Записки Ленинградского Горного Института. Том XIV, 1941
Annales de l'Institut des Mines à Léningrad. Vol. XIV, 1941

II. Горное дело

Расчет пусковых сопротивлений и уставок реле ускорения для асинхронного подъемного двигателя

Проф. *Ф. Н. Шклярский*

Die Berechnung von Anlasswiderständen und Aufstellungen der Beschleunigungsrealis

Prof. *F. N. Szklarski*

Исходными данными при определении пусковых сопротивлений в рассматриваемом случае являются нижеследующие величины.

1) Мощность и тип подъемного двигателя, для которого на основании соответственных каталогов, в свою очередь, могут быть найдены:

a) отношение опрокидного (максимального) момента вращения к номинальному моменту $\left(\frac{M_{макс}}{M_{ном}}\right)$; b) номинальное напряжение ротора $E_{ном}$;[1] c) номинальный ток ротора $I_{ном}$; d) к. п. д. двигателя; e) синхронное n_c и номинальное $n_{ном}$ число оборотов последнего.

2) Расчетные значения пускового момента вращения.

3) Значения статического момента сопротивления, соответствующие пусковому периоду.

4) Количество ступеней (секций) роторного реостата.

5) Период пуска t_1 и полный период рабочего цикла T, включающий паузу Θ, применительно к заданной тахограмме (рис. 1).

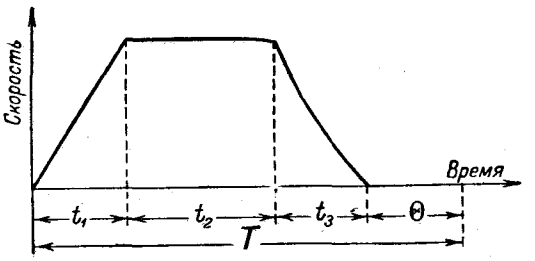


Рис. 1. Тахограмма с постоянным пусковым ускорением для неуравновешенной системы подъема.

Согласно приводимому ниже графическому методу определения пусковых сопротивлений необходимо прежде всего построить механические характеристики двигателя: естественную, соответствующую собственному сопротивлению обмотки ротора, и искусственные, обусловленные включением в цепь ротора определенных ступеней (секций) пусковых сопротивлений. Для указанной цели необходимо задаться предельными (максимальным и минимальным) значениями колебаний пускового момента вращения, варьирующего около расчетной его величины. Диапазон этих колебаний, находящийся в обратной зависимости от числа ступеней пускового реостата, может достигать 30% и даже более от расчетного значения пускового момента.

[1] Значение $E_{ном}$ соответствует неподвижному ротору двигателя, находящегося под напряжением.

При этом необходимо иметь в виду, что верхние значения пускового момента, варьирующего около его расчетной величины, не должны достигать величины опрокидного момента, не доходя до последнего, примерно, на $\sim 10\%$, ввиду возможности некоторого уменьшения приложенного к двигателю напряжения; равным образом, нижние значения указанного момента не могут опускаться ниже величины статического момента сопротивления на том основании, что в противном случае в период пуска, наряду с режимом ускорения, имело бы место явление замедления движения в моменты времени, соответствующие падению пускового момента вращения ниже значения статического момента сопротивления, определяемого на рис. 2 для случая неуравновешенной системы подъема линией DFE.

Диапазоном колебаний пускового момента вращения задаются ориентировочно, в зависимости от числа ступеней реостата; после нескольких пробных построений удается установить точную величину указанного диапазона. [1]

Здесь следует отметить одно весьма важное обстоятельство, состоящее в том, что ***не всякий двигатель определенной мощности может удовлетворить требуемым условиям пуска при*** a priori ***заданном числе ступеней пускового реостата.*** Дело в том, что не при всякой величине опрокидного момента может быть соблюден необходимый при данном числе ступеней реостата диапазон колебаний пускового момента. Так, например, при небольших значениях отношения $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$, порядка 1,8—2,1, может оказаться недостаточным пяти или шести ступеней реостата, ввиду недопустимости указанного выше достижения верхним пределом колебаний пускового момента величины опрокидного момента двигателя; кроме того, при этом может иметь место также снижение нижнего предела колебаний пускового момента до значения, меньшего по сравнению со статическим моментом сопротивления, что, как указывалось выше, тоже является недопустимым.

Построение характеристик двигателя произведено на рис. 2. Для получения естественной характеристики поступают следующим образом. На линии AFB, определяющей величину номинального момента $M_{ном}$, откладывают отрезок Ba, соответствующий номинальному скольжению $s_{ном}$; затем точку O, соответствующую идеальному холостому ходу (синхронной скорости), соединяют с точкой a; полученную прямую продолжают до встречи в точке b с линией mn, определяющей верхний предел колебаний пускового момента вращения; полученная таким образом линия Oab представляет рабочую часть естественной характеристики R_2 двигателя. [2] Исходные данные, необходимые для построения последней характеристики, определяются следующим образом.

Номинальный момент вращения $M_{ном}$ в *кг-м* получается из выражения:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{n_{ном}} \cdot 975, \qquad (1)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя в kW; $n_{ном}$ — номинальное число оборотов последнего в минуту.

Номинальное скольжение $s_{ном}$ определяется из выражения:

$$s_{ном} = \frac{n_c - n_{ном}}{n_c}, \qquad (2)$$

где n_c — синхронное число оборотов двигателя.

Для построения искусственных характеристик двигателя поступаем следующим образом.

Проводя из точки b вертикальную линию до встречи ее с линией pq, определяющей нижний предел колебаний пускового момента вращения, получаем точку c; соединяя точки O и c прямой линией и продолжая ее до встречи с линией mn в точке d, получим рабочую часть искусственной характеристики r_6, в предположении ***шести*** ступеней роторного реостата.

