П-1025 46

# Записки ЛГИ

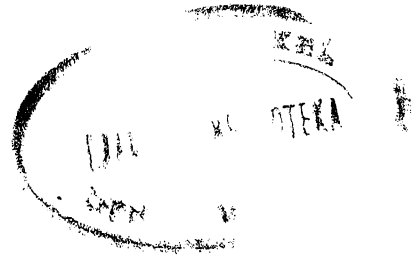
Т XXI

1948

*Записки Ленинградского ордена Ленина Горного Института, т XXI, 1948*

Проф. Ф. Н. ШКЛЯРСКИЙ

# ФИЗИКО - МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА



Ленинград
1948

Ответственный редактор Д. С. Емельянов

Подписано к печати 24.7.47. Авторских листов 24,0. Количество печатн. знаков 916370
Сдано в производство 25.7.46. М02411. Тираж 1000. Зак. 1361

Типо-литография ЛКВВИА

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий труд посвящен анализу физико-механических свойств электрического рудничного подъема.

В части, касающейся исполнительного механизма, рассмотрены машины с постоянным радиусом навивки, как получившие в СССР преимущественное распространение. Наряду с кинематикой и динамикой подъема с обыкновенными клетями, значительное внимание уделено подъему с опрокидными сосудами и скипами с донной разгрузкой. Необходимо при этом отметить, что при рассмотрении различных режимов подъема, в отдельных случаях, вместо соответственных ссылок, произведено повторение некоторых формул, служащих для определения усилий и мощностей в аналогичных условиях, с соблюдением, однако, идентичности нумерации указанных формул. Подобная система изложения дает возможность более удобного производства расчетов для соответственных режимов подъема, не прибегая к отысканию необходимых выражений в различных местах книги.

Особый раздел книги посвящен рассмотрению кинематики и динамики *спуска* при трехпериодных тахограммах, осуществляемых при работе обыкновенными клетями.

В отношении привода и управления подъемной машиной произведено исследование физики процессов, происходящих при различных режимах подъема как простых, так и наиболее сложных, на основе согласования кинематики и динамики подъема с механическими характеристиками подъемных двигателей обеих систем, т. е. асинхронных и в приводе Леонарда.

Расчетная сторона, иллюстрированная численными примерами, относится к определению: элементов кинематики и динамики подъема, расхода энергии на производство подъема, к. п. д. подъемных установок, пусковых роторных сопротивлений асинхронных подъемных двигателей и уставок реле ускорения при автоматизации периода пуска, мощности подъемных двигателей, а также мощности отдельных машин, составляющих преобразовательный агрегат в системе Леонарда.

В заключение следует отметить, что вопросы, рассмотренные в предлагаемом труде, являющемся результатом многолетних исследований автора в области электрического рудничного подъема, изложены преимущественно в собственной оригинальной трактовке.

*Ф. Шклярский.*

Июнь 1943 г.

*Часть первая*

# Динамика рудничного подъема с постоянным радиусом навивки

*Раздел первый*

## ДИНАМИКА ПОДЪЕМА

### I. ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

На фиг. 1 представлена упрощенная схема рудничного подъема * со следующими обозначениями: $K$—движущий шкив (барабан); $H$—полная высота подъема между приемными площадками: $A$—$A$—верхней и $B$—$B$—нижней; $x$—путь, пройденный каждою клетью (подъемным сосудом) к концу рассматриваемого промежутка времени, считая от начала подъема; $Q$—полезный за раз поднимаемый груз; $Q'$—мертвый груз каждой клети.

Обозначим, далее, через $q$—погонный вес (вес погонного метра) хвостового каната, через $p$—погонный вес головного каната; тогда разность указанных погонных весов $\delta = q - p$.

Если примем, что соответственные ветви (левая и правая) канатов—головного над приемной площадкой $A$—$A$ и хвостового под площадкой $B$—$B$—взаимно уравновешиваются, то получим следующие значения действующих в системе усилий:

статическое усилие (натяжение) $f_1$ со стороны груженой(правой клети)

$$f_1 = Q + Q' + p(H - x) + qx;$$

статическое усилие $f_2$ со стороны порожней (левой) клети

$$f_2 = Q' + q(H - x) + px.$$

Разность $f'$ между действующими в противоположных направлениях статическими усилиями со стороны груженой и порожней клетей получится путем вычитания нижнего выражения из верхнего:

$$f' = f_1 - f_2 = Q - (q - p)(H - 2x),$$

или

$$f' = Q - \delta(H - 2x).$$

В последнем выражении не приняты во внимание вредные сопротивления, обусловленные жесткостью каната, трением в подшипниках, трением лап клети о направляющие в стволе шахты, а также сопротивление воздуха при движении клетей; указанные сопротивления обычно учитываются введением коэфициента $k > 1$, на который множится величина полез-

* Аналогия с системой Lahmeyer.

ного груза $Q$. Если произвести указанное действие, то получим полную величину статического усилия $F_s$ из выражения:

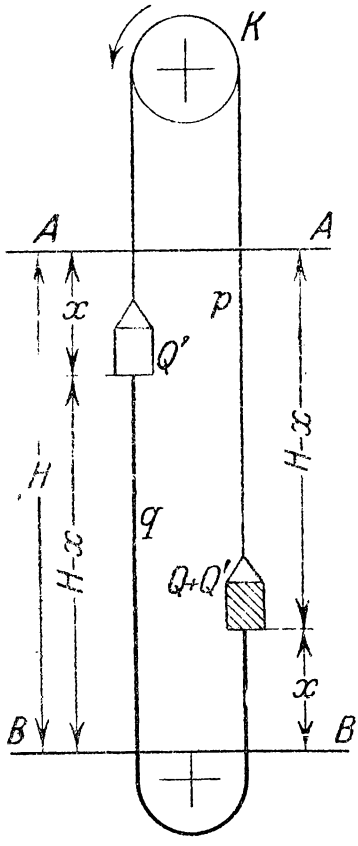
$$F_s = kQ - \delta(H - 2x).$$

Так как в периоды неустановившегося движения действует также соответственное динамическое усилие $F_d$, то для получения полного усилия $F$, развиваемого двигателем, необходимо к полученному выше статическому усилию $F_s$ прибавить динамическое усилие $F_d = ma$, где $m$—масса всех движущихся частей подъемного устройства, приведенная к окружности барабана, $a$—ускорение (положительное или отрицательное). Тогда окончательно получаем:

$$F = F_s + F_d,$$

или

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + ma. \qquad (1)$$




Фи Упрощенная схема руднич- ного подъема.

Так как ускорение $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$, где $v$—окружная скорость барабана, равная скорости движения клетей, а $x$—путь, пройденный каждой клетью к концу времени $t$ от начала подъема, то уравнение (1) может быть представлено также в виде следующих выражений:

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + m\frac{dv}{dt} \qquad (1a)$$

$$F = kQ - \delta(H - 2x) + m\frac{d^2x}{dt^2} \qquad (1b)$$

Выражения (1a) и (1b) представляют общее уравнение динамического равновесия подъемной машины с постоянным радиусом навивки.

## II. УРАВНОВЕШЕННАЯ СИСТЕМА С РАВНОВЕСНЫМИ КАНАТАМИ

### 1. Трехпериодная тахограмма

Для рассматриваемой системы $q = p$, следовательно $\delta = q - p = 0$.

Тогда уравнение (1a) принимает вид:

$$F = kQ + m\frac{dv}{dt}. \qquad (2)$$

а) Для периода *пуска* при постоянной силе двигателя $F_1 > kQ$ из

* Уравнения (1a) и (1b) предложены акад. М. М. Федоровым, который дал их точный вывод в своей диссертации „Теория и расчет гармонического рудничного подъема", 1914. Выше приведен схематический вывод этих уравнений. Мы сочли рациональным для наших целей воспользоваться в дальнейшем аналитическим исследованием динамического уравнения равновесия подъемной машины, как дающего непосредственную зависимость величины и характера изменения движущего усилия, развиваемого подъемным двигателем, от изменения остальных параметров подъема, при различных его системах.

выражения (2) получаем ускорение:

$$a_1 = \frac{dv}{dt} = \frac{F_1 - kQ}{m} = \text{const.} \tag{3}$$

Решая последнее уравнение относительно $v$ получаем:

$$v = \frac{F_1 - kQ}{m} t + C.$$

Произвольная постоянная $C$ определяется из условия, что в начале подъема, при $t = 0$, $v = 0$; следовательно, $C = 0$.

Таким образом, имеем:

$$v = \frac{F_1 - kQ}{m} t = a_1 t. \tag{4}$$

Наибольшего значения $V$ скорость достигает в конце периода $t_1$:

$$V = \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = a_1 t_1. \tag{4a}$$

Выражение (4) показывает, что при постоянной силе $F_1$, развиваемой двигателем в период пуска $t_1$, скорость движения подъемных сосудов изменяется по закону прямой линии, проходящей через начало координат.

Мощность $P$ двигателя, отнесенная к валу барабана, в период пуска $t_1$ определяется из выражения:

$$P = F_1 \quad v,$$

или

$$P = F_1 \quad \frac{F_1 - kQ}{m} \quad t = F_1 \quad a_1 t. \tag{5}$$

Согласно последнему выражению мощность $P$ изменяется по закону прямой линии, проходящей через начало координат, достигая при $t = t_1$ наибольшего своего значения:

$$P_1 = F_1 \quad \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = F_1 \quad V. \tag{5a}$$

Мощность $P_s$, затрачиваемая в период пуска на преодоление статических сопротивлений, обусловленных действием полезного груза и вредных сопротивлений, определяется из выражения:

$$P_s = kQ \quad v,$$

или

$$P_s = kQ \quad \frac{F_1 - kQ}{m} t = kQ \cdot a_1 t. \tag{6}$$

Выражение (6) представляет уравнение прямой линии, ординаты которой меньше соответственных ординат прямой, определяемой уравнением (5), так как $kQ < F_1$. При $t = t_1$ получается наибольшее значение $P_{s2}$ указанной мощности:

$$P_{s2} = kQ \cdot \frac{F_1 - kQ}{m} t_1 = kQ \quad a_1 t_1. \tag{6a}$$

b) Для периода *равномерного хода* $t_2$ скорость $v = V = \text{const}$; следовательно, ускорение $\frac{dv}{dt} = 0$.

Тогда выражение (2) принимает вид:

$$F_2 = kQ = \text{const}, \tag{7}$$

где $F_2$—постоянная сила, развиваемая двигателем в течение рассматриваемого периода.

Мощность двигателя, отнесенная к валу барабана и равная мощности, идущей на преодоление статических сопротивлений:

$$P_2 = P_{s2} = F_2 \quad V. \tag{8}$$

c) В период *замедления* предположим действие *постоянного* движущего *усилия* $F_3 < kQ$ (моторное замедление).

Уравнение (2) в рассматриваемом случае принимает вид:

$$F_3 = kQ + m\frac{dv}{dt} \tag{9}$$

Из последнего выражения получаем величину замедления:

$$a_{m3} = \frac{dv}{dt} = -\frac{kQ - F_3}{m} = \text{const}. \tag{10}$$

Выражение (10) показывает, что замедление $a_{m3}$ представляет постоянную отрицательную величину.

Решая уравнение (9) относительно $v$ получаем:

$$v = \frac{F_3 - kQ}{m} t + C.$$

Предположим условно, что в период замедления движение направлено от конца периода $t_3$ к его началу, т. е. от $t = 0$ до $t = -t_3$. Тогда входящая в последнее выражение произвольная постоянная $C$ определяется из условия, что в конце действительного движения, т. е. при $t = 0$, $v = 0$; следовательно, $C = 0$.

Таким образом, окончательно получаем:

$$v = \frac{F_3 - kQ}{m} \quad t = -\frac{kQ - F_3}{m} t = a_{m3} \cdot t. \tag{11}$$

Согласно последнему выражению скорость в период замедления при постоянной движущей силе $F_3 < kQ$ изменяется по закону прямой линии, причем получаемые на основании указанного выражения значения этой скорости положительны, так как времена $t$ для периода $t_3$, согласно принятому выше предположению, отрицательны. Скорость $v$ получает наибольшее значение $V$ в начале периода замедления, т. е. при $t = -t_3$:

$$V = \frac{kQ - F_3}{m} t_3 = -a_{m3} t_3. \tag{11a}$$

Очевидно, значения максимальной скорости $V$, определяемые выражениями (4a) и (11a), должны быть равны между собою.

