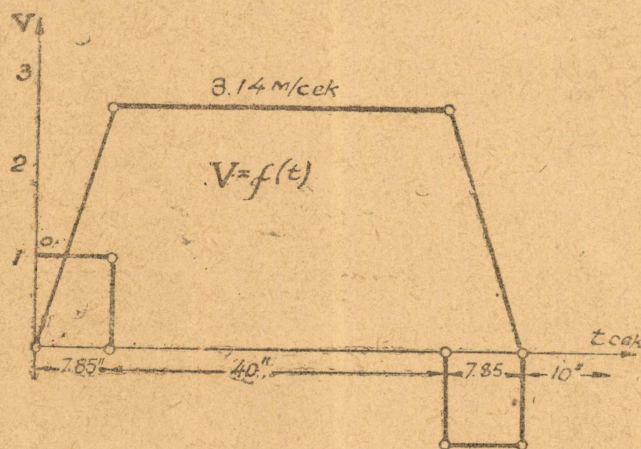


Рис. 10. Диаграмма скорости подъемной лебедки ПМ-16 $2 \times 2.5 \times 0.75$.

Помимо основных грузовых операций производятся также вспомогательные операции спуска — подъема людей, оборудования и материалов, ремонт ствола и др.

Режим работы подъемной установки приведен на рис. 10 и 11, на основании которых построена на рис. 12 диаграмма реостатных характеристик.

Расчетные величины приведены в таблицах 6, 7, 8, 9 и 10.

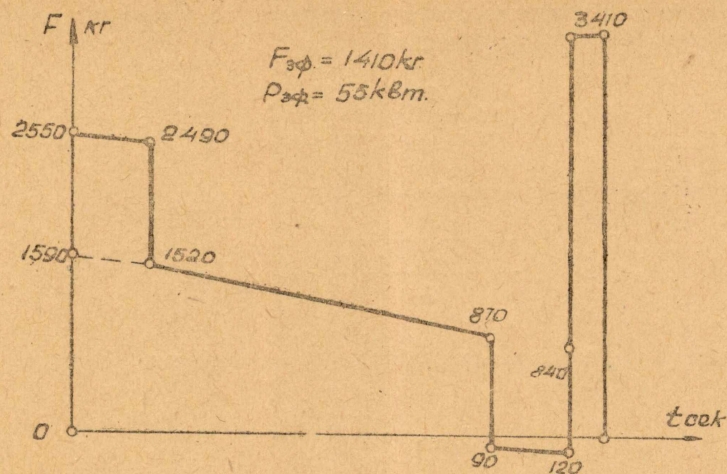


Рис. 11. Диаграмма сил подъемной лебедки ПМ-16.

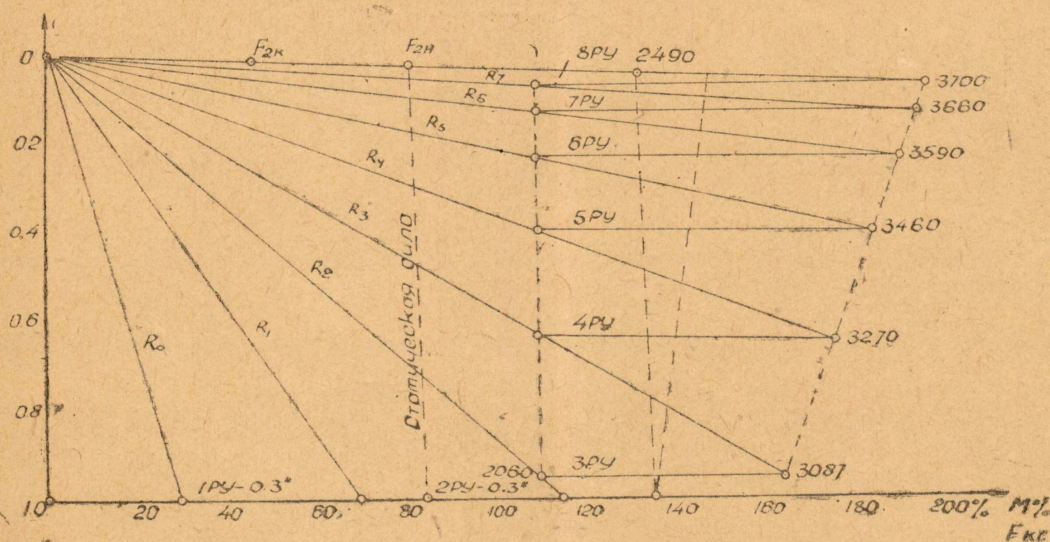


Рис. 12. Реостатные характеристики подъемного двигателя лебедки ПМ-16.