[1] Для предварительного ориентировочного определения сопротивления ступеней пускового реостата может служить метод логарифмической линейки (см. А. Е. Максимов. Основы электрического привода. Горная электротехника, ч. I, 1939, стр. 47 и 98).

[2] В предположении, что некоторая кривизна характеристики при этом не принята во внимание.

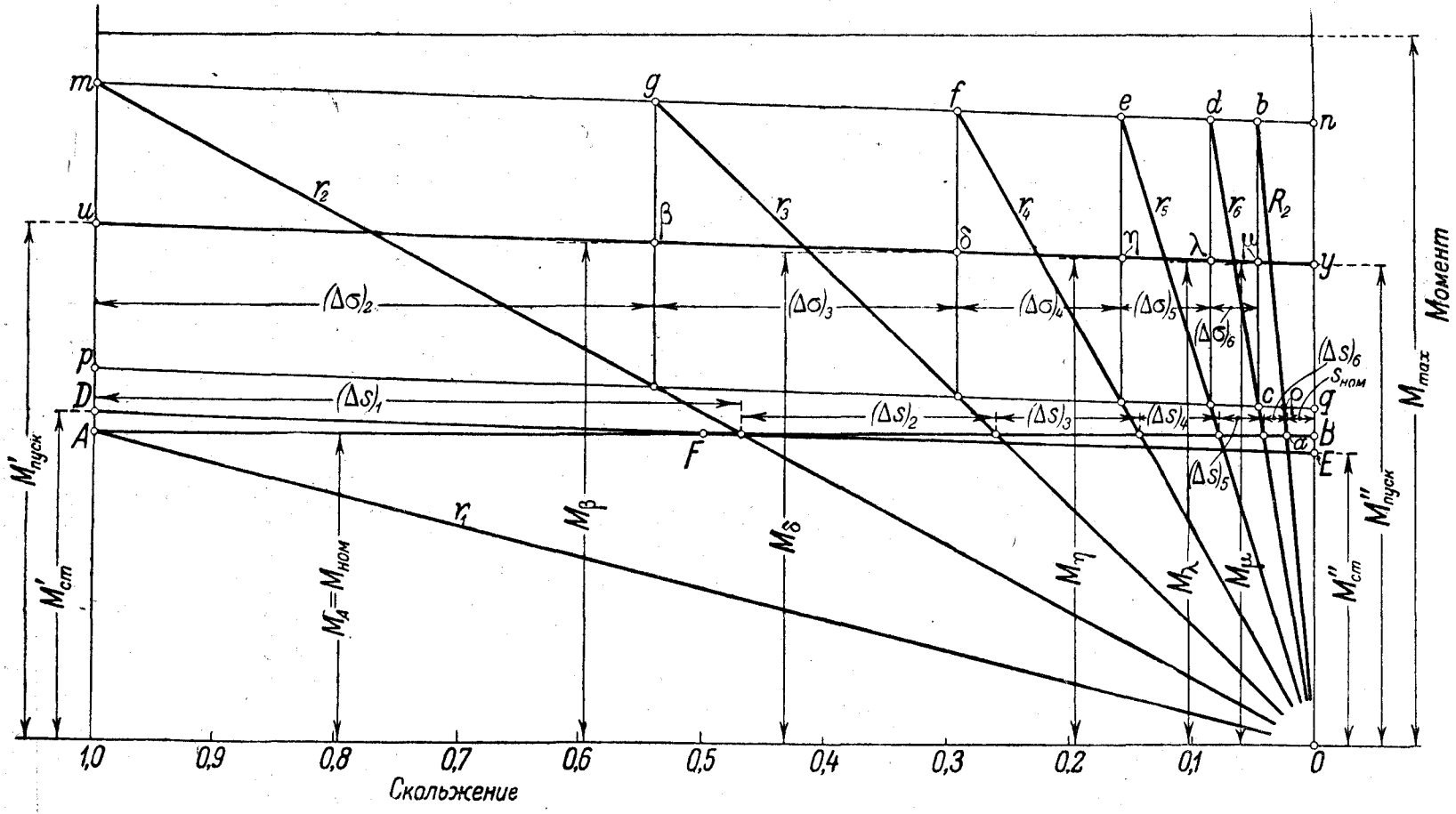


Рис. 2. Построение пусковых характеристик асинхронного подъемного двигателя.

Продолжая подобным образом дальнейшее построение, получим соответственные искусственные характеристики $Oe(r_5)$, $Of(r_4)$, $Og(r_3)$, $Om(r_2)$, из коих последняя характеристика, а именно, $Om(r_2)$, соответствует началу нормального пуска (при скольжении $s=1$). Работа двигателя на характеристике r_1, обусловливающей при скольжении $s=1$ получение момента вращения, не превышающего статического момента сопротивления, при нормальных подъемных операциях дает возможность, без приведения в движение всей подъемной системы, произвести натяжение каната; работа на характеристике r_1 в отсутствии нормальной нагрузки дает возможность получения малой скорости движения, необходимой для ревизии каната и ствола шахты.

Относительно условий производства последней операции необходимо отметить, что величина сопротивления первой ступени реостата, соответствующей характеристике r_1, зависит от значения статического момента сопротивления, обусловленного нагрузкой машины при ревизии каната, осуществляемой при определенном (сравнительно значительном) скольжении двигателя. Для случая неуравновешенной системы подъема начальное значение указанного статического момента сопротивления оказывается тем больше, чем больше высота подъема, т. е., чем глубже шахта. В установках ХЭМЗ'а величина сопротивления первой ступени пускового реостата обеспечивает получение момента вращения двигателя, равного $\sim 1/3$ его номинального момента, каковое значение в отдельных случаях может оказаться недостаточным; при работе двигателя на второй ступени реостата в указанных установках получается момент вращения, равный примерно номинальному моменту.