Мощность двигателя, отнесенная к валу барабана, в период замедления изменяется по прямой, определяемой выражением:

$$P = F_3 \quad v,$$

$$P = -F_3 \cdot \frac{kQ - F_3}{m} t = -F_3 \; a_{m3} t. \qquad (12)$$

При $t=0$, $P=0$. При $t=-t_3$ мощность $P$ достигает наибольшего своего значения $P_3$ в рассматриваемый период:

$$P_3 = F_3 \; \frac{kQ - F_3}{m} t_3 =$$

$$= F_3 \cdot V \qquad (12a)$$

Мощность $P_s$, затрачиваемая в период замедления на преодоление статических сопротивлений, определяется из выражения:

$$P_s = kQ \cdot v,$$

или

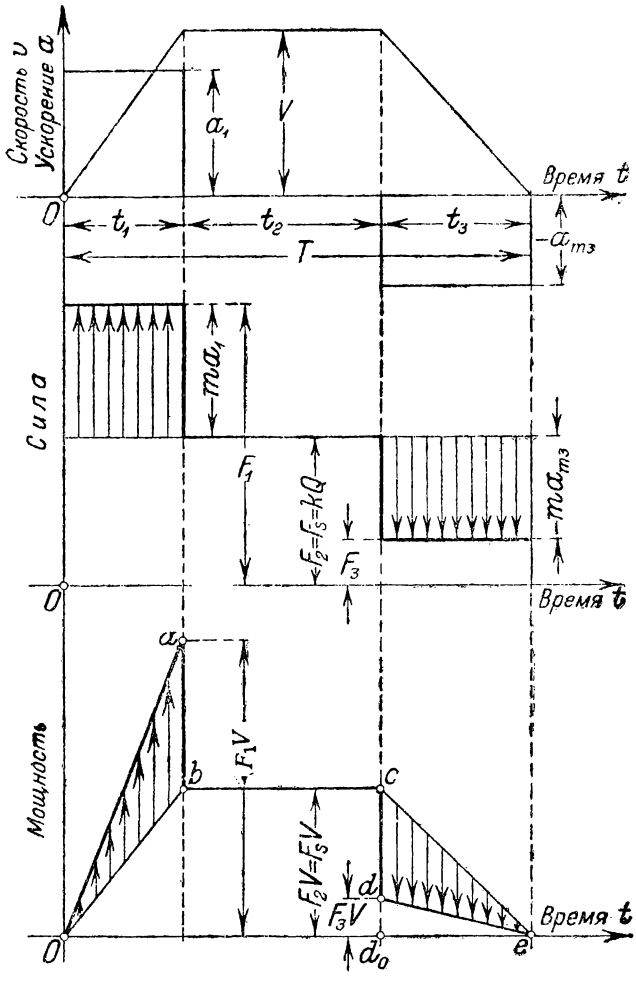
$$P_s = -kQ \cdot \frac{kQ - F_3}{m} t =$$

$$= kQ \cdot a_{m3} t. \qquad (13)$$

Согласно последнему выражению положительная мощность $P_s$ изменяется по прямой линии от значения $P_s = 0$ при $t=0$ до наибольшего значения $P_{s2}$ при $t=-t_3$, причем мощность $P_{s2}$ определяется из выражения:

$$P_{s2} = kQ \cdot \frac{kQ - F_3}{m} t_3 =$$

$$= -kQ \cdot a_{m3} t_3. \qquad (13a)$$



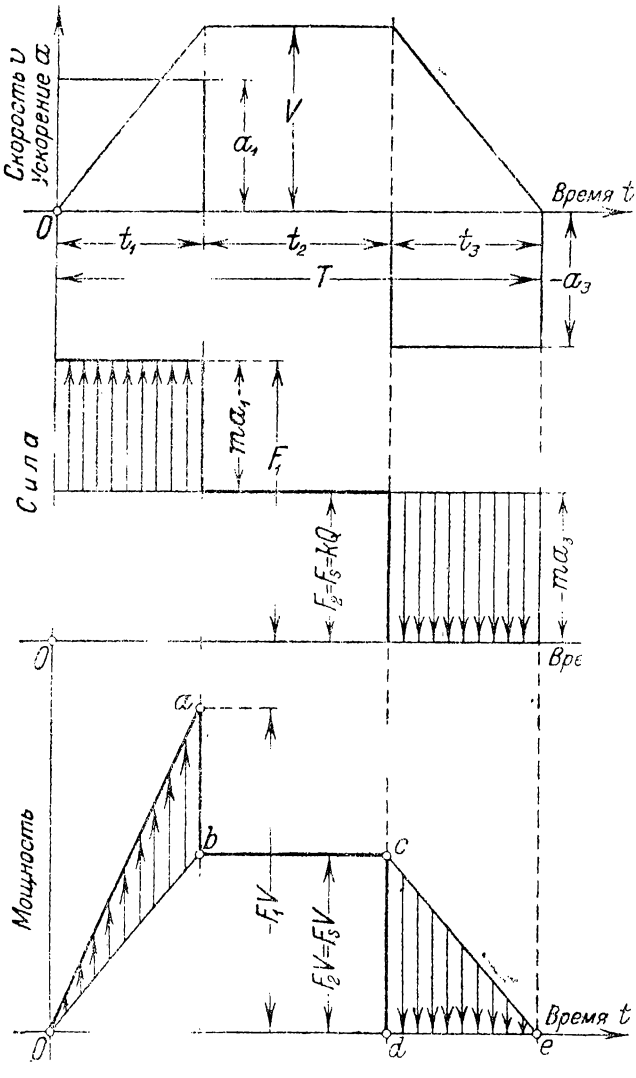

Фиг. 2. Трехпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для подъема статически уравновешенной системы с обыкновенными клетями при моторном замедлении в период $t_3$.

Очевидно, значения мощности $P_{s2}$, определяемые выражениями (6а) и (13а), должны быть равны между собою.

Фиг. 2 представляет графическую интерпретацию приведенных выше выражений, характеризующих изменение скорости, сил и мощностей за полный период подъема $T = t_1 + t_2 + t_3$.

Обозначения на фиг. 2 соответствуют обозначениям, принятым в приведенных выше выражениях. Области действия сил инерции заштрихованы соответственно направленными стрелками. На диаграмме мощностей площадь *ObceO* представляет работу, затрачиваемую на производство подъема полезного груза и на преодоление вредных сопротивлений в течение полного периода $T$; площадь *OabO* выражает энергию, затрачиваемую на преодоление сил инерции в период пуска $t_1$; эта энергия, накопляемая

в движущихся частях подъемного устройства в виде живой силы, в пери замедления $t_з$ возвращается системе в виде работы, выражаемой площад *cdec*; таким образом, площади *OabO* и *cdec* должны быть равны меж собою. Работа сил инерции в период $t_з$ помогает двигателю, развивающе энергию, определяемую площадью $d_o ded_o$, завершить подъем, на что трачивается работа, выражаемая площадью $cd_o ec$, равной сумме площад *cdec* и $ded_o d$. Кри *Oabcde* представляет кон изменения мощно двигателя, отнесенной валу барабана.




Фиг. 3. Трехпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для статически уравновешенной системы подъема с обыкновенными клетями при режиме свободного выбега в период $t_3$.

Необходимо от тить, что как зд (фиг. 2), так и в да нейшем, принята следу щая система изображе диаграмм, характериз щих различные режи подъема.

Скорости движе отложены от оси абсц (оси времен) вверх, исключением того слу когда на одной и той диаграмме рассматри ются имеющие проти положные направле скорости подъема и с ска; тогда скорости по ема отложены вверх, с рости спуска — вниз оси абсцисс. Силы сог тивления, направлен против движения систе как например, *поло тельная* статическая грузка, имеющая ме при *подъеме* полезн груза, отложены от абсцисс вверх; силы сог тивления, направлен в сторону движения ( имеет место, наприм при *отрицательной* тической нагрузке, с ветствующей *спуску* за), отложены от ука ной оси вниз. Движу силы, совпадающие с правлением движения, как например, усилия (моменты), развиваемые гателем при подъеме или спуске груза, отложены от оси времен вв движущие силы, направленные против движения, как например, усилия, виваемые *тормозом*, отложены от указанной оси вниз. Исключение со вляет случай, когда механический тормоз применяется для увеличения ложительной статической нагрузки; тогда тормозное усилие так же, и последняя нагрузка, откладывается от оси времен вверх.

Полагая в выражениях (9), (10), (11), (11а), (12), (12а), (13), (13а) величину $F_з = 0$, получим значения соответственных параметров для случая так называемого *свободного выбега*, характеризуемого отсутствием движущего усилия (фиг. 3). В частности выражение (10) при этом принимает вид:

$$a_з = -\frac{kQ}{m}, \qquad (10а)$$

где $a_з$ — замедление при режиме свободного выбега.

Необходимо при этом иметь в виду, что в связи с изменением (увеличением) в данном случае величины замедления в период $t_з$, по сравнению с рассмотренным выше случаем моторного замедления, при условии оставления без изменения значений полного периода $T$ движения и максимальной скрости $V$, получается соответственное уменьшение периода $t_з$ и увеличение периода $t_1$; в результате этого уменьшится пусковое ускорение, а следовательно, и пик мощности в конце периода $t_1$. *

Живая сила, запасенная в период пуска и выражаемая на диаграмме мощности площадью *OabO* (фиг. 3), точно равна энергии, необходимой на завершение подъема в период $t_з$ и определяемой площадью *cdec*; таким образом,площади *OabO* и *cdec* равны между собою.

Мощность двигателя, отнесенная к валу барабана, изменяется в течение полного периода подъема по кривой *Oabcd*.

На фиг. 3 представлены диаграммы, характеризующие случай подъема при свободном выбеге в период замедления.

Полагая, наконец, в выражениях (9), (10), (11), (11а), (12), (12а), (13), (13а) величину $F_з = -F_{bз}$, где $F_{bз}$ — постоянное тормозное усилие в период $t_з$, получим значения соответственных параметров для случая *тормозного* режима, характеризуемого применением торможения при отсутствии усилия, развиваемого двигателем. В частности выражение (10) при этом принимает вид:

$$a_{bз} = -\frac{kQ + F_{bз}}{m}, \qquad (10b)$$

где $a_{bз}$ — замедление при тормозном режиме. **

Следует отметить, что при действии в период замедления тормозного усилия, обусловливающего увеличение по абсолютному значению величины замедления, получается уменьшение периода $t_з$ и увеличение периода $t_1$ по сравнению со случаем свободного выбега, при условии оставления без изменения полного периода $T$ и максимальной скорости $V$; в связи с этим соответственно уменьшаются пусковое ускорение и пик мощности в конце периода $t_1$.

На фиг. 4 изображены диаграммы, характеризующие случай подъема при действии в период замедлений постоянного тормозного усилия $F_{bз}$.

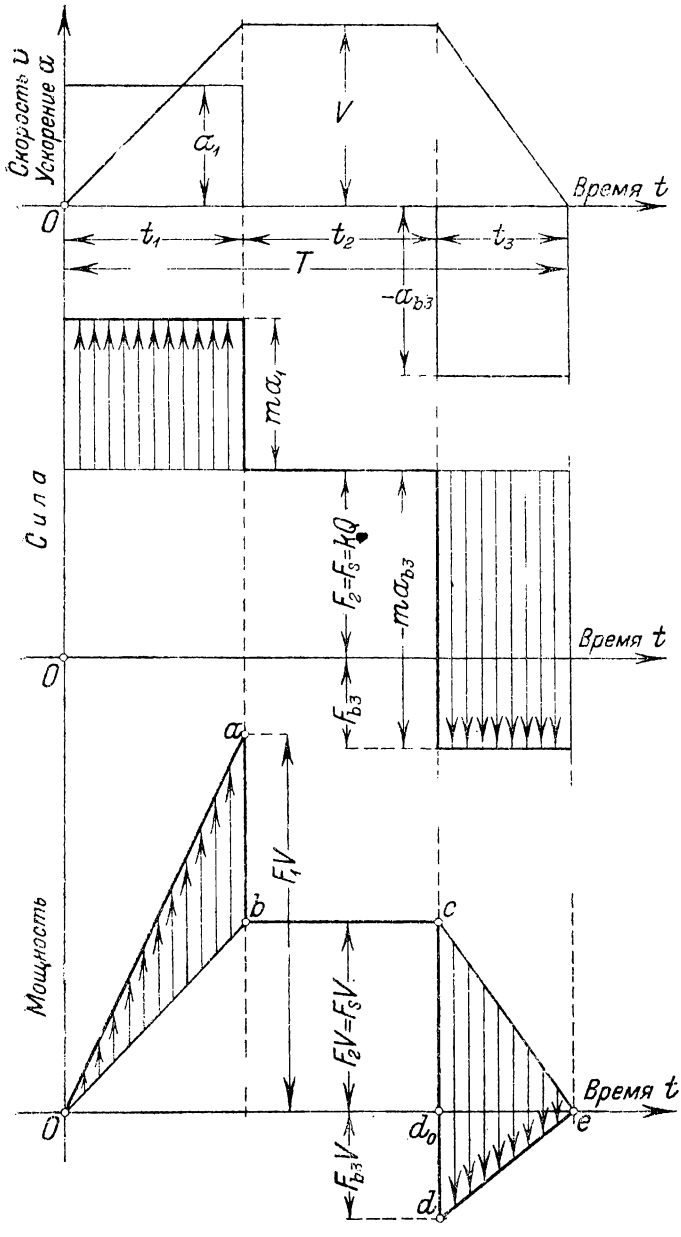
Необходимо отметить что в рассматриваемом случае количество запасенной в период пуска $t_1$ живой силы, определяемое на диаграмме мощностей площадью *OabO*, оказалось больше энергии, необходимой для завершения подъема в период $t_з$ и определяемой площадью $d_0ced_0$, на величину энергии, теряемой в тормозе и выражаемой площадью $d_0ded_0$. Заштрихованные площади *OabO* и *cdec*, характеризующие работу сил инерции, равны между собою.

---

Определение отдельных периодов движения и других параметров кинематики подъема, получаемых в связи с изменением величины замедления, произведено автором в труде. „К вопросу о выборе скоростей и ускорений для рудничного подъема", 1922.

** В дальнейшем, независимо от характера режима в период останова, величину замедления будем отмечать знаком $a_з$.

Из вышеизложенного видно, что при постоянстве усилий, развиваемых в соответственные периоды подъема двигателем и тормозом, равно как при свободном выбеге в период замедления, для статически уравновешенной системы (с равновесными головным и хвостовым канатами) закон изменения скорости сохраняется строго трапециодальным.




Фиг. 4. Трехпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для подъема статически уравновешенной системы с обыкновенными клетями при тормозном замедлении в период $t_3$.

---

Для определения параметров трехпериодной тахограммы (фиг. 2, 3, 4) необходимо иметь заданными нижеследующие величины: высоту подъема $H$, полный период подъема $T$, полную скорость $V$ и ускорение $a_1$ (или замедление $a_3$). Следует при этом иметь в виду, что вся площадь тахограммы, которая в рассматриваемом случае имеет вид трапеции, представляет собою полную высоту подъема $H$; равным образом отдельные площади тахограммы соответствующие периодам $t_1$, $t_2$, $t_3$, представляют высоты подъема $h_1$, $h_2$, $h_3$, проходимые подъемными сосудами в указанные периоды движения.

Принимая во внимание вышесказанное, из рассмотрения тахограмм на фиг. 2, 3 и 4 нетрудно получить нижеследующие соотношения между величинами, характеризующими эти тахограммы.

Период пуска

$$t_1=\frac{V}{a_1}. \qquad (14)$$

Путь $h_1$, проходимый в продолжение периода $t_1$,

$$h_1=\frac{1}{2}Vt_1. \qquad (15)$$

Так как согласно вышесказанному высота подъема $H$ равна площади трапеции, то можем написать следующее равенство:

$$H=\frac{T+t_2}{2}\cdot V;$$

отсюда получаем:

$$t_2=\frac{2H}{V}-T. \tag{16}$$

Путь $h_2$, проходимый в продолжение периода $t_2$,

$$h_2=Vt_2 \tag{17}$$

$$t_3=T-(t_1+t_2). \tag{18}$$

Путь $h_3$, проходимый в продолжение периода $t_3$,

$$h_3=\frac{1}{2}Vt_3. \tag{19}$$

Величина замедления

$$a_3=\frac{V}{t_3}. \tag{20}$$

В качестве проверки может служить выражение:

$$H=h_1+h_2+h_3. \tag{21}$$

Пример 1.