Таблица 6. Основные параметры установки

Наименование элементов	Обозначения	Единица измерения	Величина
Высота подъема	H	м	150
Полезно поднимаемый груз	Q	кг	1000
Мертвый вес сосуда	Q_m	"	2100
Бараны—тип ПМ-16	—	—	$2 \times 2.5 \times 0.75$
Приведенная масса к радиусу навивки	m	тем	2400
Зубчатая передача	i	—	30
Мощность электродвигателя	P	квт	75
Максимальная скорость	V	м/сек	3.14
Номинальная сила тока ротора	$J_{нр}$	а	120
Номинальное напряжение ротора	$U_{нр}$	в	400
Номинальное скольжение ротора	S_n	%	4
Экстренное усилие (приподъем груженой клетки над кулаками)	$F_{экс}$	кг	3410
Экстренная перегрузка	$\gamma_{экс}$	—	1.82

Таблица 7. Расчет величины сопротивлений

Ступень	Скольжение S%	Крутящ. момент % M	Сопротивл. фазы ротора R _{ом}	Сопротив. ступени r _{ом}	Примечание
R ₀	100	30	6.4	—	Расчетная формула $R = \frac{400}{\sqrt{3 \cdot 120}} \cdot \frac{S^0/0}{M^0/0} =$ $= 192 \frac{S^0/0}{M^0/0}$
R ₁	100	70	2.68	3.72	
R ₂	100	115	1.67	1.01	
R ₃	95	165	1.04	0.63	
R ₄	64	175	0.7	0.34	
R ₅	40	185	0.415	0.285	
R ₆	24	192	0.24	0.175	
R ₇	14	196	0.137	0.203	
R ₈	8	198	0.0775	0.06	

Таблица 8. Время выдержки реле времени контакторов

№ контак.	Приращ. скорости ΔV м/с	Динамич. сила кг		Разность F ₁ — F ₂	ln $\frac{F_1}{F_2}$	Время t сек	Примечание
		F ₁	F ₂				
1	0	—	—	—	—	0.3	Собст. время реле
2	0	—	—	—	—	0.3	
3	0.15	—	—	—	—	0.7	
4	1.03	1500	485	1015	1.15	2.8	
5	0.75	1700	505	1195	1.21	1.8	
6	0.52	1910	513	1397	1.31	1.2	
7	0.33	2040	523	1517	1.36	0.7	
8	0.2	2110	523	1587	1.4	0.4	
Σ—8.2							

Указание: 1) Приращение скорости на данной ступени берется по диаграмме.
2) Расчетная формула для времени

$$t = \frac{2400 \Delta V}{F_1 - F_2} \cdot \ln \frac{F_1}{F_2}$$

3) Если применено токовое реле—РТ типа РЭ-191, время выдержки на реле времени определяется по формуле п. 2, но отсчет динамической составляющей—F₁ производится от линии отпуска токового реле до линии момента или тока переключения, как было указано выше.

Таблица 9. Тепловой расчет реостата

Ступень	Сила тока в амперах на ступени			Время на ступени сек.	Эквив. ток амп.	Время пребывания ступени под током сек.	Примечание
	J _{1a}	J _{2a}	Эффект. ток а				
R ₀	36	—	36	0.3	36	0.3	На рис. 12 приведена диа- грамма изме- нения токов.
R ₁	84	—	84	0.3	84	0.6	
R ₂	138	132	135	0.7	109	1.3	
R ₃	198	132	170	2.8	153	4.1	
R ₄	210	138	175	1.8	161	5.9	
R ₅	223	138	180	1.2	164	7.1	
R ₆	230	138	185	0.7	166	7.8	
R ₇	235	138	190	0.4	168	8.2	

4) Расчетная формула для эффективного тока

$$J_{эф} = \sqrt{\frac{J_1^2 + J_2^2 + J_1 J_2}{3}} \approx \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (31)$$