Вообще же получение необходимого статического момента сопротивления, соответствующего моменту вращения двигателя при работе его на первой ступени реостата с требуемым скольжением (скоростью подъема), может быть достигнуто в каждом отдельном случае или применением механического торможения, или определенной загрузкой соответственного подъемного сосуда.

Собственное сопротивление обмотки ротора R_2 в омах, принимая во внимание лишь активное сопротивление последней и пренебрегая ее реактивным сопротивлением, можем получить из выражения:

$$R_2 = \frac{s_{\text{ном}} \cdot E_{\text{ном}}}{\sqrt{3}\, I_{\text{ном}}}. \qquad (3)$$

Входящие в последнее выражение величины: номинальное напряжение ротора $E_{\text{ном}}$ в V и номинальный роторный ток $I_{\text{ном}}$ в A даются в соответственных каталогах для каждого двигателя; $s_{\text{ном}}$ определяется из выражения (2).

Величины сопротивлений отдельных ступеней роторного реостата $(\Delta r)_i = r_i - r_{i+1}$, [1] где r_i и r_{i+1} — сопротивления цепи ротора при работе двигателя на соответственных смежных характеристиках того же наименования, могут быть определены на основании предположения, что проценты указанных сопротивлений $(\Delta r)_i\%$ равны процентам скольжений $(\Delta s)_i\%$, отсчитываемых при ***номинальном*** моменте между смежными характеристиками двигателя. Таким образом, согласно указанному предположению имеем:

$$(\Delta r)_i\% = (\Delta s)_i\%. \qquad (4)$$

В свою очередь, величины $(\Delta s)_i$ могут быть определены ***измерением*** соответственных отрезков $(\Delta s)_1$ ..... $(\Delta s)_6$ на диаграмме фиг. 2. При этом должно иметь место равенство:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta s)_i = 1 - s_{\text{ном}}. \qquad (5)$$

Сопротивление каждой ступени в омах получается из выражения:

$$(\Delta r)_i = \frac{(\Delta r)_i\%}{100} \cdot R_{\text{ном}}, \qquad (6)$$

[1] Для последней ступени $(\Delta r)_6$ реостата: $r_{i+1} = R_2$.

где $R_{ном}$ — номинальное сопротивление цепи ротора определяется согласно выражению:

$$R_{ном} = \frac{E_{ном}}{\sqrt{3}\, I_{ном}}. \qquad (7)^{1}$$

Полное сопротивление роторного реостата $R_{реост}$:

$$R_{реост} = r_1 - R_2 = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta r)_i, \qquad (8)$$

где n — число ступеней реостата.

С целью окончательного выбора отдельных ступеней реостата необходимо определить продолжительность работы каждой ступени, т. е. продолжительность нахождения ее под током, а также величину этого последнего. В свою очередь, для определения продолжительности работы каждой ступени реостата необходимо предварительно определить промежутки времени $(\Delta t)_i$ между ***выключениями*** соответственных смежных ступеней согласно выражению:

$$(\Delta t)_i = \frac{(\Delta\sigma)_i}{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta s)_i} \cdot t_1 = \frac{(\Delta\sigma)_i}{1 - s_{ном}} \cdot t_1, \qquad (9)$$

где значения $(\Delta\sigma)_i$ определяются из диаграммы на фиг. 2 как отрезки, соответствующие скольжениям между двумя смежными вертикальными линиями, пересекающими соответственные характеристики двигателя в пределах колебаний пускового момента вращения; t_1 — период пуска; $s_{ном}$ — номинальное скольжение, определяемое из выражения (2).

При этом должно иметь место равенство: [2]

$$\sum_{i=2}^{i=n} (\Delta t)_i = t_1, \qquad (10)$$

где n — число ступеней реостата.

Переходя к вопросу определения *уставок реле ускорения*, следует отметить, что в отличие от общепринятых методов расчета указанных уставок, при которых является необходимым предварительное определение периода разгона двигателя в зависимости от махового момента системы, в случае *подъемных установок* мы будем исходить из условий *кинематики* подъема, характеризуемой соответственной тахограммой (рис. 1), в которой период пуска t_1 имеет определенную, a priori заданную величину; ввиду этого определение указанных уставок в рассматриваемом случае может быть значительно упрощено; в самом деле, зная определяемые выражением (9) величины $(\Delta t)_i$ промежутков времени между выключениями соответственных смежных ступеней реостата и обозначая собственное время срабатывания контактора через t_k, уставку $(t_p)_i$ соответственного реле ускорения $(РУ)\,i$, получаем из выражения:

$$(t_p)_i = (\Delta t)_i - t_k. \qquad (11)$$

Величину t_k можно принять равной 0,15 сек.

Здесь следует отметить, что уставкой реле для первой ступени $(\Delta r)_1$ задаются в пределах 0,25—1 сек.

Продолжительность работы каждой ступени τ_i определяется из выражения:

$$\tau_i = \tau_{i-1} + (\Delta t)_i, \qquad (12)$$

---

[1] Выражение (7) получается из выражения (3) при скольжении равном 1.

[2] При одной вспомогательной характеристике r_1. При двух вспомогательных характеристиках выражение (10) принимает вид: $\sum_{i=3}^{i=n} (\Delta t)_i = t_1$.

где τ_{i-1} — продолжительность работы ступени, выключение которой предшествует выключению рассматриваемой ступени; $(\Delta t)_i$ — промежуток времени между выключениями данной ступени и предшествующей ей.

Для последней ступени в качестве проверки должно иметь место равенство:

$$\tau_n = t_1 + \tau_1.$$

Для определения эффективной (квадратичной) силы тока $(I_{эф})_i$ для данной ступени реостата можно пользоваться выражением:

$$(I_{эф})_i = \sqrt{(I_p)_i^2 \frac{\tau_i}{T}} = (I_p)_i \sqrt{\frac{\tau_i}{T}}, \qquad (13)$$

где $(I_p)_i$ — величина пускового тока ротора; T — время полного рабочего цикла, включая паузу (см. рис. 1); τ_i определяется из выражения (12).