Рассчитать элементы подъема для следующих данных. Полезный за раз поднимаемый груз $Q=2200$ *кг*; высота подъема $H=300$ *м*; приведенная масса всех движущихся частей $m=2500$ *кг. м*$^{-1}$. *сек*$^2$; полная скорость подъема $V=8\frac{м}{сек}$; полный период подъема $T=50$ *сек*; коэфициент $k=1{,}2$.

Задаемся величиной пускового ускорения $a_1=0{,}8\frac{м}{сек^2}$

Согласно выражению (14)

$$t_1=\frac{8}{0{,}8}=10\ сек.$$

Согласно выражению (15)

$$h_1=\frac{1}{2}\cdot 8\quad 10=40\ м.$$

Согласно выражению (16)

$$t_2=\frac{2\cdot 300}{8}-50=25\ сек.$$

Согласно выражению (17)

$$h_2=8\quad 25=200\ м.$$

Согласно выражению (18)

$$t_3 = 50 - (10 + 25) = 15 \text{ сек.}$$

Согласно выражению (19)

$$h_3 = \frac{1}{2} \cdot 8 \quad 15 = 60 \text{ м.}$$

Согласно выражению (20) абсолютное значение замедления $a_3$ в период $t_3$:

$$a_3 = \frac{8}{15} = 0{,}53 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$$

Проверка, согласно выражению (21):

$$H = 40 + 200 + 60 = 300 \text{ м.}$$

Имеющее место в период $t_1$ постоянное движущее усилие $F_1$, отнесенное к окружности барабана, получается на основании выражения (2):

$$F_1 = 1{,}2 \cdot 2200 + 2500 \cdot 0{,}8 = 4640 \text{ кг.}$$

Имеющее место в период $t_2$ постоянное движущее усилие $F_2$ равно статическому усилию $F_{s2} = kQ$; следовательно,

$$F_2 = F_{s2} = kQ = 1{,}2 \cdot 2200 = 2640 \text{ кг.}$$

Постоянное движущее усилие $F_3$ в период $t_3$ (фиг. 2) на основании выражений (9) и (10):

$$F_3 = kQ - ma_{m3} = 1{,}2 \cdot 2200 - 2500 \cdot 0{,}53 = 1315 \text{ кг.}$$

Мощность $P_1$ на валу барабана, имеющая место в конце периода $t_1$, согласно выражению (5а):

$$P_1 = F_1 \quad V = 4640 \quad 8 = 37120 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} = 364 \text{ kW}$$

Мощность на валу барабана $P_2 = P_{s2}$, имеющая место в продолжение периода $t_2$, согласно выражению (8):

$$P_2 = P_{s2} = F_2 \quad V = 2640 \cdot 8 = 21120 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{сек}} = 207 \text{ kW.}$$

Мощность $P_3$ на валу барабана, имеющая место в начале периода $t_3$, согласно выражению (12а):

$$P_3 = F_3 \quad V = 1315 \cdot 8 = 10520 \frac{\text{кг.м}}{\text{сек}} = 103 \text{ kW.}$$

При решении вышеприведенного примера получился в период замедления моторный режим. Если бы представилось желательным получить в указанный период свободный выбег или тормозной режим, то пришлось бы, при данных значениях скорости $V$ и продолжительности подъема $T$, соответственным образом уменьшить пусковое ускорение $a_1$, в результате чего получилось бы необходимое увеличение замедления, обусловливающее наличие в период $t_3$ соответственного режима.

Можно было бы так же a priori получить определенные значения величины замедления, при которых имело бы место осуществление желаемого режима в период $t_3$; так, например, с целью получения свободного выбега, замедление $a_3$ (фиг. 3) возможно определить из выражения (10a):

$$a_3 = -\frac{kQ}{m}.$$

При желании получить в период $t_3$ тормозной режим с некоторым постоянным тормозным усилием $F_{b3}$, замедление $a_{b3}$ (фиг. 4) следовало бы определить из выражения (10b):

$$a_{b3} = -\frac{kQ + F_{b3}}{m}.$$

В обоих случаях, при постоянных значениях скорости $V$ и полного периода $T$, получилось бы соответственное уменьшение пускового ускорения $a_1$, по сравнению с значением его при моторном режиме в период замедления.

---

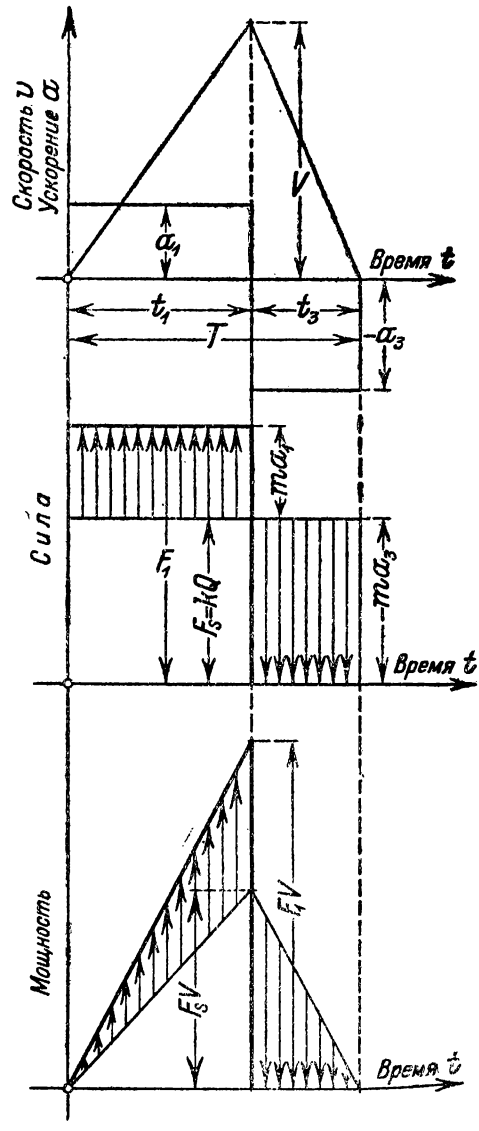
Следует отметить, что при $t_2=0$ трехпериодная тахограмма превращается в двухпериодную (фиг. 5), могущую иметь применение при статически уравновешенной системе электрического подъема лишь в отдельных случаях практики.

Имея в виду, что площадь, ограниченная тахограммой и осью времен, выражает высоту подъема $H$, нетрудно получить соотношение между максимальной скоростью $V$ и средней скоростью $v_m$ подъема;

$$V = 2\frac{H}{T} = 2v_m. \qquad (22)$$

Диаграммы на фиг. 5 характеризуют случай подъема согласно двухпериодной тахограмме с режимом свободного выбега в период замедления $t_3$.

---



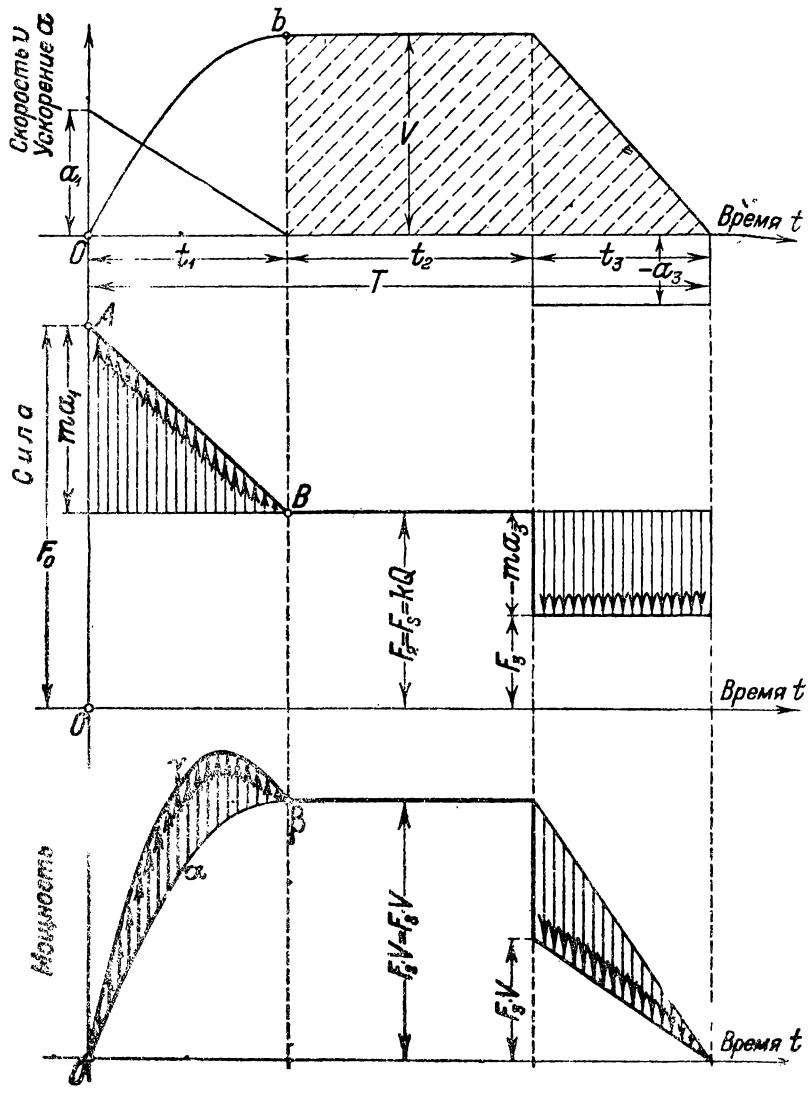

Фиг. 5. Двухпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для подъема статически уравновешенной системы с обыкновенными клетями при режиме свободного выбега в период $t_3$.

В некоторых случаях практики, с целью сглаживания пусковых пиков мощности, изменение скорости в период пуска $t_1$ осуществляется по закону *параболы*, обусловленному равномерно убывающим ускорением, согласно представленному на фиг. 6.

Изменение ускорения $a$ в рассматриваемом случае происходит по закону прямой линии, выражаемой уравнением:

$$a = \frac{dv}{dt} = a_1 - \frac{a_1}{t_1} t, \qquad (2$$

где $a_1$—начальное значение ускорения.




Фиг. 6. Трехпериодная тахограмма с параболическим законом изменения скорости в период $t_1$ и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для статически уравновешенной системы подъема с обыкновенными клетями при моторном замедлении в период $t_3$.

В начале движения, при $t = 0$, $a = a_1$; в конце периода пуска, п $t = t_1$, $a = 0$.

Решая уравнение (23) относительно $v$, получаем:

$$dv = \left(a_1 - \frac{a_1}{t_1} t\right) dt;$$

$$v = a_1 t \quad \frac{a_1}{2t_1} t^2;$$

$$v = a_1 t \left(1 \quad \frac{t}{2t_1}\right). \tag{24}$$

Последнее выражение показывает, что скорость $v$ в функции времени $t$ изменяется по закону параболы (кривая $Ob$ на фиг. 6).

Из выражения (24) при $t = t_1$ получаем максимальное значение скорости $V$:

$$v = V = \frac{1}{2} a_1 t_1. \tag{25}$$

Из последнего выражения имеем период пуска:

$$t_1 = 2 \frac{V}{a_1}. \tag{26}$$

Сравнивая последнее значение для периода $t_1$ с значением его при постоянном ускорении, определяемым выражением (14), согласно которому $t_1 = \frac{V}{a_1}$, мы видим, что период $t_1$ при параболическом изменении скорости в этот период получается в два раза больше периода $t_1$, имеющего место при прямолинейном изменении скорости, при условии, что начальное значение ускорения в первом случае равно постоянной величине пускового ускорения во втором случае.

Имея в виду, что согласно выражению (24) скорость $v$ определяется уравнением:

$$v = \frac{dx}{dt} = a_1 t \left(1 - \frac{t}{2t_1}\right), \tag{24a}$$

где $x$ — путь, проходимый подъемными сосудами в определенный промежуток времени, и решая последнее уравнение относительно $x$, получаем окончательно:

$$= \frac{a_1 t^2}{2}\left(1 - \frac{t}{3t_1}\right) \tag{27}$$

При $t = t_1$ получаем путь $h_1$, проходимый подъемными сосудами в риод пуска $t_1$:

$$x = h_1 \quad \frac{1}{3} a_1 t_1^2. \tag{28}$$

Для определения элементов тахограммы с параболическим изменением скорости в период $t_1$ необходимо предварительно задаться нижеследующими величинами: $H$, $T$, $V$, $a_1$.

Период замедления $t_3$ определяется из выражения (18).

Что касается периода полного хода $t_2$, то он может быть определен на основании нижеследующих соображений.

Принимая во внимание, что отдельные площади тахограммы представляют пути, проходимые подъемными сосудами в соответственные периоды, можем написать равенство (фиг. 6):

$$V\left(t_2 + \frac{1}{2} t_3\right) = H - h_1, \tag{29}$$

где левая часть выражает заштрихованную площадь тахограммы.

Принимая во внимание выражение (18) для периода $t_3$ и решая уравнение (29) относительно $t_2$, получаем:

$$t_2 = \frac{2}{V}(H \quad h_1) - (T - t_1). \tag{30}$$

Путь $h_2$, проходимый в период $t_2$, определяется выражением (17).
Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$, определяется выражением (19).
В качестве проверки может служить выражение (21).
Величина замедления $a_3$ определяется выражением (20).

Пример 2.

Пользуясь данными примера 1, рассчитать элементы подъема с параболическим изменением скорости в период $t_1$, применительно к диаграммам на фиг. 6.

Задаемся начальной величиной пускового ускорения $a_1 = 1 \frac{м}{сек^2}$.