Для эквивалентного тока

$$J_{эв} = \sqrt{\frac{J_{э1}^2 t_1 + J_{э2}^2 t_2}{t_1 + t_2}} \quad (32)$$

Таблица 10. Подбор ящиков сопротивлений

Обозначение ступени	Расчет сопротивл. фазы $R_{ом}$	Сопротивл. на ступени $r_{ом}$	Время наложения ступени под током сек.	Эквивал. ток на ступени $J_{э} \alpha$	ПВ %	Привед. ток к 12.5% α	Подобр. сопротивл. $ом$	Допуст. ток α	№ ящиков	Примечание
R_0	6.4	—	—	—	—	—	—	—	—	$T_{п} = 61''$
R_1	2.68	3.72	0.3	36	0.54	36	3.8	46	110+80	
R_2	1.67	1.01	0.6	84	0.9	84	1.04	76	40	
R_3	1.04	0.63	1.3	109	2.0	44	0.56	205	40	
R_4	0.7	0.34	4.1	153	6.1	107	0.40	205	40	
R_5	0.415	0.285	5.9	161	8.8	135	0.28	205	40	
R_6	0.24	0.175	7.1	164	10.6	151	0.20	205	40	
R_7	0.137	0.203	7.8	166	11.6	160	0.20	205	40	
R_8	0.0775	0.06	8.2	168	12.2	166	0.08	205	40	

Таблица 11. Контакторы Харьковского электромеханического завода

ТИП	Длительный ток α	Нажатие контактов $ки$		Включающая катушка 220 в			
		Начальное	Конечное	Число витков	Ток включения α	Рабочий ток α	Сопротивление $ом$
КТ-1	40	—	—	—	—	—	—
КТ-2	75	0.68—0.9	0.9—1.15	1650	1.45	0.34	22.7
КТ-3	150	1.8	3.6	800	6.55	0.69	6.12
КТ-4	300	3.6	7.2	424	18.8	1.68	1.42
КТ-6	600	7.2	14.5	232	56.5	3.34	0.33

Напряжение втягивания при нагретой катушке

$$U_{min} \approx 0.61 U_n$$

Настройка токового реле

Трехфазное токовое реле типа РЭ-191 включено параллельно каждой фазе последней ступени реостата. Назначение токового реле состоит в том, чтобы во время пуска создать выдержку времени по току, а реле времени в этом случае служит дополнительной выдержкой времени включения очередного контактора. Схема включения токового реле—РТ в схему управления показана на рис. 13.

Контакты токового реле РТ включены в цепь всех реле времени (1РУ—7РУ на рис. 13). Пока контакты РТ замкнуты, ни одно очередное реле времени не придет в действие. Когда сила пускового тока спадет до величины тока ротора, называемого током отпуска реле и который устанавливается в пределах $J_{отп} = (1.4 \div 1.6) J_{ном}$, контакты РТ разомкнутся и придет в действие очередное реле времени.

По истечении времени уставки, реле времени своими блокконтактами 1PY2—7PY2, рис. 13, замкнет цепь очередного роторного контактора, чем будет зашунтирована данная ступень реостата.

В момент срабатывания токового реле (РТ) имеем следующую связь между токами ротора— $J_{отп}$ и токового реле— i_p

$$U_p = J_{отп} r = i_p Z_n. \quad (33)$$

В этих равенствах— U_p —падение напряжения на сопротивлении r_c последней ступени фазы реостата, а Z_n —полное сопротивление цепи токового реле.

Полное сопротивление цепи реле состоит из дополнительного активного сопротивления установочного реостата— r_d , включенного последовательно