Величина $\frac{\tau_i}{T}$ в выражении (13) представляет „относительную продолжительность включения" *ПР* для соответственной ступени реостата, выраженную в долях единицы; таким образом, последнее выражение может быть также представлено следующим образом:

$$(I_{эф})_i = (I_p)_i \sqrt{(ПР)_i}. \qquad (14)$$

Что касается величины пускового тока ротора $(I_p)_i$, входящей в выражения (13) и (14), то она может быть определена на основании того соображения, что в пределах значений момента вращения $M = (0{,}5—2)\,M_{ном}$, силу роторного тока можно считать примерно пропорциональной моменту вращения, т. е.

$$(I_p)_i = I_{ном} \cdot \frac{(M_{пуск})^i}{M_{ном}}, \qquad (15)$$

где $I_{ном}$ — номинальная сила тока ротора, даваемая в каталогах; $M_{ном}$ определяется из выражения (1); $(M_{пуск})_i$ — расчетная величина пускового момента, соответствующая различным пусковым сопротивлениям ротора; конечные значения — $M'_{пуск}$ и $M''_{пуск}$ даются, промежуточные же — получаются из диаграммы моментов (фиг. 2) ***измерением***; при статически уравновешенной системе подъема расчетное значение $(M_{пуск})_i = M_{пуск}$ является величиной постоянной.

Зная относительную продолжительность включения *ПР* в процентах для каждой ступени реостата, эффективную силу тока, проходящего через нее, а также ее сопротивление в омах, на основании табл. 1 можно произвести подбор стандарт-

Таблица 1

Технические данные чугунных спиралей сопротивления ХЭМЗ

Номер спирали	Вес спирали, *кг*	Сопротивление спирали, *ом*	Относительная продолжительность включения *ПР*, %					
			2,5	6,0	12,5	20	40	100
			Допустимая нагрузка в амперах [1]					
110	0,77	0,110	214	165	123	99	71	46
80	1,00	0,080	254	196	147	118	85	54
55	0,74	0,055	300	232	173	139	100	64
40	0,90	0,040	355	273	205	164	118	76
28	0,78	0,028	425	327	245	197	142	91
20	1,04	0,020	502	386	289	232	167	107
14	1,00	0,014	600	460	346	277	200	128
10	1,33	0,010	710	545	420	328	237	152
7	1,15	0,007	800	650	490	392	283	181
5	1,54	0,005	800	770	580	465	335	215

[1] При длительности одного включения до 30 секунд.

ных типов спиралей и установить характер их соединения в отдельных ступенях реостата. Следует при этом иметь в виду, что каждая секция состоит из определенного числа спиралей. Последовательное соединение спиралей дает соответственное увеличение сопротивления секции, параллельное же их соединение производит уменьшение указанного сопротивления.

Что касается величины пускового сопротивления r_J, на которую должно быть подключено *токовое* реле, лимитирующее пусковой ток, то для определения ее можно пользоваться выражением:

$$r_J = \frac{V_{\text{отп}}}{I'_p}, \qquad (16)$$

где $V_{\text{отп}}$ — напряжение отпуска токового реле, задается в пределах 25—35 V;[1] I'_p — ток ротора двигателя, при котором реле отпускает свои контакты, может быть принят превышающим на ~ 30—40% величину нормального пускового тока ротора $(I_p)_H$.

Пример. Рассчитать пусковые сопротивления и уставки реле ускорения для асинхронного подъемного двигателя при наличии следующих данных.

Двигатель завода „Электросила" типа АМ 157-8. Номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 380$ kW; номинальное напряжение, подводимое к статору, — 6000 V; синхронное число оборотов в минуту $n_c = 750$; номинальное число оборотов в минуту $n_{\text{ном}} = 735$. К. п. д. двигателя $\eta\% = 91{,}5\%$. Отношение моментов вращения $\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}} = 2{,}3$. Номинальное напряжение ротора $E_{\text{ном}} = 527$ V; номинальный ток ротора $I_{\text{ном}} = 445$ A.

Система подъема — *неуравновешенная.*

Период пуска $t_1 = 12$ сек.; продолжительность полного рабочего цикла $T = 68$ сек.

Расчетное значение *пускового* момента вращения: в начале периода пуска — $M'_{\text{пуск}} = 840$ *кг-м*, в конце периода пуска — $M''_{\text{пуск}} = 780$ *кг-м*. Статический момент сопротивления: в начале периода пуска — $M'_{\text{ст}} = 540$ *кг-м*, в конце периода пуска — $M''_{\text{ст}} = 480$ *кг-м* (рис. 2).

Количество ступеней (секций) реостата, включая начальную ступень, при которой осуществляется ревизия каната, принимаем равным *шести.*[2]

Задаемся диапазоном колебаний пускового момента вращения в размере $\sim 30\%$ от его расчетного значения. Тогда предельные верхние значения указанного момента определяются линией *mn*, параллельной линии *uy*, характеризующей значения расчетного пускового момента; начальной точке *m* линии *mn* соответствует момент: $M'_{\text{пуск}}(1+0{,}3) = 840 \cdot 1{,}3 = 1090$ *кг-м*; разность между значениями моментов, определяемыми точками *m* и *u*, составляет: $1090 - 840 = 250$ *кг-м*. Такая же разность должна иметь место между значениями моментов, соответствующими точкам *n* и *y*, в результате чего момент, определяемый точкой *n*, получается равным: $M'_{\text{пуск}} + 250 = 780 + 250 = 1030$ *кг-м*. Предельные нижние значения пускового момента вращения определяются линией *pq*, расположенной под линией *uy* на

[1] Согласно новейшим данным ХЭМЗ'а напряжение $V_{\text{отп}}$ принимается равным порядка 10 V.