Период $t_1$ согласно выражению (26):

$$t_1 = \frac{2 \quad 8}{1} = 16 \ сек.$$

Путь проходимый в период $t_1$, согласно выражению (28):

$$h_1 = \frac{1}{3} \quad 1 \cdot 16^2 = 85{,}33 \ м.$$

Период $t_2$ согласно выражению (31):

$$t_2 = \frac{2}{8}(300 - 85{,}33) \quad (50 - 16);$$

$$t_2 = 19{,}67 \ сек.$$

Путь $h_2$ согласно выражению (17):

$$h_2 = 8 \quad 19{,}67 = 157{,}36 \ м.$$

Период $t_3$ согласно выражению (18):

$$t_3 = 50 - (16 + 19{,}67) = 14{,}33 \ сек.$$

Путь $h_3$ согласно выражению (19):

$$h_3 = \frac{1}{2} \cdot 8 \quad 14{,}33 = 57{,}32 \ м.$$

Проверка согласно выражению (21):

$$H = 85{,}33 + 157{,}36 + 57{,}32 = 300{,}01 \cong 300 \ м.$$

Замедление $a_3$ согласно выражению (20):

$$a_3 = \frac{8}{14{,}33} = 0{,}56 \ \frac{м}{сек^2}$$

Начальное движущее усилие $F_0$, отнесенное к окружности барабана:

$$F_0 = kQ + ma_1 = 1{,}2 \quad 2200 \quad 2500 \cdot 1 = 5140 \ кг.$$

Усилие в период $t_2$:

$$F_2 = F_s = kQ = 1{,}2 \cdot 2200 = 2640 \text{ кг}.$$

Усилие $F$ период замедления:

$$F_3 = kQ - ma_3 = 1{,}2 \cdot 2200 - 2500 \cdot 0{,}56 = 1240 \text{ кг}.$$

Значения отдельных мощностей на валу барабана, получаемые умножением усилий на соответственные скорости, представлены на нижней диаграмме фиг. 6, на которой кривая $O\alpha\beta$ выражает закон изменения в период $t_1$ мощности, обусловленной постоянной статической нагрузкой $F_s$, кривая же $O\gamma\beta$ выражает изменение мощности на валу барабана, обусловленной движущим усилием, изменяющимся в указанный период по прямой $AB$. Необходимые значения скоростей при этом получаются на основании выражения (24); что же касается промежуточных значений движущих усилий, имеющих место в соответственные моменты периода $t_1$, то таковые могут быть получены в виде ординат прямой $AB$ из выполненной в определенном масштабе диаграммы усилий. На фиг. 6 области действия сил инерции отмечены соответственно направленными стрелками.

## 2. Четырехпериодная тахограмма.

При опрокидных сосудах (скипах и клетях), а также при скипах с донной разгрузкой, может иметь место четырехпериодная тахограмма, согласно представленному на фиг. 7 и 8.

С целью определения всех элементов указанной тахограммы необходимо предварительно задаться нижеследующими величинами: $H, T, V, v_1$ и $v_3$. При этом следует иметь в виду, что как скорость $v_1$ схода ролика опускающегося сосуда с разгрузочной кривой в конце периода $t_0$, так и начальная скорость $v_3$ при входе указанного ролика на разгрузочную кривую в начале периода $t_4$ разгрузки сосуда, не должны превышать определенных значений, а именно:

$$v_1 \leqslant 2{,}5 \frac{м}{сек}, \quad v_3 \leqslant 1{,}5 \frac{м}{сек}.$$

Имея в виду, что путь $h_0$, проходимый рамой сосуда в продолжение периода $t_0$ схода ролика с разгрузочной кривой, выражается площадью $O_0mO$ (фиг. 7 и 8), указанный период можем определить из выражения:

$$t_0 = \frac{2h_0}{v_1} \tag{31}$$

Ускорение $a_0$ в период $t_0$:

$$a_0 = \frac{v_1}{t_0} \tag{32}$$

После схода ролика с разгрузочной кривой движение сосуда продолжается в течение периода $(t_1 - t_0)$ с ускорением $a_1 = a_0$ (фиг. 7 и 8); таким образом, весь период пуска $t_1$ получается из выражения:

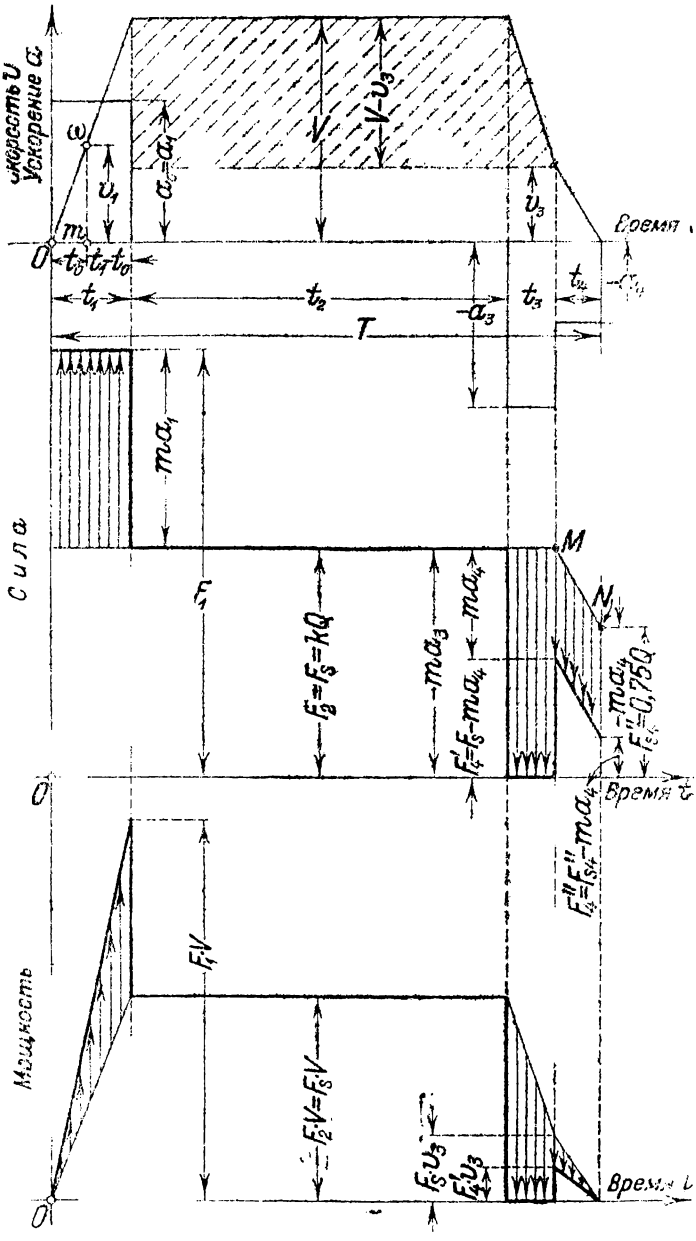
$$t_1 \quad \frac{V}{a_1} \tag{14}$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$:

$$h_1 = \frac{1}{2} V t_1. \tag{15}$$

Период $t_2$ может быть определен на основании нижеследующих соображений.

Принимая во внимание, что отдельные площади тахограммы предста-



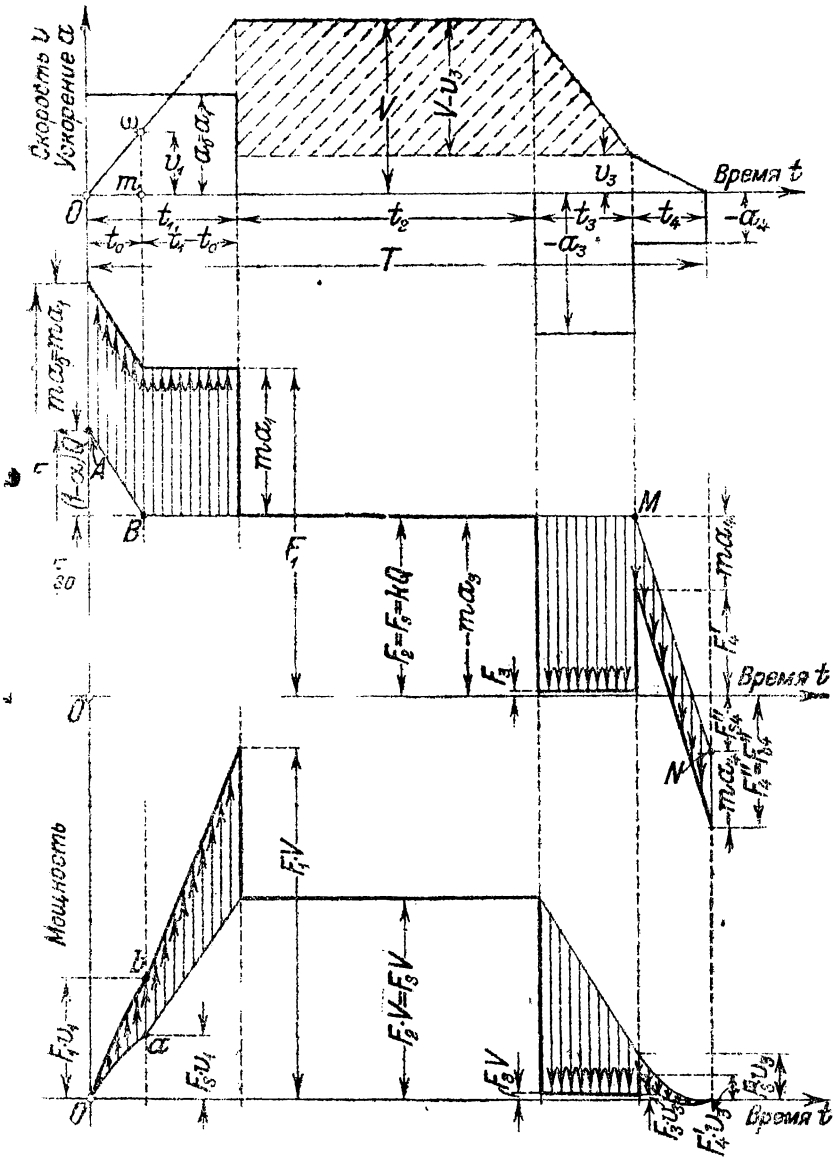

Фиг. 7. Четырехпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для статически уравновешенной системы подъема со скипами с донной разгрузкой при режиме свободного выбега в период $t_2$

вляют пути, проходимые подъемными сосудами в соответственные перио. можем написать равенство (фиг. 7 и 8):

$$(V-v_3)t_3 \quad \frac{1}{2}(V-v_3)t_3 = H-h_1 \quad h_4 - v_3 t_3 - v_3 t_3. \tag{33}$$

или

$$(V-v_3)\left(t + \frac{1}{2}t_3\right) \quad H \quad h_1 - h_4 - v_3(t_2+t_3), \tag{33a}$$




Фиг. 8. Четырехпериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для статически уравновешенной системы подъема с опрокидными сосудами при моторном замедлении в период $t_3$.

где левая часть последних двух равенств выражает заштрихованную площадь тахограммы.

Следует иметь в виду, что в выражениях (33) и (33а) путь, проходимый рамой сосуда в период $t_4$ его разгрузки, $h_4 = h_0$.

Принимая во внимание, что период замедления

$$t_3 = T - t_1 - t_2 - t_4, \tag{34}$$

где $t_4$ период разгрузки сосуда, и решая уравнения (33) и (33а) относительно $t_2$, получаем:

$$t_2 = \frac{2(H - h_1 - h_4)}{V - v_3} - \frac{V \quad v_3}{V \quad v_3}(T \quad t_1 - t_4), \tag{35}$$

или

$$t_2 \quad \frac{1}{V - v_3}[2(H - h_1 - h_4) - (V + v_3)(T \quad t_1 - t_4)]. \tag{3}$$

Входящий в выражения (34), (35) и (35а) период $t_4$ разгрузки определяется из выражения:

$$t_4 = \frac{2h_4}{v_3}. \tag{36}$$

Путь $h_2$, проходимый сосудами в течение периода ного определяется из выражения:

$$h_2 = Vt_2. \tag{37}$$

Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$, определяется из выражения

$$h_3 = \frac{V + v_3}{2} t_3. \tag{37}$$

к проверки может служить выражение:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 \quad h_4. \tag{38}$$

Постоянное замедление $a_3$ в период $t_3$ определяется из выражения

$$a_3 = \frac{V - v_3}{t_3}. \tag{39}$$

Постоянное замедление период разгрузки $t_4$:

$$a_4 = \frac{v_3}{t_4} \tag{40}$$

Следует имет в виду, что должно ит место соотношение: $a_4 \quad a_3$.

*Случай скипа с донной разгрузкой.*

На фиг. 7 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного скипами с *донной* разгрузкой.

Статическое усилие в течение времени $t_1 \quad t_2 + t_3$ является величиной постоянной: $F_s = kQ$.

Статическое усилие в конце периода $t_4$ разгрузки скипа, вследствие искажения его по сравнению со случаем обыкновенного клетевого подъема, получает значение: $F''_{s4} = 0{,}75Q$. *

---

* А. П. Герман и Ф. Н. Шклярский. „Рудничные подъемные машины", Часть I, стр. 126. 1940. Гостоптехиздат.

Изменение статического усилия в течение периода $t_4$ от значения $F_s = kQ$ до величины $F_{s4}'' = 0{,}75Q$ предположено происходящим ориентировочно по прямой линии $MN$.

Движущее усилие в период $t_1$ определяется из выражения:

$$F_1 = F_s + ma_1. \tag{2a}$$

Движущее усилие в период $t_2$:

$$F_2 = F_s = kQ.$$

Движущее усилие в период $t$

$$F_3 = F_s - ma_3. \tag{3a}$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$:

$$F_4' = F_s - ma_4. \tag{41}$$

Движущее усилие в конце периода $t_4$:

$$F_4'' = F_{s4}'' \quad ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей на валу барабана подъемной машины в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображения на нижней диаграмме фиг 7.

Пример 3.

Рассчитать применительно к диаграммам на фиг. 7 элементы подъема для следующих данных, в предположении скипа с *донной* разгрузкой.