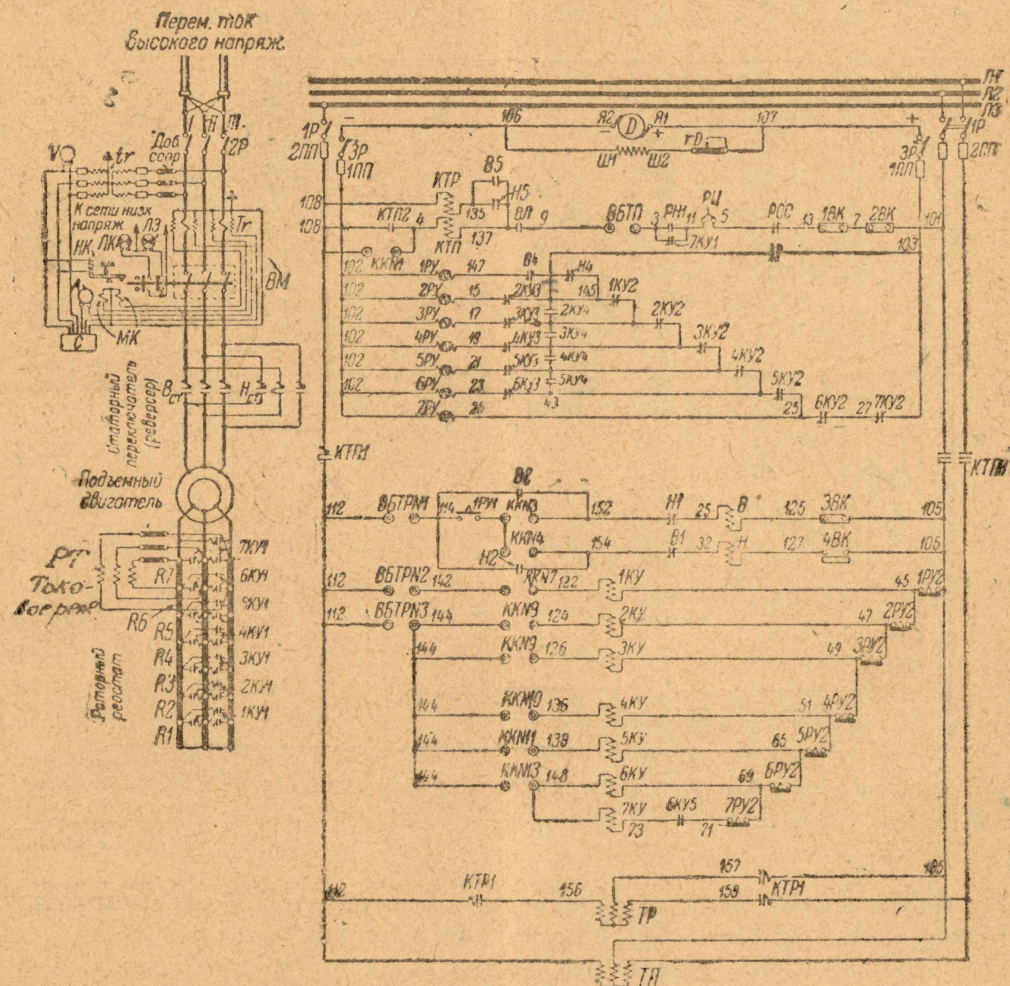


Рис. 13. Схема контакторного управления подъемной машиной ХЭМЗ'а.

с обмоткой катушки токового реле и самого реле— r_p и индуктивного сопротивления катушки реле— x_p .

Из уравнения (33) получим ток отпуска реле

$$J_{отп} = \frac{i_p}{r_c} \cdot Z_n = \frac{i_p}{r_c} \sqrt{(r_d + r_p)^2 + x_p^2}. \quad (33')$$

За период разбега машин частота тока ротора меняется от 50 до 10 пер/сек, что вызывает уменьшение индуктивного сопротивления— x_p . Кроме того величина индуктивного сопротивления в большой степени зависит от

зазора— δ между полюсом и якорем реле. Этот зазор может регулироваться, чем достигается настройка реле.

На рис. 14 показана схема реле и зависимость $Z_p = f_1(c)$ и $Z_p = f_2(\delta)$, т. е. зависимость полного сопротивления реле

$$Z_p = \sqrt{r_p^2 + x_p^2} \quad (34)$$

в функции частоты сети— c и величины зазора— δ .