[2] Для данной подъемной установки, для которой согласно произведенным подсчетам эффективная мощность двигателя составляет 322 kW, казалось бы более подходящим является двигатель типа АМ 1512-16 мощностью 330 kW, с отношением $\frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{ном}}} = 2{,}1$ и с номинальным числом оборотов 365 в минуту, дающем возможность применения одиночной зубчатой передачи. Однако произведенные предварительные расчеты показали, что в этом случае пришлось бы применить не шесть ступеней пускового реостата, согласно заданию, а девять ступеней, ввиду имеющего при этом место сравнительно небольшого значения опрокидного момента, обусловливающего необходимость применения соответственно небольшого диапазона колебаний пускового момента. Последнее обстоятельство подтверждает высказанное нами выше (стр. 42) положение, согласно которому при заданном количестве ступеней реостата не всякий двигатель определенной мощности может быть применен для обслуживания данной подъемной установки.

таком же от нее расстоянии, на каком от этой последней отстоит линия mn; в данном случае точке p соответствует момент:

$$M'_{\text{пуск}}(1-0{,}3)=840\cdot 0{,}7=590\ \textit{кг-м};$$

точке n соответствует момент:

$$M''_{\text{пуск}}-250=780-250=530\ \textit{кг-м}.$$

Номинальный момент вращения, согласно выражению (1):

$$M_{\text{ном}}=\frac{380}{735}\cdot 975=504\ \textit{кг-м}.\ ^{1}$$

Номинальное скольжение, определяемое выражением (2):

$$s_{\text{ном}}=\frac{750-735}{750}=0{,}02.$$

На основании последних данных на фиг. 2 построена естественная характеристика Oab по указанному выше способу.

Равным образом построены искусственные характеристики Od, Oe, Of, Og и Om. Что касается характеристики $OA(r_1)$, то в данном случае она получена на основании предположения, что момент вращения, развиваемый двигателем при его работе на указанной характеристике со скольжением $s=1$, равен номинальному моменту $M_{\text{ном}}=504$ *кг-м*, который оказался меньше начального значения статического момента сопротивления $M'_{\text{ст}}=540$ *кг-м*.

Собственное сопротивление обмотки ротора, согласно выражению (3):

$$R_2=\frac{0{,}02\cdot 527}{1{,}73\cdot 445}=0{,}014\ \Omega.$$

Номинальное сопротивление цепи ротора, согласно выражению (7):

$$R_{\text{ном}}=\frac{527}{1{,}73\cdot 445}=0{,}684\ \Omega.$$

Измеряя на диаграмме фиг. 2 отрезки скольжения $(\Delta s)_i$ и принимая во внимание выражение (4) для определения процентов сопротивлений $(\Delta r)_i$ отдельных ступеней реостата, получаем:

$$\begin{array}{ll}
(\Delta s)_1=0{,}53; & (\Delta r)_1\%=(r_1-r_2)\%=(\Delta s)_1\%=53\%\\
(\Delta s)_2=0{,}21; & (\Delta r)_2\%=(r_3-r_2)\%=(\Delta s)_2\%=21\%\\
(\Delta s)_3=0{,}115; & (\Delta r)_3\%=(r_4-r_3)\%=(\Delta s)_3\%=11{,}5\%\\
(\Delta s)_4=0{,}065; & (\Delta r)_4\%=(r_5-r_4)\%=(\Delta s)_4\%=6{,}5\%\\
(\Delta s)_5=0{,}04; & (\Delta r)_5\%=(r_6-r_5)\%=(\Delta s)_5\%=4\%\\
(\Delta s)_6\cong 0{,}02; & (\Delta r)_6\%=(R_2-r_6)\%=(\Delta s)_6\%\cong 2\%.
\end{array}$$

Согласно выражению (5) в качестве проверки получаем:

$$\sum_{i=1}^{i=6}(\Delta s)_i=0{,}53+0{,}21+0{,}115+0{,}065+0{,}04+0{,}02=0{,}98=1-s_{\text{ном}}=1-0{,}02.$$

---

[1] Для данного двигателя $M_{\text{макс}}=2{,}3\,M_{\text{ном}}=2{,}3\cdot 504\cong 1160$ *кг-м*. Среднее значение верхних предельных величин пускового момента:

$$\frac{M'_{\text{пуск}}+M''_{\text{пуск}}}{2}=\frac{1090+1030}{2}=1060\ \textit{кг-м};$$

последнее значение оказывается меньше максимального момента $M_{\text{макс}}=1160$ *кг-м* на $\frac{1160-1060}{1160}\cdot 100\%\cong 9\%$.

Сопротивление $(\Delta r)_i$ каждой ступени в омах, согласно выражению (6):

$$(\Delta r)_1 = \frac{53}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}362\,\Omega$$

$$(\Delta r)_2 = \frac{21}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}144\,\Omega$$

$$(\Delta r)_3 = \frac{11{,}5}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}079\,\Omega$$

$$(\Delta r)_4 = \frac{6{,}5}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}044\,\Omega$$

$$(\Delta r)_5 = \frac{4}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}027\,\Omega$$

$$(\Delta r)_6 = \frac{2}{100} \cdot 0{,}684 = 0{,}014\,\Omega.$$

Полное сопротивление реостата $R_{\text{реост}}$ согласно выражению (8):

$$R_{\text{реост}} = 0{,}362 + 0{,}144 + 0{,}079 + 0{,}044 + 0{,}027 + 0{,}014 = 0{,}67\,\Omega.$$