$H = 365$ *м*; $T = 90$ *сек*; $V = 4{,}53 \frac{м}{сек}$ $v_1 = 2 \frac{м}{сек}$ $v_3 = 1{,}5 \frac{м}{сек}$

$h_0 = h_4$ 3,5 *м*; $Q = 4000$ *кг*; $Q' = 4550$ *кг*; $m = 7000$ *кг.м*$^{-1}$*.сек*$^2$; $k = 1{,}1$

Согласно выражению (31) период $t_0$ схода ролика скипа с разгрузочной кривой

$$t_0 \quad \frac{2}{} \frac{3{,}5}{2} \qquad 5 \text{ сек.}$$

Ускорение согласно выражению (32):

$$a_1 \quad \frac{2}{3{,}5} = 0{,}57 \frac{м}{сек^2}$$

---

* Здесь следует отметить, что в период разгрузки $t_4$ общая масса $m$ движущихся частей подъемного устройства, в результате высыпания полезного ископаемого из разгружающегося скипа, не остается постоянной, а постепенно уменьшается на величину, обусловленную высыпаемой частью полезного груза. Отмечая это обстоятельство, мы тем не менее означенного изменения массы как в данном случае, так и в дальнейшем, при рассмотрении операций разгрузки скипов с донной разгрузкой, а также опрокидных сосудов, принимать во внимание для простоты не будем, считая массу $m$ в течение всего периода разгрузки $t_4$ постоянной. Получаемая при этом неточность практического влияния на конечные результаты расчетов не оказывает, ввиду сравнительно незначительной части, составляемой массой полезного груза, от общей массы всех движущихся частей подъемного устройства. Так, например, при полезном грузе $Q = 4000$ *кг* масса его $\frac{4000}{9{,}81}$ $= 408$ *кг.м*$^{-1}$*.сек*$^2$; при общей массе всех движущихся частей подъемного устройства $m$ 7000 $^{1}$*.сек*$^2$, $m_Q$ $\frac{408 \cdot 100\%}{7000}$ 5,8% от массы $m$ (см. данные

Период пуска $t_1$ получается из выражения (14):

$$t_1 = \frac{4{,}53}{0{,}57} = 8 \text{ сек.}$$

Период ускорения после схода ролика с разгрузочной кривой:

$$t_1 - t_0 = 8 - 3{,}5 = 4{,}5 \text{ сек.}$$

Путь проходимый в период $t_1$, согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{1}{2} \quad 4{,}53 \cdot 8 = 18{,}12 \text{ м.}$$

Период разгрузки $t_4$ согласно выражению (36):

$$t_4 = \quad \frac{2 \quad 3{,}5}{1{,}5} = 4{,}67 \text{ сек.}$$

Период $t_2$ согласно выражению (35):

$$t_2 \quad \frac{2\,(365 - 18{,}12 - 3{,}5)}{4{,}53 \quad 1{,}5} - \frac{4{,}53 + 1{,}5}{4{,}53 - 1{,}5}\,(90 - 8 - 4{,}67);$$

$$t_2 \quad 72{,}77 \text{ сек.}$$

Пу $h_2$, проходимый в период $t_2$, согласно выражению (17):

$$h_2 = 4{,}53 \cdot 72{,}77 = 329{,}65 \text{ м.}$$

Период $t_3$ согласно выражению (34):

$$= 90 - 8 \quad 72{,}77 - 4{,}67 = 4{,}56 \text{ сек.}$$

Путь $h_3$, проходимый период $t_3$ согласно выражению (37):

$$h_3 = \frac{4{,}53 + 1{,}5}{2} \quad 4{,}56 = 13{,}75$$

Проверка согласно ыражению (38):

$$H = 18{,}12 + 329{,}65 \quad 13{,}75 \quad 3{,}5 = 365{,}02 \cong 365 \text{ м.}$$

Замедление $a_3$ период $t$ асно выражению (39):

$$- \frac{4{,}53 - 1{,}5}{4{,}56} = 0{,}66 \quad \frac{м}{сек^2}$$

Замедление перио, згру: согласно выражению (40):

$$\frac{1{,}5}{4{,}67} = 0{,}32 \frac{м}{сек^2}$$

Постоянное статическое лие, имеющее место течение времени $t_1 \quad t + t_3$:

$$F_s = kQ = 1{,}15 \cdot 4000 = 4600 \text{ кг.}$$

С атическое лие $F$ в конце периода $t_4$ разгрузки:

$$F_{s1}'' \quad 0{,}75\,Q = 0{,}75 \cdot 4000 = 3000 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в период $t_1$:

$$F_1 = F_s + ma_1 = 4600 \quad 7000 \quad 0{,}57 \quad 8590 \ кг.$$

Движущее усилие $F_2$ в период $t_2$:

$$F_2 - F_s = 4600 \ кг.$$

Движущее усилие $F$ в период $t_3$:

$$F_3 = F_s - ma_3 = 4600 - 7000 \cdot 0{,}66 = -20 \ кг.$$

В данном случае получилось отрицательное значение движущего усилия, которое, таким образом, является тормозным усилием: $F_3 = F_{b3} = -20$ кг. Однако, ввиду незначительности указанного усилия, с достаточным для практики приближением можно принять в течение периода $t_3$ наличие режима свободного выбега т. е. $F_3 = F_{b3} = 0$, что и изображено на диаграммах усилий и мощностей на фиг. 7.

Движущее усилие $F_4'$ в начале периода $t_4$ согласно выражению (41):

$$F \quad F \quad ma_4 = 4600 - 7000 \quad 0{,}32 = 2360 \ кг.$$

Движущее усилие $F_4$ конце периода $t_4$ согласно выраж (42):

$$F_4 = F_s - ma_4 \quad 3000 - 7000 \quad 0{,}32 = 760 \ кг.$$

Здесь следует отметить, что при решении данного примера произведено сначала определение всех статических усилий, а затем движущих усилий. Может быть, однако, принят и иной порядок, при котором по очереди для каждого периода определяются как статические, так и движущие усилия.

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в течение периода $t_2$:

$$P_{s2} = F_s V = 4600 \quad 4{,}53 = 20838 \frac{кг.м}{сек} = 204 \ kW$$

Мощность $P_1$ на барабана конце периода $t_1$, гласно выражению (5а):

$$F_1 V \quad 8590 \cdot 4{,}53 - 38913 \frac{кг.м}{сек} \quad 381{,}5 \ kW$$

Мощность вал барабана $P_2 = P_{s2}$, имеющая что в течение периода $t_2$

$$P = P_{s2} = F_2 V = 4600 \cdot 4{,}53 = 20838 \frac{кг.м}{сек} = 204 \ kW$$

Мощность валу барабана в течение периода $t_3$:

$$P_3 = F_3 \cdot v \cong 0.$$

Мощнос обу нная статиче нагру конце периода $t$:

$$P_{s} \quad F_s v_3 = 4600 \cdot 1{,}5 = 6900 \frac{кг.м}{сек} \quad 68 \ kW$$

Мощность $P_4'$ на валу барабан начале периода $t_4$:

$$P_4' = F_4' v_3 = 2360 \cdot 1{,}5 \quad 3540 \frac{кг.м}{сек} = 35 \ kW.$$

Мощность в конце периода $t_4$:

$$= F_4'' v = F_4'' \cdot 0 = 0.$$

### *b. Случай опрокидного подъемного сосуда*

На фиг. 8 наряду с тахограммой представлены диаграммы ли[нии] мощностей для подъема, оборудованного *опрокидными* сосудами.

Начальное статическое усилие

$$F_{s0} = kQ + (1-\alpha)\,Q', \qquad (43)$$

где множитель $(1-\alpha)$ называется *коэфициентом неуравновешенности мертвой нагрузки.** В случае опрокидных скипов $\alpha = 0{,}65$; при опрокидных клетях $\alpha = 0{,}48$ для случая металлических проводников и $\alpha = 0{,}45$ при деревянных проводниках.

Статическое усилие в течение времени $(t_1 - t_0) + t_2 + t_3$ является величиной постоянной: $F_s = kQ$.

Изменение статической нагрузки в течение периода $t_0$ схода ролик[ов] разгрузочной кривой от значения $F_{s0} = kQ + (1-\alpha)Q'$ до величины $F_s = kQ$ предположено происходящим ориентировочно по прямой линии $AB$.

Статическое усилие в конце периода $t_4$ разгрузки сосуда определяется согласно выражению

$$F_{s4}'' = kQ \quad [(1 \quad \alpha)\,Q' + Q]. \qquad (44)$$

Следует отметить, что в рассматриваемом случае искажение статического сопротивления в конце периода $t_4$ обусловлено как отсутствием полезной нагрузки $Q$ со стороны груженой ветви, так и неуравновешенностью мертвой нагрузки $Q'$.

Ввиду указанного обстоятельства, статическая нагруз[ка] риода $t_4$ всегда получает отрицательное значение.

Изменение статической нагрузки в течение периода $t_4$ [от] значения $F_s = kQ$ до величины $F_{s4}'' = kQ - [(1-\alpha)Q' + Q]$ предположено происходящим ориентировочно по прямой линии $MN$.

Начальное движущее усилие

$$F_0 = F_{s0} \quad ma_0. \qquad (5)$$

Движ[ущее] усилие в прод[олжение] периода $(t_1 \quad t_0)$:

$$F_1 = F_s + ma_1. \qquad (2$$

Движущее усилие $F_2$ в период $t_2$ определяется из выражения (7).

Движущее усилие $F_3$ в период $t_3$ определяется из выражения (9а).

Движущее усилие в начале периода $t_4$ определяется из выражения (41).

Движущее усилие в конце периода $t_4$, являющееся в рассматриваемом [слу]чае тормозным усилием $F_{b4}''$, определяется из выражения (42).

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответствующих усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 8. При этом следует отметить, что промежуточные значения усилий и скоростей, необходимые для построения кривых мощностей $Oa$ и $Ob$ в период $t_0$ получаются в виде соответственных ординат из диаграмм усилий и скоростей, выполненных в определенном масштабе. Указанные соображения относятся также к построению кривых мощностей в период

* Ibidem, с
Ibidem,

Пример 4.

Рассчитать применительно к диаграммам на фиг. 8 элементы подъема для следующих данных, в предположении *опрокидных* клетей (с опрокидыванием на 135°).

$H = 300\ м$; $T = 62\ сек$; $V = 7\ \frac{м}{сек}$; $v_1 = 2{,}2\ \frac{м}{сек}$; $v_3 = 1{,}5\ \frac{м}{сек}$; $= h_4 = 5{,}5$

$Q = 2000\ кг$; $Q' = 7000\ кг$; $m = 5000\ кг.м^{-1}.сек^2$, $k = 1{,}2$.

Согласно выражению (31) период $t_0$ сход ролика загрузочной кривой:

$$t_0 = \frac{2}{2{,}2}\ \frac{5{,}5}{} = 5\ сек.$$

Ускорение $a_0$ $a_1$ согласно выражению (32):

$$a_0 = a_1 = \frac{2{,}2}{5} = 0{,}44\ \frac{м}{сек^2}$$

Период пуска $t_1$ согласно выражению (14):

$$t_1 = \frac{7}{0{,}44} = 16\ сек.$$

Период ускорения после схода ролика разгрузочной кривой

$$t_1 - t_0 = 16\quad 5 = 11\ сек.$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, согл (15):

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot 7\quad 16 = 56$$

Период разгрузки $t_4$ согласно выражению (36):

$$t_4 = \frac{2}{1{,}5}\ \frac{5{,}5}{} = 7{,}33\ сек.$$

Период $t_2$ согласно выражению (35):

$$t\quad \frac{2(300\quad 56 - 5{,}5)}{7\quad 1{,}5}\quad \frac{7 + 1{,}5}{7\quad 1{,}5}(62\quad 16 - 7{,}33);$$

$$t_2 = 26{,}97\ сек.$$

Путь $h_2$, проходимый в период $t_2$, согласно выражению

$$h_2 = 7 \cdot 26{,}97 = 188{,}79$$

Период $t_3$ согласно выражению (34):

$$t_3 = 62\quad 16\quad 26{,}97\quad 7{,}33 = 11,$$

Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$, соглас выраж

$$\frac{7 + 1{,}5}{2}\quad 11{,}7 = 49{,}72$$

Проверка ласно выражению (38):

$$H = 56 + 188{,}79 + 49{,}72 + 5{,}5 = 300{,}01 \cong 300\ м.$$

период $t_3$ согласно выражению (39):

$$a_3 = \frac{7 - 1{,}5}{11{,}7} = 0{,}47\ \frac{м}{сек^2}.$$

Замедление в период $t_4$ согласно выражению (40):

$$a_4 = \frac{1{,}5}{7{,}33} = 0{,}2\ \frac{м}{сек^2}.$$

Начальное статическое усилие согласно выражению (43):

$$F_{s0} = 1{,}2\ \ 2000 + (1 - 0{,}48) \cdot 7000 = 3540\ кг.$$

Статическое усилие, имеющее место течение времени $(t_1 - t_0) +$ $+ t_2$:

$$F_s \quad 1, \quad 2000 = 2400\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (44):

$$F'' \quad 1{,}2\ \ 2000 - [(1 \quad 0{,}48)\,7000 \quad 2000] = -740\ кг.$$

Начальное движущее усилие согласно выражению (45):

$$F_0 = 3540 + 5000 \cdot 0{,}44 = 5740\ кг.$$

Движущее лие в продолжение периода $(t_1 - t_0)$ согласно выраже- ние (2a).

$$_1 = 2400 + 5000 \quad 0{,}44 = 4600\ кг.$$

Движущее усилие в период $t_2$

$$F_2 \quad F = 2400\ кг.$$

Движущ в риод $t_3$ огласно выражению (9a):

$$F_3 = 2400 - 5000 \cdot 0{,}47 = 50\ кг.$$

Движуще лие в начале периода $t$ гласно выражению (41):

$$F \quad = 2400 \quad 5000 \cdot 0{,}2 = 1400\ кг.$$

Движущее тормо силие конце периода $t_4$ согласно выраже- нию (42):

$$F_4 \quad F''_{b4} \quad 740 \quad 5000 \quad 0{,}2 \quad 1740\ кг.$$

Мощность обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_0$:

$$F \quad 240 \quad 2{,}' = 5280\ \frac{кг.\ м}{сек} \cong 52\ kW$$

---

Вследствие незначительности движущего усилия $F_3 = 50$ *кг*, в период $t_3$ практически можно предположить наличие режима свободного выбега; следует при этом иметь в виду, что подобное незначительное усилие, легко осуществляемое в период замедления при приводе системы Леонарда, в случае асинхронного подъемного двигателя требовало бы для своего получения применения роторного реостата со ступенями столь значительного сопротивления, которые на практике при металлических реостатах не применяются.