Настройка токового реле производится в таком плане:

1. На диаграмме реостатных характеристик, рис. 3, наносится линия тока отпуска реле— $J_{отп}$, для двух значений скольжения—ноль и единица.
2. Кратность тока отпуска реле при скольжении ноль выбирается в пределах $(1.4 \div 1.6)J_n$. Эта кратность получается исходя из того, что

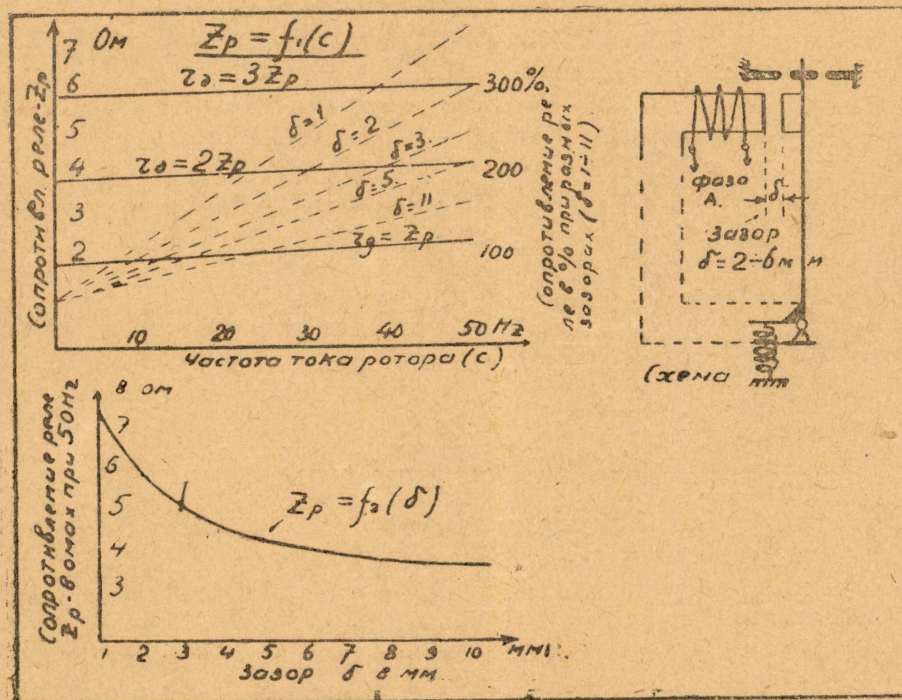


Рис. 14. Схема и характеристики реле тока типа РЭ-191.

нижний предельный ток переключения больше тока, соответствующего статической силе, на 15—20%. Увеличивая этот ток еще на 10—20%, чтобы дать возможность работы реле времени с некоторой выдержкой, получим верхнюю точку тока отпуска.

3. Кратность тока отпуска при скольжении единица получим из уравнения (33)

$$k_1 = \frac{J_{отп1}}{J_{отп0}} = \frac{\sqrt{(r_d + r_p)^2 + x_{p1}^2}}{\sqrt{(r_d + r_p)^2 + x_{p0}^2}} \approx \frac{\sqrt{r_d^2 + x_{p1}^2}}{\sqrt{r_d^2 + x_{p0}^2}} \approx \frac{Z_{p1}}{Z_{p0}} \quad (35)$$

Значение сопротивлений при скольжении равном единице— Z_{p1} и скольжении равном нулю— Z_{p0} берутся из характеристик реле—рис. 14.

4. Параметры токового реле подбираются наиболее благоприятные для его работы, которые находятся в следующих пределах: $U_p = 13 \div 15$ вольт, $r_d = 2Z_p = 10 \div 12$ ом, $\delta = 2 \div 4$ мм и ток отпуска самого реле около 1.5а. Правильность выбранных рабочих параметров корректируется по формуле (33) для тока отпуска при скольжении, равном нулю.

По полученным двум значениям тока отпуска и наносится линия отпуска реле—РТ на диаграмме реостатных характеристик.

5. Корректировка настройки токового реле производится изменением натяжения пружины, т. е. изменением механической характеристики реле—РТ.

6. После нанесения линии отпуска токового реле, должна быть произведена настройка реле времени. Методика этой настройки остается такой же, как при схеме только с реле времени (см. формулы 7—12 и главу—Время разбега), с той лишь разницей, что отсчет динамической составляющей сил производится в пределах от линии отпуска токового реле до линии токов переключения, как было указано ранее.

После подсчета времени выдержки каждого реле времени должна быть произведена проверка работы автоматики комбинированного пуска с реле—РТ и реле времени—РВ на случай спуска нормального груза. Для этой проверки необходимо определить время разбега подъемной установки под влиянием опускающегося груза. Для этой цели должны быть построены диаграммы режима работы при спуске груза.