Из диаграммы на рис. 2 определяем ***измерением*** значения отрезков скольжения $(\Delta\sigma)_i$:

$$(\Delta\sigma)_2 = 0{,}45; \quad (\Delta\sigma)_3 = 0{,}25; \quad (\Delta\sigma)_4 = 0{,}135; \quad (\Delta\sigma)_5 = 0{,}075; \quad (\Delta\sigma)_6 = 0{,}045.$$

Для первой ступени реостата, предназначенной для ревизии каната, задаемся продолжительностью ее включения при нормальном пуске:

$$(\Delta t)_1 = \tau_1 = 0{,}75 \ \textit{сек}.$$

Согласно выражению (9) определяем промежутки времени $(\Delta t)_i$ между выключениями смежных ступеней реостата.

$$(\Delta t)_2 = \frac{(\Delta\sigma)_2}{1 - s_{\text{ном}}} \cdot t_1 = \frac{0{,}45}{0{,}98} \cdot 12 = 5{,}51 \ \textit{сек},$$

$$(\Delta t)_3 = \frac{(\Delta\sigma)_3}{1 - s_{\text{ном}}} \cdot t_1 = \frac{0{,}25}{0{,}98} \cdot 12 = 3{,}06 \ \textit{сек},$$

$$(\Delta t)_4 = \frac{(\Delta\sigma)_4}{1 - s_{\text{ном}}} \cdot t_1 = \frac{0{,}135}{0{,}98} \cdot 12 = 1{,}65 \ \textit{сек},$$

$$(\Delta t)_5 = \frac{(\Delta\sigma)_5}{1 - s_{\text{ном}}} \cdot t_1 = \frac{0{,}075}{0{,}98} \cdot 12 = 0{,}92 \ \textit{сек},$$

$$(\Delta t)_6 = \frac{(\Delta\sigma)_6}{1 - s_{\text{ном}}} \cdot t_1 = \frac{0{,}045}{0{,}98} \cdot 12 = 0{,}55 \ \textit{сек}.$$

Согласно выражению (10), в качестве проверки получаем:

$$\sum_{i=2}^{i=6} (\Delta t)_i = 5{,}51 + 3{,}06 + 1{,}65 + 0{,}92 + 0{,}55 = 11{,}7\ ^{1} \cong 12 \ \textit{сек} \cong t_1.$$

---

[1] Получение значения $\sum_{i=2}^{i=6} (\Delta t)_i$ несколько меньшего по сравнению с периодом t_1 объясняется в данном случае тем обстоятельством, что окончание периода пуска обусловлено не только полным выключением реостата и переходом двигателя на естественную характеристику R_2, но и продолжающимся затем некоторым увеличением скорости в продолжение времени, в течение которого будет достигнуто равенство моментов вращения и статического сопротивления.

Уставки $(t_p)_i$ соответственных реле ускорения $(РУ)i$ можем получить, пользуясь выражением (11):

для реле $РУ1$

$$(t_p)_1 = 0{,}75 - 0{,}15 = 0{,}60 \text{ сек},$$

для реле $РУ2$

$$(t_p)_2 = 5{,}51 - 0{,}15 = 5{,}36 \text{ сек} \cong 5{,}4 \text{ сек},$$

для реле $РУ3$

$$(t_p)_3 = 3{,}06 - 0{,}15 = 2{,}91 \text{ сек} \cong 3 \text{ сек},$$

для реле $РУ4$

$$(t_p)_4 = 1{,}65 - 0{,}15 = 1{,}5 \text{ сек},$$

для реле $РУ5$

$$(t_p)_5 = 0{,}92 - 0{,}15 = 0{,}77 \text{ сек} \cong 0{,}8 \text{ сек},$$

для реле $РУ6$

$$(t_p)_6 = 0{,}55 - 0{,}15 = 0{,}4 \text{ сек}.$$

Продолжительность работы (включения) каждой ступени реостата, за исключением первой, получаем согласно выражению (12):
для второй ступени

$$\tau_2 = \tau_1 + (\Delta t)_2 = 0{,}75 + 5{,}51 = 6{,}26 \text{ сек},$$

для третьей ступени

$$\tau_3 = \tau_2 + (\Delta t)_3 = 6{,}26 + 3{,}06 = 9{,}32 \text{ сек},$$

для четвертой ступени

$$\tau_4 = \tau_3 + (\Delta t)_4 = 9{,}32 + 1{,}65 = 10{,}97 \text{ сек},$$

для пятой ступени

$$\tau_5 = \tau_4 + (\Delta t)_5 = 10{,}97 + 0{,}92 = 11{,}89 \text{ сек},$$

для шестой ступени

$$\tau_6 = \tau_5 + (\Delta t)_6 = 11{,}89 + 0{,}55 = 12{,}44 \text{ сек} \cong$$
$$\cong t_1 + \tau_1 = 12 + 0{,}75 = 12{,}75 \text{ сек}.$$

Значения „относительной продолжительности включения“ $ПР = \frac{\tau_i}{T}$ для каждой ступени реостата в рассматриваемом случае представляются следующим образом:
для первой ступени — при нормальном пуске

$$(ПР)_1 = \frac{\tau_1}{T} = \frac{0{,}75}{68} = 0{,}011;\ (ПР)_1\% = 1{,}1\%;$$

при ревизии каната принимается $(ПР)_1\% = 100\%$, каковое значение является исходным при выборе первой ступени;
для второй ступени

$$(ПР)_2 = \frac{\tau_2}{T} = \frac{6{,}26}{68} = 0{,}092;\ (ПР)_2\% = 9{,}2\%;$$

для третьей ступени

$$(ПР)_3 = \frac{\tau_3}{T} = \frac{9{,}32}{68} = 0{,}137;\ (ПР)_3\% = 13{,}7\%;$$

для четвертой ступени

$$(ПР)_4 = \frac{\tau_4}{T} = \frac{10{,}97}{68} = 0{,}161;\ (ПР)_4\% = 16{,}1\%;$$