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t$ и в продолжение периода $t$

$$P_{s1} = P_{s2} = F \quad V = 2400 \quad 7 = 16800 \frac{кг.м}{сек} = 165 \ kW$$

Мощность, обусловленная атической нагру в и в начале периода $t_4$:

$$P_{s3}'' = P'_{s4} \quad F \quad v_3 = 2400 \quad 1{,}5 = 3600 \frac{кг.м}{сек} = 35 \ kW$$

Мощность $P_0''$ на барабан в конце периода $t_0$:

$$P_0'' = F_1 \quad = 4400 \quad 2{,}2 = 9680 \frac{кг.м}{сек} \quad 95 \ kW$$

Мощность $P_1$ валу бараба конце перио $t_1$

$$P_1 = F_1 \quad V = 4400 \quad 7 \quad 30800 \frac{кг.м}{сек} = 302 \ kW$$

Мощность $P_2$ в течение периода $t_2$:

$$P_2 = P_{s2} = F \quad V \quad 2400 \quad 7 = 16800 \frac{кг.м}{сек} \quad 165 \ kW$$

Мощность $P'$ на валу барабана в начале периода

$$P_3' = F_3 \quad V \quad 50 \quad 350 \frac{кг.м}{сек} \quad 3{,}5 \ kW$$

Мощность $P_3''$ на ва бара конце перио $t$

$$P'' = F \quad = 50 \quad 1{,} \quad 75 \frac{кг.м}{сек} = 0{,}7 \ kW$$

Мощность $P_4'$ начале периода $t_4$:

$$P_4' = F_4' \quad = 1400 \quad ,5 = 2100 \frac{кг.м}{сек} = 21$$

К четырехпериодной ахограмме может быть отне на тахограмма, представленная на фиг. 9, у которой период разгрузки разбивается на два промежутка: $t_4'$ — постоянной скоростью $v$ $t_4$ со скоростью, убывающей от значения $v_3$ до нуля.

С целью определения периодов $t_4'$ и $t_4''$ ра на два уч $\frac{3}{4}$ прохож ме стоянная скорость $\frac{1}{4} h_4$, прохо со скоростью, дающей до ну Тог перио к опре, дится из выражения:

$$t_4' \quad \frac{3}{4} \quad , \qquad (46)$$

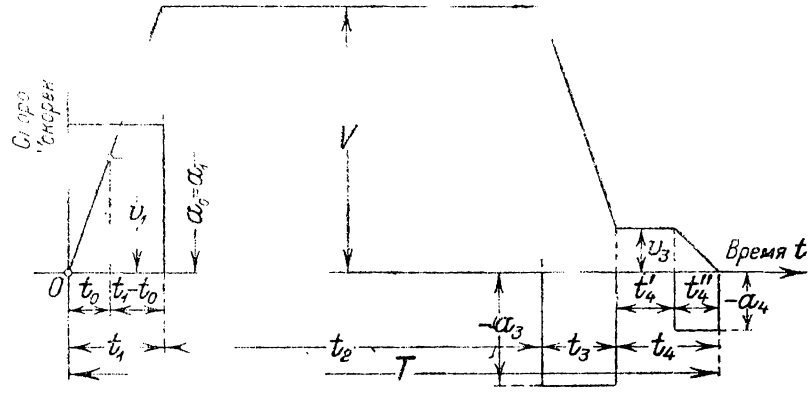
Период $t$ получается из выражения:

$$t_4'' = \frac{1}{2} \quad \frac{h_4}{v_3} \tag{47}$$

Пол $t$ згрузки:

$$t_4 = t_4' + t_4'' \quad \frac{h_4}{v_3} \tag{48}$$

Сравнивая последнее значение для периода $t_4$ с значением его, определяемым выражением (36) для случая разгрузки сосуда согласно тахограммам, представленным на фиг. 7 и 8, мы видим, что при одном и том же значении скорости $v_3$ полный период разгрузки $t_4$, при наличии в продолжение части его $t_4'$ постоянной скорости, сокращается по сравнению




Фиг. 9. Четырехпериодная тахограмма с периодом разгрузки $t_4$, состоящим из двух промежутков времени: $t_4'$ — с постоянной скоростью $v_3$, и $t_4''$ — с убывающей скоростью до нулевого значения.

продолжительностью указанного периода при непрерывно убывающей корости в течение всего периода разгрузки.

Замедление $a_4$ в период $t_4''$ (фиг. 9) определяется из выражения:

$$a_4 \quad \frac{v_3}{t_4''}. \tag{49}$$

Остальные параметры тахограммы на фиг. 9 определяются согласно ответственным выражениям: (14), (15), (17), (31), (32), (34), (35), (37), (38) (39).

### 3. Пятипериодная тахограмма с постоянным ускорением в период $t_0$.

Сход ролика опрокидного сосуда по разгрузочной кривой в период может происходить также с ускорением $a_0 < a_1$ (фиг. 10 и 11), что часто имеет место на практике.

В общем случае скорости $v_1$ и $v_3$ имеют отличные друг от друга значения, а именно $v_1 > v_3$, что и представлено на фиг. 10 и 11; в частном случае может иметь место равенство: $v_1 = v_3$.

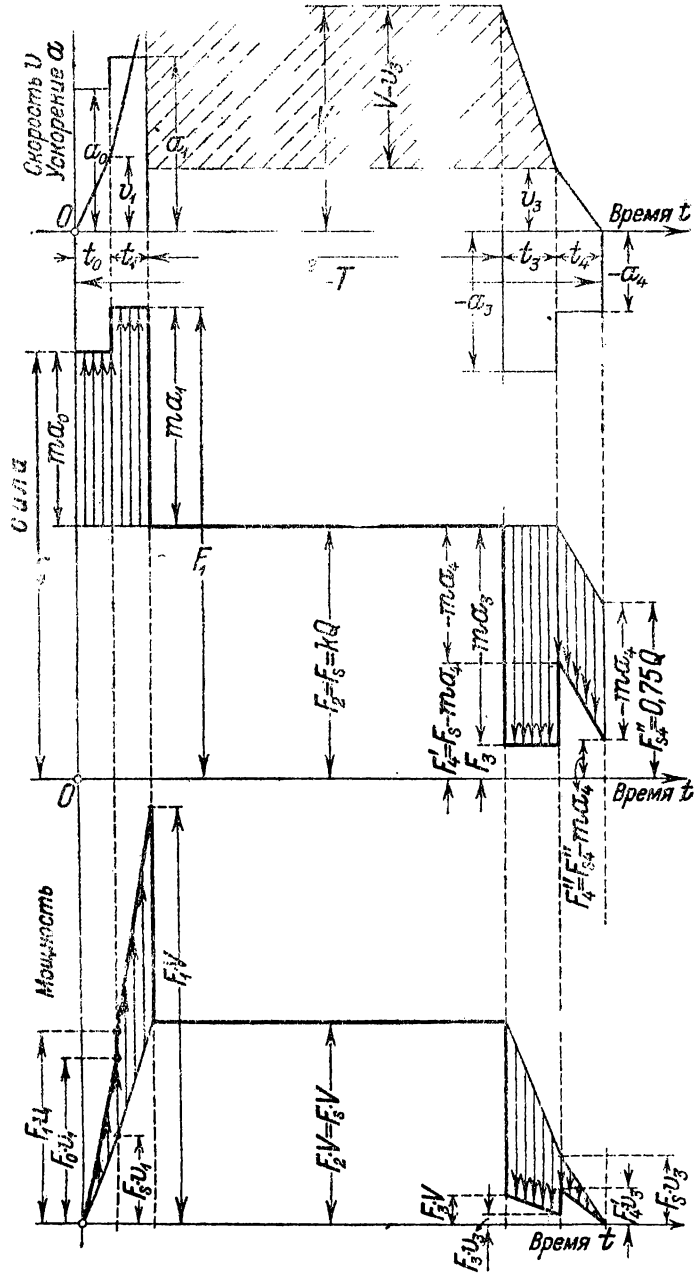
Исходными данными при определении параметров пятипериодной тахограммы являются величины: $h_0 = h_4$, $v_1$, $a_1$, $V$, $v_3$, $H$, $T$

Период $t_0$ определяется из выражения (31).

Начальное ускорение $a_0$ определяется из выражения (32).

Период $t_1$ определяется из выражения:

$$t_1 = \frac{V \quad v_1}{a_1} \tag{50}$$

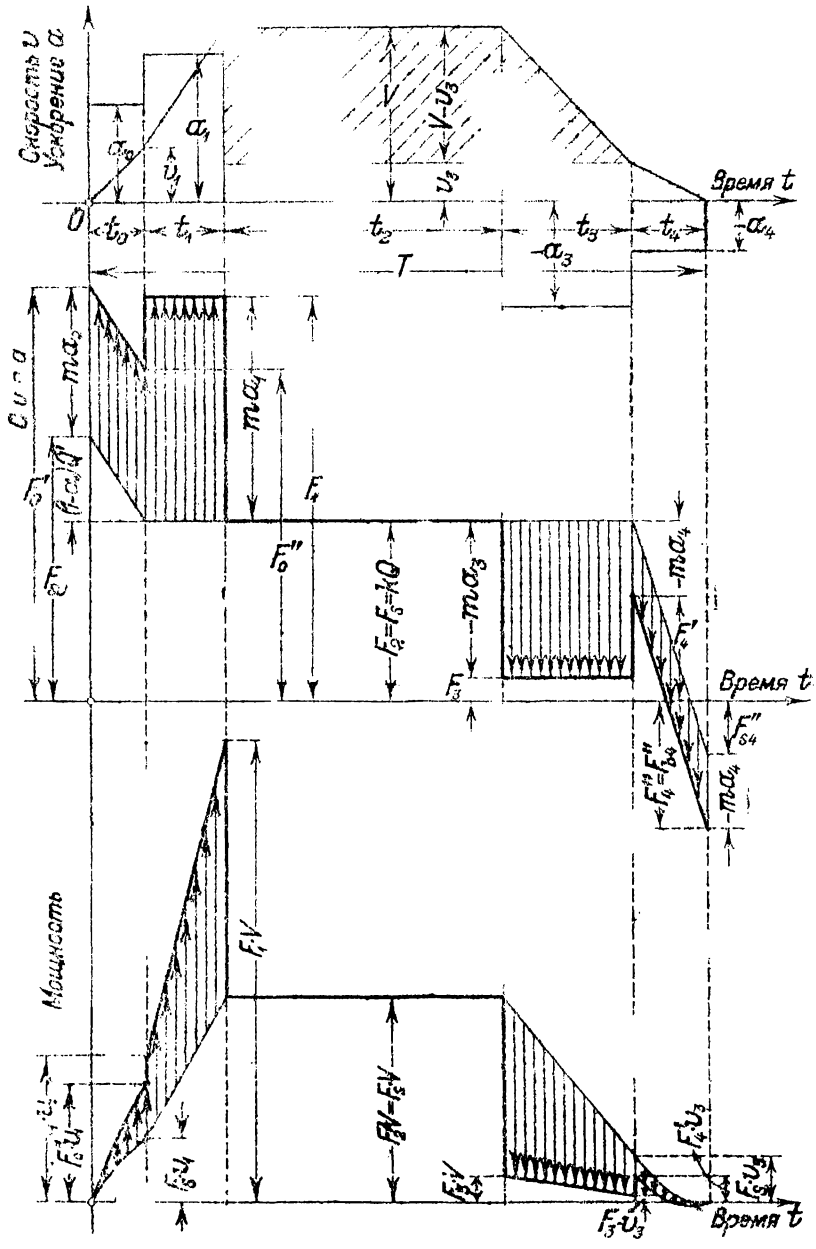



Фиг. 10. Пятипериодная тахограмма и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей для статически уравновешенной системы подъема со скипами с донной разгрузкой при моторном замедлении в период $t_3$.

Путь $h_1$, пройденный в течение периода $t_1$:

$$\frac{1}{2}(V \quad v_1)t_1. \qquad (51)$$

Перио $t_2$ может определе основании ображений,




Пятипериодная тахограмма и соответствующие ей диагра усилий и мощностей для статически уравновешенной системы с опрокидными осудами при моторном замедлении в период $t_3$.

тичных приведенным при определении указанного перио тырехпериодной тахограммы.

В применении к пятипериодной тахограмме (фиг. 10, 11) выражение (33) примет вид:

$$(V - v_3)\left(t_2 + \frac{t_3}{2}\right) = H - h_0 - h_1 - h_4 - v_3 t_3, \qquad (52)$$

где левая часть выражает заштрихованную площадь тахограммы.

Принимая во внимание, что период замедления

$$t_3 = T - t_0 - t_1 - t_2 - t_4, \qquad (53)$$

где $t_4$—период разгрузки, решая уравнение (52) относительно $t_2$, получаем:

$$t_2 = \frac{2(H - 2h_0 - h_1)}{V - v_3} - \frac{V}{V}(T - t_0 - t_1 - t_4). \qquad (54)$$

Или

$$t_2 = \frac{1}{V - v_3}[2(H - h_1) - v_3(T - t_4)]. \qquad (54a)$$

Входящий в выражения (53), (54) период $t_4$ определяется выражения (36).

Путь $h_2$, проходимый судами в период $t_2$, опре из выражения (17).

Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$, опре ляется выражения (37).

В качестве проверки может служить выражение:

$$H = 2h_0 + h_1 \qquad (55)$$

Заме опре выражениями (39) и (40).

*Случай скипа с донной разгрузкой*

На фиг. 10 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного скипами с донной разгрузкой.

Статические усилия в рассматриваемом случае имеют вид, аналогичный представленному на фиг. 7.

Движущее усилие $F_0$ в период $t_0$ опреде выражения:

$$F_0 = F_s + ma_0. \qquad (56)$$

Дви $F$ период $t_1$ определяется выр

$$F_1 = F \quad ma_1. \qquad (2a)$$

Движущие усилия $F_2$, $F_3$, $F_4'$ и $F_4''$ (фиг. 10) определяются соответственно выражениями (7), (9а), (41) и (42).

Значения отдельных мощностей на валу барабана подъемной машины в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 10.

Пример

Рассчитать применительно к диаграммам на фиг. 10 элементы подъема для случая пятипериодной тахограммы, пользуясь данными примера 3. Кроме того, задаемс нием ускорения $a_1$ 0,7 $\frac{м}{сек^2}$

Согласно полученному в примере 3 имеем период $t_0 = 3{,}5$ *сек*; начальное ускорение $a_0 = 0{,}57 \ \frac{м}{сек^2}$.