При этом суммарное время выдержки времени реле—РВ должно быть равным времени разбега под действием опускающегося груза, чем гарантируется правильная работа автоматики при спуске груза, т. е. вход асинхронного электродвигателя в генераторный режим после достижения синхронной скорости.

Без этой проверки теряется смысл и преимущества комбинированной автоматики пуска с токовым реле и реле времени.

В том случае, если общее время выдержки на реле времени окажется большим, чем время ускорения при спуске груза, необходимо линию токов отпуска токового реле сместить влево и снова сделать проверку.

Подбор контакторов

Включение контакторов и реостата производится по двухполюсной (рис. 3) или трехполюсной схеме, как показано на рис. 13.

В первом случае через контактор проходит линейный ток реостата, а во втором—фазный ток.

В таблице 11 приведены технические данные контакторов ХЭМЗ'а, по которым производится их выбор для данных условий.

Для примера 1, при номинальном токе ротора 500 а, достаточными будут трехполюсные контакторы типа КТ-4, пропускающие фазный ток 300 а или линейный—300. $\sqrt{3}=520$ а.

Для примера 2, где номинальный ток ротора 120 а, достаточными будут двухполюсные контакторы типа КТ-3 на 150 а, а при трехполюсной схеме, когда ток через контакторы будет $120\sqrt{3}=70$ а, достаточными будут контакторы типа КТ-2 на длительный ток 75 а.

Все контакторы панели ставятся одинакового типа для упрощения ухода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулебакин В. С.—Электрическая аппаратура, т. 1. Пусковые и регулирующие реостаты, Госэнергоиздат, М.—Л. 1932.
2. Енько В. В.—К вопросу о расчете пусковых реостатов, Вестн. электропром. № 4, 1936.
3. Попов В. К.—Основы электропривода, Госэнергоиздат, М.—Л., 1945 (Библиография).
4. Фатеев А. В. и Норневский Б. И.—Сборник примеров и задач по теории электрического привода, ГОНТИ, 1939.
5. Россошанский И. А.—Расчет универсальных характеристик и пускового сопротивления трехфазных асинхронных двигателей, Вестн. электропром. № 3, 1941.
6. Штейн И. М. Построение характеристики асинхронного эл. двигателя с контактами, Вестник электропром. № 8, 1940.
7. Франкфурт Я. А.—Построение механической характеристики асинхронного двигателя, Вестн. электропром. № 4, 1947.

8. Сорокер Т. Г.—О формуле для крутящего момента асинхронного двигателя, Вести. электропром. № 9, 1939.
9. Гейлер Л. Б.—Формула для крутящего момента асинхронного двигателя, Вести. электропром., № 12, 1938.
10. Бычков В. П.—Графические методы построения кривых асинхронного двигателя, Эл-во № 9, 1945.
11. Коновалов Н. И.—Характеристики асинхронных двигателей в системе относительных единиц, Эл-во № 9, 1945.
12. Булгаков В. А.—Электрическая аппаратура управления, Госэнергоизд., М.—Л., 1947.
13. Шенфер К. И. и Свириденко П. А.—Рекуперация энергии в промышленности, Энергоизд., М.—Л., 1946.
14. Хализев Г. П.—Пуско-регулирующая аппаратура, Моск. энерг. ин-т, 1937.
15. Вешеневский С. Н.—Расчет сопротивлений для электродвигателей, ГОНТИ, 1938.
16. Шклярский Ф. Н.—Расчет пусковых сопротивлений и установок реле ускорения для асинхронного подъемного двигателя, Записки Ленинград. горн. ин-та, т. 14.
17. Россоманский А. И.—Асинхронный привод шахтной подъемной машины, Вестник ХЭМЗ, № 4 (23), 1939.
18. Казовский Е. Я.—Переходные режимы в асинхронных машинах, Эл-во № 6, 1947 (Библиография по теории асинхронных машин).
19. Horwood P. B.—Control of electric motors, New York, 1944.
20. Бахарев В. М.—Об утомляемости стали при повторных перегрузках, Труды ЦИАМ № 91, НКАП, 1945.
21. Резолюции технической конференции по восстановлению шахт Донецкого бассейна, г. Сталино, 1945.