для пятой ступени

$$(ПР)_5 = \frac{\tau_5}{T} = \frac{11{,}89}{68} = 0{,}175;\ (ПР)_5\% = 17{,}5\%;$$

для шестой ступени

$$(ПР)_6 = \frac{\tau_6}{T} = \frac{12{,}44}{68} = 0{,}18;\ (ПР)_6\% = 18\%.$$

Зная относительную продолжительность включения для каждой ступени реостата, согласно выражению (14) можем определить величину эффективной силы

тока, проходящего через соответственные ступени; с указанной целью необходимо предварительно определить входящее в выражение (15) отношение $\frac{(M_{\text{пуск}})_i}{M_{\text{ном}}}$ для каждой ступени реостата. В применении к диаграмме на рис. 2 имеем:
для первой ступени

$$(M_{\text{пуск}})_1 = M_A = M_{\text{ном}} = 504 \ кг\text{-}м$$

следовательно,

$$\frac{(M_{\text{пуск}})_1}{M_{\text{ном}}} = \frac{540}{540} = 1;$$

для второй ступени

$$(M_{\text{пуск}})_2 = M'_{\text{пуск}} = 840 \ кг\text{-}м; \quad \frac{(M_{\text{пуск}})_2}{M_{\text{ном}}} = \frac{840}{504} = 1{,}67;$$

для третьей ступени

$$(M_{\text{пуск}})_3 = M_\beta = 815 \ кг\text{-}м; \quad \frac{(M_{\text{пуск}})_3}{M_{\text{ном}}} = \frac{815}{504} = 1{,}62;$$

для четвертой ступени

$$(M_{\text{пуск}})_4 = M_\delta = 800 \ кг\text{-}м; \quad \frac{(M_{\text{пуск}})_4}{M_{\text{ном}}} = \frac{800}{504} = 1{,}59;$$

для пятой ступени

$$(M_{\text{пуск}})_5 = M_\eta = 795 \ кг\text{-}м: \quad \frac{(M_{\text{пуск}})_5}{M_{\text{ном}}} = \frac{795}{504} = 1{,}58;$$

для шестой ступени

$$(M_{\text{пуск}})_6 = M_\lambda = 790 \ кг\text{-}м; \quad \frac{(M_{\text{пуск}})_6}{M_{\text{ном}}} = \frac{790}{504} = 1{,}57;$$

при выключении всего реостата

$$M_\mu = 787; \quad \frac{M_\mu}{M_{\text{ном}}} = \frac{787}{504} = 1{,}56.$$

Согласно выражению (15) получаем значения силы роторного тока:
для первой ступени

$$(I_p)_1 = 445 \cdot 1 = 445 \ \text{А};$$

для второй ступени

$$(I_p)_2 = 445 \cdot 1{,}67 = 743 \ \text{А};$$

для третьей ступени

$$(I_p)_3 = 445 \cdot 1{,}62 = 721 \ \text{А};$$

для четвертой ступени

$$(I_p)_4 = 445 \cdot 1{,}59 = 707 \ \text{А};$$

для пятой ступени

$$(I_p)_5 = 445 \cdot 1{,}58 = 703 \ \text{А};$$

для шестой ступени

$$(I_p)_6 = 445 \cdot 1{,}57 = 699 \ \text{А};$$

при выключенном реостате

$$I_{R_2} = 445 \cdot 1{,}56 = 694 \ \text{А}.$$

Согласно выражению (14) получаем эффективную (эквивалентную) силу тока для соответственных ступеней реостата:
для первой ступени

$$(I_{\text{эф}})_1 = (I_p)_1 \sqrt{(ПР)_1} = 445 \sqrt{0{,}011} \cong 45 \ \text{А};$$

для второй ступени

$$(I_{\text{эф}})_2 = (I_p)_2 \sqrt{(ПР)_2} = 743 \sqrt{0{,}092} = 223 \ \text{А};$$

для третьей ступени

$$(I_{\text{эф}})_3 = I_{(p)_3} \sqrt{(ПР)_3} = 721 \sqrt{0{,}137} = 267 \ \text{А};$$

для четвертой ступени

$$(I_{эф})_4 = (I_р)_4 \sqrt{(ПР)_4} = 707 \sqrt{0{,}161} = 283 \text{ А};$$

для пятой ступени

$$(I_{эф})_5 = (I_р)_5 \sqrt{(ПР)_5} = 703 \sqrt{0{,}175} = 295 \text{ А};$$

для шестой ступени

$$(I_{эф})_6 = (I_р)_6 \sqrt{(ПР)_6} = 699 \sqrt{0{,}18} = 296 \text{ А};$$

Пользуясь данными табл. 1, производим выбор стандартных спиралей для пускового реостата. Расчетные данные и результаты, полученные выбором, для наглядности сведены в табл. 2. Схема соединения отдельных спиралей в секциях реостата представлена на рис. 3, где цифры над изображениями сопротивлений указывают на количество спиралей, включенных между двумя соседними башмаками, служащими для ответвлений к соответственным контакторам.