Период $t_1$ согласно выражению (50):

$$t_1 = \frac{4{,}53 - 2}{0{,}7} = 3{,}61 \ сек.$$

Путь согласно выражению (51):

$$h_1 = \frac{1}{2}(4{,}53 + 2) \cdot 3{,}61 = 11{,}79 \ м.$$

Из примера 3 период разгрузки $t_4 = 4{,}67$ *сек*.
Период $t_2$ согласно выражению (54):

$$t \quad \frac{2(365 - 2 \ \ 3{,}5 - 11{,}79)}{4{,}53 - 1{,}5} - \frac{4{,}53 + 1{,}5}{4{,}53 - 1{,}5}(90 - 3{,}5 - 3{,}61 - 4{,}67);$$

$$t_2 = 72{,}86 \ сек.$$

Путь $h_2 = 4{,}53 \ \ 72{,}86 = 330{,}06$ *м*.
Период $t_3$ согласно выражению (53):

$$t_3 = 90 - 3{,}5 - 3{,}61 - 72{,}86 - 4{,}67 = 5{,}36 \ сек.$$

Путь $h_3$ согласно выражению (37):

$$h_3 \quad \frac{4{,}53 + 1{,}5}{2} \quad 5{,}36 = 16{,}16 \ м.$$

Проверка согласно выражению (55):

$$H = 2 \ \ 3{,}5 + 11{,}79 + 330{,}06 + 16{,}16 = 365{,}01 \cong 365 \ м.$$

Замедление $a_3$ согласно выражению (39):

$$a_3 = \frac{4{,}53 - 1{,}5}{5{,}36} = 0{,}56 \ \frac{м}{сек^2}.$$

Из примера 3 имеем замедление $a_4 = 0{,}32 \ \frac{м}{сек^2}$.

Равным образом из примера 3 имеем статические усилия:

$$F_s = 4600 \ кг; \ F''_{s4} = 3000 \ кг.$$

Движущее усилие $F_0$ в период $t_0$ согласно выражению (56):

$$F_0 = 4600 + 7000 \cdot 0{,}57 = 8590 \ кг.$$

Движущее усилие $F_1$ в период $t_1$ согласно выражению (2а);

$$F_1 = 4600 + 7000 \cdot 0{,}7 = 9500 \ кг.$$

Из примера 3 имеем движущие усилия:

$$F_2 = 4600 \ кг; \ F_4' = 2360 \ кг; \ F_4'' = 760 \ кг.$$

Движущее усилие $F_3$ в период $t_3$;

$$F_3 = F_s - ma_3 = 4600 - 7000 \cdot 0{,}56 = 680 \ кг.$$

Сравнивая результаты данного примера с результатами примера 3, мы видим, что за счет увеличения ускорения $a_1$, обусловливающего сокра-

жение пускового периода, при сохранении без изменения всех остальных параметров тахограммы, произошло увеличение периода $t_3$ и соответственное уменьшение замедления $a_3$; вследствие этого в последний период получился переход имеющего место в примере 3 тормозного режима с отрицательным усилием $F_{b3} = -20$ *кг* в моторный режим с положительным движущим усилием $F_3 = 680$ *кг* в рассматриваемом примере 5.

Мощность $P_{s0}$, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$ (фиг. 10):

$$P_{s0} \quad F_s \quad v_1 = 4600 \quad 2 = 9200 \frac{кг.\,м}{сек} = 90 \ kW$$

Мощность $P_0$ на валу барабана в конце периода $t_0$:

$$P_0 = F_0 \quad v_1 = 8590 \cdot 2 = 17180 \frac{кг.\,м}{сек} = 168{,}4 \ kW.$$

Мощность на валу барабана в начале периода $t_1$:

$$F_1 \qquad 9500 \quad 2 = 19000 \frac{кг.\,м}{сек} = 186 \ kW$$

Мощность $P_{s1}$, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_1$:

$$P_{s1} = F \quad V = 4600 \cdot 4{,}53 = 20838 \frac{кг.\,м}{сек} = 204 \ kW$$

Мощность $P_1''$ на валу барабана в конце периода $t_1$:

$$P_1'' = F_1 \quad V = 9500 \quad 4{,}53 = 43035 \frac{кг.\,м}{сек} = 422 \ kW$$

Из примера 3 имеем мощность

$$P_2 = P_{s2} = F_2 \quad V = 20838 \frac{кг.\,м}{сек} = 204 \ kW$$

Мощность $P_3'$ на валу барабана в начале периода $t_3$:

$$P_3' = F_3 \cdot V = 680 \quad 4{,}53 = 3080 \frac{кг.\,м}{сек} = 30 \ kW$$

Мощность $P_3''$ на валу барабана в конце периода $t_3$:

$$P_3'' = F_3 \quad v_3 = 680 \quad 1{,}5 = 1020 \frac{кг.\,м}{сек} = 10 \ kW$$

Из примера 3 имеем:

мощность, обусловленную статической нагрузкой в конце периода $t_3$ в начале периода $t_4$,

$$P_{s3}'' = F_s \quad v_3 = 6900 \frac{кг.\,м}{сек} \cong 68 \ kW;$$

мощность в начале периода $t_4$

$$P_4' = F_4' \cdot v_3 = 3540 \frac{кг.\,м}{сек} = 35 \ kW;$$

мощность в конце периода $t_4$

$$P_4'' = 0.$$

На фиг. 11 наряду с тахограммой представлены диаграммы усилий мощностей для подъема, оборудованного опрокидными сосудами.

Изменение статических усилий в рассматриваемом случае носит характер, аналогичный представленному на фиг. 8.

Начальное движущее усилие $F_0'$ определяется выражением (45).

Движущее усилие в продолжение периода $t_1$ определяется из выражения (2а).

Движущие усилия $F_2$, $F_3$ ($F_{b3}$), $F_4'$ и $F''_{b4}$ определяются аналогично вышеуказанному при рассмотрении диаграммы усилий на фиг. 8, т. е. соответственно из выражений (7), (9а), * (41) и (42).

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 11.

Пример 6.

Рассчитать применительно к диаграммам на фиг. 11 элементы подъема для случая пятипериодной тахограммы, пользуясь данными примера 4. Кроме того, задаемся значением ускорения

$$a_1 = 0{,}6 \ \frac{}{сек^2}$$

С полученному в примере 4 имеем: период $t_0$ *сек*; начал ускорение $a_0 = 0{,}44 \ \frac{м}{сек^2}$

Период $t_1$ согласно выражению (50):

$$t_1 = \frac{7 \quad 2{,}2}{0{,}6} = 8 \ сек.$$

Путь $h_1$ асно выражению (51):

$$\frac{1}{2}(7 \quad 2{,}2) \quad 8 \quad 36{,}8 \ м.$$

Из примера 4 период разгрузки $t_4 = 7{,}33$ *сек*.

Период $t_2$ согласно выражению (54):

$$\frac{2(300 \quad 2 \cdot 5{,}5 - 36{,}8)}{7 - 1{,}5} \quad \frac{7 + 1{,}5}{7 \quad 1{,}5}(62 - 5 \quad 8 \quad 7{,}33);$$

$$31 \ сек.$$

Путь $h_2$ $7 \cdot 27{,}31$ $191{,}17$ *м*.

Период $t_3$ согласно выражению (53):

$$_3 = 62 \qquad 8 \quad 27{,}31$$

Путь сог выражению (37):

$$= \frac{7 + 1{,}5}{2} \ 14{,}36 \quad 61{,}03 \ м.$$

Прове выражению (55):

$$H = 2 \cdot 5{,}5 + 36{,}8 + 191{,}17 + 61{,}03 = 300$$

Замедление $a_3$ согласно выражению (39):

$$a_3 = \frac{7 - 1{,}5}{14{,}36} = 0{,}38 \frac{м}{сек^2}$$

Из примера 4 имеем замедление $a_4 = 0{,}2 \frac{м}{сек^2}$

Из примера 4 имеем также статические усилия:

$$F_{so} = 3540\ кг; \quad F_s = 2400\ кг; \quad F_{s4}'' = -740\ кг.$$

Из примера 4 начальное движущее усилие $F_0' = 5540\ кг$.
Движущее усилие конце периода $t_0$:

$$F_0'' = F_s + ma_0 = 2400 + 5000 \cdot 0{,}44 = 4600\ кг.$$

Движущее усилие $F_1$ в продолжение периода $t_1$:

$$F_1 = 2400 + 5000 \cdot 0{,}6 = 5400\ кг.$$

Движущее усилие в течение периода $t_2$:

$$F_2 = F_s = 2400\ кг.$$

Движущее уси. в период $t_3$ согласно выражению (9а).

$$F_3 = 2400 \quad 5000 \cdot 0{,}38 = 500\ кг.$$

Из примера 4 имеем движущие усилия:

$$F_4' = 1400\ кг; \quad F_4'' = F_{b4}'' \qquad 1740\ кг.$$

Из примера 4 имеем мощности, обусловленные статической нагрузкой:

$$P_{so} = F_s \cdot v_1 = 5280 \frac{кг \cdot м}{сек} \simeq 52\ kW$$

$$P_{s1} = F_s \ V = 16800 \frac{кг \cdot м}{сек} = 165\ kW$$

Мощность $P_0''$ на валу барабана в конце периода $t_0$:

$$P_0'' = F_0'' \cdot v_1 = 4600 \cdot 2{,}2 = 10120 \frac{кг \cdot м}{сек} = 100\ kW$$

Мощность $P_1'$ на валу барабана в начале периода $t_1$:

$$P_1' = F \cdot v_1 = 5400 \cdot 2{,}2 = 11880 \frac{кг \cdot м}{сек} = 116\ kW$$

Мощность $P_1''$ на валу барабана в конце периода $t_1$:

$$P_1'' = F_1 \cdot V = 5400 \cdot 7 = 37800 \frac{кг \cdot м}{сек} = 370\ kW$$

Из примера 4 мощность $P_2$ течение периода $t_2$:

$$P_2 = F \quad V \quad 16800 \frac{кг \cdot м}{сек} = 165\ kW$$

Мощность $P_3'$ на валу барабана в начале периода $t_3$:

$$P_3' = F_3 \cdot V = 500 \cdot 7 = 3500 \frac{кг \cdot м}{сек} = 34\ kW.$$

Мощность $P_3''$ в конце периода $t_3$:

$$P_3'' = F_3 \cdot v_3 = 500 \cdot 1{,}5 = 750 \frac{кг \cdot м}{сек} = 7{,}3\ kW$$

Из примера 4 имеем:

мощность, обусловленную статической нагрузкой в конце периода и в начале периода $t_4$,

$$P_{s3}'' = F_s \cdot v_3 = 2400 \cdot 1{,}5 = 3600 \frac{кг \cdot м}{сек} = 35\ kW;$$

мощность $P_4'$ в начале периода $t_4$

$$P_4' = F_4' \cdot v_3 = 1400 \cdot 1{,}5 = 2100 \frac{кг \cdot м}{сек} = 21\ kW$$

---

К пятипериодной тахограмме с постоянным ускорением в пери схода ролика с разгрузочной кривой может быть отнесена также та грамма, представленная на фиг. 12, с *параболическим* законом измене скорости в период $t_1$. Период разгрузки $t_4$ состоит из двух промежутк $t_4'$—с постоянной скоростью $v_3$, и $t_4''$—со скоростью, изменяющейся значения $v_3$ до нуля; аналогично этому период $t_0$ схода ролика с разг зочной кривой тоже разбит на два промежутка: начальный $t_0'$—с вос стающей скоростью от нуля до $v_1 > v_3$, и последующий $t_0''$—с постоян коростью $v_1$.

Период $t_0'$ может быть определен из выражения:

$$t_0' = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_0}{v_1}$$

Период $t_0''$ получается из выражения:

$$t_0'' \quad \frac{3}{4} \quad \frac{h_0}{v_1}$$

Полный период $t_0$ схода ролика с разгру кривой:

$$t_0' + t''_0 \quad \frac{5}{4} \quad \frac{h_0}{v_1}$$

Ускорение $a_0$ в период $t_0'$ определяется из выражения:

$$a_0 = \frac{v_1}{t_0'}$$

Выражение (24) для скорости в период $t_1$ в применении к тахограм на фиг. 12, как нетрудно видеть, принимает вид:

$$v = a_1 t \left(1 \quad \frac{t}{2t_1}\right) + v_1.$$

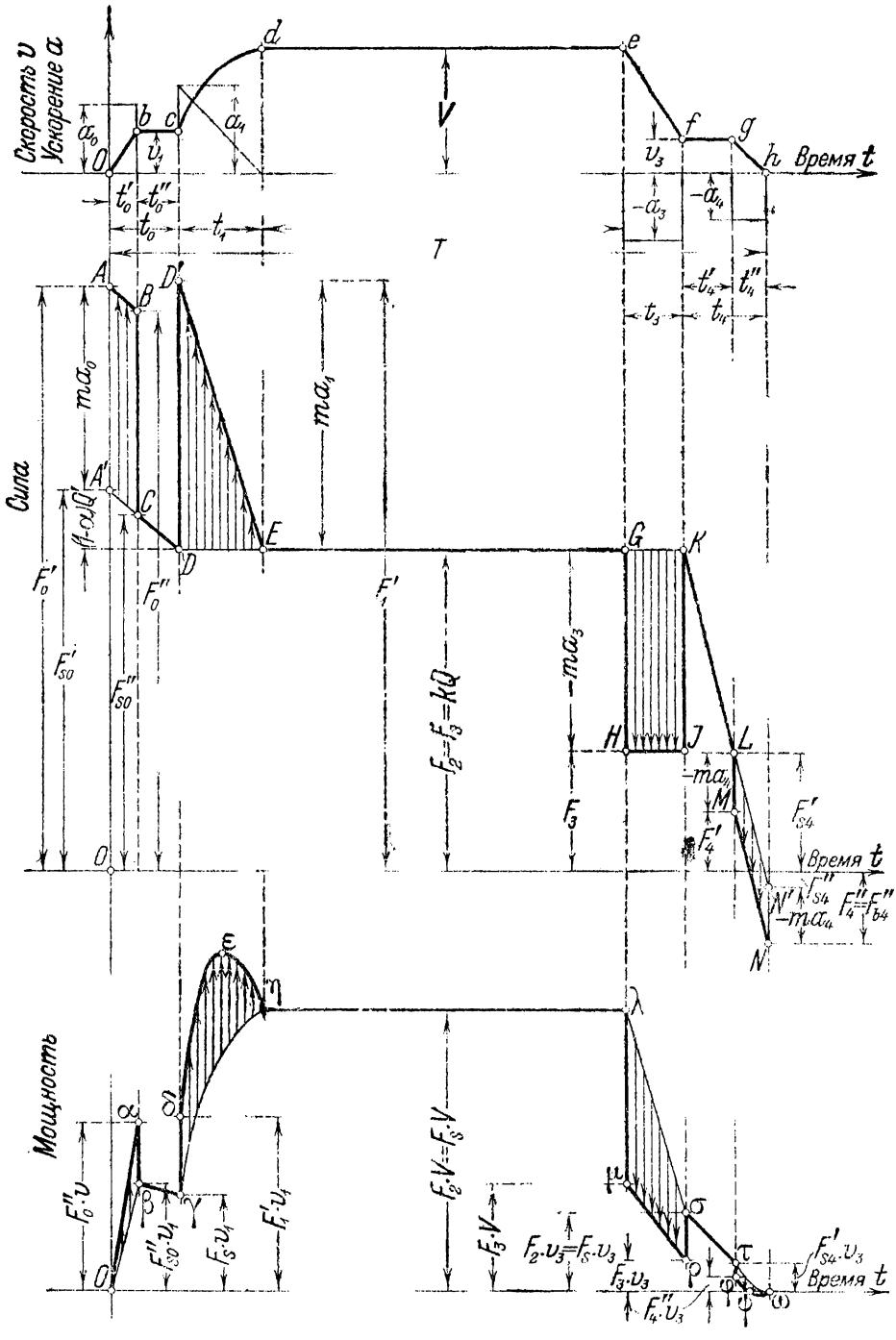
---

* В отдельных случаях может иметь место равенство: $v_1 = v_3$.