Таблица 2

Ступень реостата	Сопротивление ступени в омах		Номер спирали	Количество спиралей в ступени, соединенных		Ток в амперах		Относительная продолжительность включения ПР	
	Расчетное	Выбранное		последовательно	параллельно	Расчетный эффективный	Допускаемый	Расчетная	Принятая
$(\Delta r)_1 = r_1 - r_2$	0,362	$0{,}110 \times 3 = 0{,}330$	110	3	—	45	46	100%	100%
$(\Delta r)_2 = r_3 - r_2$	0,144	$0{,}028 \times 5 = 0{,}140$	28	5	—	223	245	9,2%	12,5%
$(\Delta r)_3 = r_4 - r_3$	0,079	$0{,}020 \times 4 = 0{,}080$	20	4	—	267	289	13,7%	12,5%
$(\Delta r)_4 = r_5 - r_4$	0,044	$0{,}014 \times 3 = 0{,}042$	14	3	—	283	277	16,1%	20%
$(\Delta r)_5 = r_6 - r_5$	0,027	$0{,}010 \times 3 = 0{,}030$	10	3	—	295	328	17,5%	20%
$(\Delta r)_6 = R_2 - r_6$	0,014	$1{,}010 + \frac{0{,}010}{2} = 0{,}015$	10	1	2	296	328	18%	20%
$R_{реост} = \sum_{i=1}^{i=6} (\Delta r)_i$	0,670	0,637	—	—	—	—	—	—	—

В заключение определим величину пускового сопротивления r_J, на которое должно быть подключено токовое реле; согласно выражению (16) получаем:

$$r_J = \frac{V_{отп}}{1{,}3\,(I_р)_H} = \frac{35}{1{,}3 \cdot 700} = 0{,}038\ \Omega,$$

где нормальный пусковой ток ротора $(I_p)_H \cong 700$ А принят, как некоторое среднее значение величин $(I_p)_i$. Согласно схеме на рис. 3 подключение токового реле произведено на сопротивление $r_J = 0{,}035\,\Omega$, обусловленное всей ступенью $(\Delta r)_6$ и соответственной частью ступени $(\Delta r)_5$.

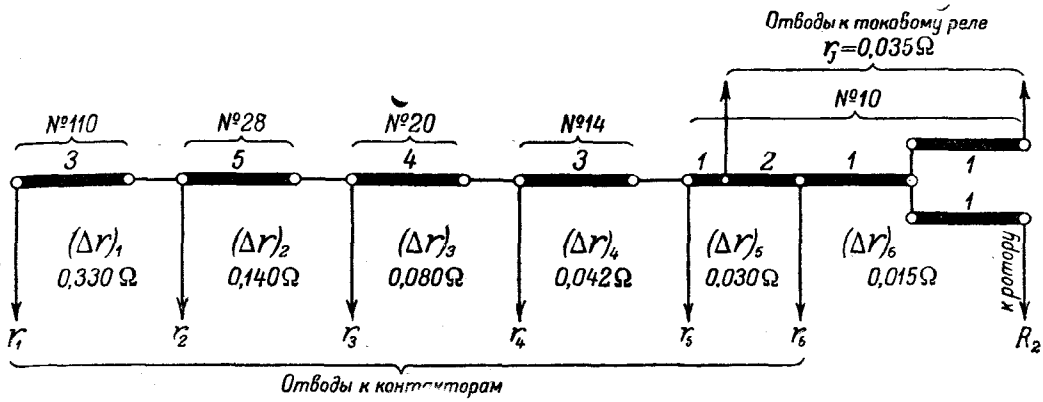


Рис. 3. Схема соединения пусковых сопротивлений, составленных из стандартных спиралей ХЭМЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Максимов. Основы электрического привода. Горная электротехника, ч. 1, 1939.
2. С. Н. Вещеневский. Расчет сопротивлений для электродвигателей. 1938.
3. Г. П. Хализев. Пуско-регулирующая аппаратура. 1937.
4. А. И. Россошанский. Асинхронный привод шахтной подъемной машины. Вестник ХЭМЗ, № 4 (23), 1939.

Zusammenfassung

Als Ausgangsangaben für die Berechnung der Anlasswiderstände sind folgende Grössen zu haben.

1. Leistung und Art des Fördermotoren; für letzteren wird man von den Katalogen folgendes haben:

a) Verhältnis des Kippmomentes (max.) und nominalen Momentes; b) nominale Rotorspannung, c) nominaler Rotorstrom, d) Wirkungsgrad des Motors, e) synchrone und nominale Zahl der Umdrehungen des Motors:

2. Berechnungswerte von Anlassdrehmomente;

3. Die Werte von statischen Widerstandsmomente welche der Anlassperiode entsprechen;

4. Stufenzahl von Rotorwiderstandschalter;

5. Anlassperiode t_1 und die ganze Periode des Arbeitszykles T, welche die Pause θ enthält, entsprechend dem gegebenen Geschwindigkeitsdiagramme (Fig. 1).

Als Grund für die Berechnung der Anlasswiderstände sind die mechanische Charakteristiken von Motors, die im Voraus konstruirt werden müssen, zu halten (Fig. 2). Dabei muss eine sehr wertige Bedingung bemerkt werden, dass nicht jedes Motor der bestimmten Leistung den erforderlichen Anlassbedingungen bei der a priori gegebenen Stufenzahl von Anla swiderstandsschaltung entsprechen werden kann, weil nicht bei jeder Grösse des Kippmomentes des Motors das erforderliche Schwankungsdiapason von Anlassdrehungsmoment beibehalten werden kann.

Für die endgültige Bestimmung der einzelnen Widerstandsschalterstufen ist vorläufig eine erforderliche Arbeitszeitdauer jeder Stufe zu bestimmen, d. h. die Zeitdauer des Unterstrombefindens einer Stufe, gleichfalls die Grösse dieses Stromes. Was aber die Aufstellung von Anlassbeschleunigungsrelais anbetrifft, so ist diese nach der folgenden Formel zu ermitteln:

$$(t_p)_i = (\Delta t)_i - t_k$$

wo $(t_p)_i$ — Aufstellung des entsprechenden Relais in Sekunden, $(\Delta t)_i$ — Zeitdauer zwischen Ausschaltungen der gegebenen und vorangehenden Stufen des Widerstandsschalters, t_k — eigene Zeitdauer des Aufarbeiten des Schützes.

Zum Schluss wurde ein Zahlenbeispiel der Bestimmung von Anlasswiderständen und Aufstellungen von Beschleunigungsrelais für das a synchrone Fördermotor- angegeben.