** Аналогия с выражением (47). В случае $v_1 = v_3$, период $t'_0 = t_4''$

*** Аналогия с выражением (46). В случае $v_1 = v_3$, период $t''_0 = t'_4$.

**** В случае $v_1 = v_3$, полный период $t_0$ $t_4$.




Фиг. 12. Пятипериодная тахограмма с параболической частью в период $t_1$ и с периодами $t_0$ и $t_4$, каждый из коих состоит из двух промежутков времени; соответственные диаграммы ускорений, усилий и мощностей изображены применительно к статически уравновешенной системе подъема для опрокидных сосудов при моторном замедлении в период $t_3$.

Равным образом выражение (25) для максимальной скорости $V$ в рассматриваемом случае принимает вид:

$$V=\frac{1}{2}a_1t_1+v_1. \tag{62}$$

Из последнего выражения получаем период $t_1$

$$t_1=2\frac{V-v_1}{a_1} \tag{63}$$

Выражение (28) для пути $h_1$, проходимого подъемными сосудами в период $t_1$, в данном случае принимает вид:

$$h_1=\frac{1}{3}a_1t_1^2+v_1t_1. \tag{64}$$

Периоды $t_2$ и $t_3$, также пути $h_2$ и $h_3$, определяются соответственно из выражений (54), (53), (17) и (37).

На верхней диаграмме фиг. 12 кривая *Obcdefgh* представляет закон изменения скорости за весь период подъема $T$.

В предположении опрокидного подъемного сосуда (скипа или клети), начальное статическое усилие $F_{s0}'$ (фиг. 12) определяется выражением (43); конечное значение статического усилия $F_{s4}''$ получается из выражения (44).

При наличии скипов с донной разгрузкой усилие $F_{s4}''=0{,}75\,Q$ (см. выше стр. 22).

Начальное движущее усилие $F_0'$ определяется из выражения (45), в котором $F_0=F_0'$ и $F_{s0}=F_{s0}'$.

Движущее усилие $F_0''$ в конце периода $t_0$ получается из выражения:

$$F_0''=F_{s0}''+ma_0, \tag{65}$$

где статическое усилие $F_{s0}''$ определяется из выполненной в масштабе диаграммы усилий на фиг. 12, характеризующей режим работы подъема, оборудованного опрокидными скипами.

В период $t_0''$ движущее усилие, при постоянной скорости $v_1$, должно оставаться все время равным статическому усилию за этот период, следуя неизменно за всеми его изменениями.

Движущее усилие $F_1'$ в начале периода $t_1$ определяется из выражения:

$$F_1'=F_s+ma_1. \tag{2a}$$

В продолжение периода $t_2$ движущее усилие $F_2=F_s$.

В период $t_3$ движущее усилие $F_3$ определяется из выражения (9а).*

В период $t_4'$ движущее усилие, при постоянной скорости $v_3$, остается все время равным статическому усилию за этот период, следуя неизменно за всеми его изменениями.

На диаграмме усилий фиг. 12 кривая *A'CDEGKLN'* представляет закон изменения статического усилия за весь период подъема $T$, кривая же *ABC'D'E'HJKLMN* выражает закон изменения движущего усилия за указанный период.

Значения отдельных мощностей, получаемых в виде произведений из соответственных усилий и скоростей, изображены на нижней диаграмме фиг. 12, где кривая *Oβγηλστω* представляет закон изменения мощности, обусловленной статической нагрузкой за полный период $T$, кривая же

. стр.

αβγδεηλμρστφψω выражает закон изменения мощности алу двигателя, бусловленной движущими усилиями.

Следует при этом отметить, что в периоды $t_0''$ и $t_4$, с соответственно остоянными скоростями $v_1$ и $v_3$, мощности на валу барабана в каждый омент времени равны соответственным мощностям, обусловленным ста ическими усилиями; таким образом, в период $t_0''$ указанные мощности зменяются по линии βγ, в период же $t_4'$ — по линии στ.

Необходимо также указать, что с целью построения в период $t_1$ ривой мощности δεη определение усилий для отдельных моментов вре ени этого периода получается из выполненной в определенном масштабе иаграммы усилий в виде соответственных ординат линии $D'E$; соответ ственные же значения скоростей определяются на основании выражения (61).

На фиг. 12 области действия сил инерции заштрихованы соответ ственно направленными стрелками.

Пример 7

Рассчитать применительно к диаграммам на фиг. 12 элементы подъема, борудованного опрокидными скипами, для следующих данных.
$= 365$ *м*; $Q = 10000$ *кг*; $Q' = 6000$ *кг*; $m$ 12000 *кг·м*$^{-1}$·*сек*$^2$; $T = 95$ *сек*;

$= 4{,}5$ *сек*; $h_0 = h_4 = 7{,}4$ *м*; $v_1$ $1{,}5\ \frac{м}{сек}$ $= 1{,}25$ *м* $1{,}15$.

Задаемся ускорением $0{,}8\ \frac{м}{сек^2}$

Период $t_0'$ согласно выражению (57):

$$t_0' = \frac{1}{2}\ \frac{7{,}4}{1{,}5} = 2{,}47\ сек.$$

Ускорение $a_0$ лас выражению (60):

$$\frac{1{,}5}{2{,}47} = 0{,}61\ \frac{м}{сек^2}$$

Период $t_0''$ согласно выражению (58):

$$\frac{3}{4}\ \frac{7{,}4}{1{,}5} = \quad сек.$$

Полный период $t_0$ схода ролика разгрузочной кривой, согласно ажению (59):

$$t_0 = 2{,}47 + 3{,}7 = 6{,}17\ сек.$$

Период $t_1$ согласно выражению (63):

$$t_1 = 2 \cdot \frac{4{,}5 - 1{,}5}{0{,}8} \quad 7{,}5\ сек.$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, согласно выражению (64):

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}8 \cdot 7{,}5^2 + 1{,}5 \cdot 7{,}5 = 26{,}25$$

Период $t_4'$ согл выражению (46):

$$t_4' = \frac{3}{4}\ \frac{7{,}4}{1{,}25} = 4{,}4\ сек.$$

Период $t_4$ согласно выражению (47):

$$t_4'' = \frac{1}{2} \quad \frac{7,4}{1,25} = 2,96 \text{ сек.}$$

Замедление $a_4$ в период $t_4''$ согласно выраженню (49):

$$a_4 = \frac{1,25}{3} = 0,42 \quad \frac{м}{сек^2}$$

Полный период $t_4$ разгрузки:

$$t_4 = t_4' + t_4'' = 4,4 + 3 = 7,4 \text{ сек.}$$

Период $t_2$ согласно выражению (54):

$$\frac{2\,(365 \quad 2 \cdot 7,4 - 26,25)}{4,5 - 1,25} \quad \frac{4,5 + 1,25}{4,5 - 1,25} \; (95 - 6,17 \quad 7,5 - 7,4);$$

$$t_2 = 68,6 \text{ сек.}$$

Путь $h_2$, проходимый в период $t_2$:

$$h_2 = Vt_2 = 4,5 \cdot 68,6 = 308,7 \text{ м.}$$

Период $t_3$ согласно выражению (53):

$$= 95 \; - 6,17 \qquad 68.6 - 7,4 = 5,33 \text{ сек.}$$

Путь димый в перио $t_3$, сог асно выражению (37):

$$h_3 \quad \frac{4,5 + 1,25}{2} \cdot ,33 \quad 15,32$$

Проверка:

$$H = 2 \cdot 7,4 \quad 26,25 + 308\,7 + 15,32 \quad 365,07 \cong 365 \text{ м.}$$

Замедление согл выражению (39):

$$\frac{4,5 - 1,2}{,33} \qquad 0,6 \quad \frac{}{сек^3}$$

Нач атическое усилие $F_{s0}'$ нование выражения (43)

$$F_{s0}' = 1,15 \cdot 10\,000 + (1 - 0,65) \quad 6\,000 = 13\,600 \text{ кг.}$$

Статическое усилие в конце периода $t_0'$ и в начале периода $t_0''$ ю чается из выполненной в определенном масштабе диаграммы усилий фиг 12:

$$F_{s0} = 12\,730 \text{ кг.}$$

Статическое усилие, имеющее место в продолжение времени $t_1$ $t_2$

$$F_s \quad 1,15 \cdot 10000 = 11500 \text{ кг.}$$

Статическое усилие $F_{s4}$ $t_4$ гласно выражению (44):

$$F_{s4}'' = 1,15 \cdot 10000 - [(1 - 0,65)\,6000 \quad 10000] = -600 \text{ кг.}$$

Статическое усилие в конце периода $t_4'$ начале периода $t_4$ лучается из диаграммы усилий на фиг. 12:

$$F_{s4}' \quad 4200 \text{ кг.}$$

Начальное движущее усилие:

$$F_0' = F'_{s0} + ma_0 = 13600 + 12000 \cdot 0{,}61 = 20920 \text{ кг}.$$

Движущее усилие $F_0''$ в конце периода $t_0'$:

$$F_0'' = F''_{s0} + ma_0 = 12730 + 12000 \cdot 0{,}61 \quad 20050 \text{ кг}.$$

Движущее усилие $F_1'$ в начале периода $t_1$:

$$F_1' = F_s + ma_1 = 11500 + 12000 \quad 0{,}8 = 21100 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в продолжение периода $t_2$ равно статическому усилию:

$$F_2 = F_s = kQ = 11500 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в период $t_3$:

$$F_3 = F_s - ma_3 = 11500 \quad 12000 \quad 0{,}6 = 4300 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_4''$

$$F_4' = F_{s4}' - ma_4 = 4200 - 12000 \quad 0{,}42 = 2160$$

Движущее усилие в конце периода $t_4''$:

$$F_4'' = F_{b4}'' = F_{s4}'' - ma_4 = 600 - 1200 \quad 0{,}42 \quad 2640$$

Мощность $P'_{s0}$, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_0'$ и в начале периода $t_0''$;

$$P_{s0}' = F_{s0}'' \quad v_1 = 12730 \quad 1{,}5 = 19095 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 187 \text{ kW}$$

Мощность $P_{s0}''$ обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$:

$$P_{s0}'' = F_s \quad v_1 \quad 11500 \quad 1{,}5 = 17250 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} \quad 170 \text{ kW}$$

Мощность $P_s$, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_2$:

$$P_s \quad F_s \quad V = 11500 \cdot 4{,}5 = 51750 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} \quad 507 \text{ kW}$$

Мощность $P_{s3}$ обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_3$:

$$P_{s3}'' \quad F_s \cdot v_3 \quad 11500 \cdot 1{,}25 = 14375 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} \quad 141 \text{ kW}$$

Мощность $P'_{s4}$, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_4'$ и в начале периода $t_4''$:

$$P_{s4} \quad F'_{s4} \cdot v_3 \quad 4200 \cdot 1{,}25 = 5250 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 51{,}5 \text{ kW}$$

Мощность $P_0''$ на валу барабана в конце периода $t$

$$P_0'' = F_0'' \cdot v_1 = 20050 \cdot 1{,}5 = 30075 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 300 \text{ kW}$$

Мощност $P_1$ вал барабана в начале периода $t_1$:

$$F_1 \cdot v_1 = 21100 \cdot 1{,}5 = 31650 \frac{кг.\ м}{сек} = 310\ kW$$

Мощность на вал барабана в продолжение периода $t_2$ равна мощ обусловленной статической нагрузкой в этот период:

$$F_2 V \quad F_s\ V \quad 51750 \frac{кг.\ м}{сек} = 507\ kW$$

Мощность $P_3'$ на валу барабана в начале периода $t_3$.

$$430 \cdot 4{,}5 = 19350 \frac{кг.\ м}{сек} = 190\ kW$$

Мощнос барабана конце периода $t_3$:

$$F_3 \cdot v_3 \quad 4300 \cdot 1{,}25 = 5375 \frac{кг.\ м}{сек} = 53\ kW.$$

Мощность $P_4'$ барабана в начале периода $t_4''$:

$$P_4' = F' \quad = 2160 \cdot 1{,}25 = 2700 \frac{кг.\ м}{сек} = 26\ kW.$$

## 4. Пятипериодная тахограмма с возрастающим ускорением в период $t_0$

На фиг 13 изображены диаграммы, характеризующие работу подъ ма, оборудованного опрокидными сосудами, для случая постоянного движущего усилия $F_1$ в течение всего периода пуска $(t_0 + t_1)$; в результате этого скорость в продолжение периода $t_0$ схода ролика с разгрузочной кривой будет изменяться по кривой $O\omega$, ориентировочно принимаемой за *параболу,* следствием чего явится возрастание пускового ускорения в период $t_0$ по прямой линии $mn$ от начального значения $a_0$ до величины $a_1$, остающейся постоянной в течение периода $t_1$. Уравнение параболы $O\omega$ имеет вид

$$a_0 t \quad \frac{a_1 \quad a_0}{2t_0} t^2. \tag{66}$$

Задаваясь величиной начального ускорения $a_0$, можем получить значение постоянного движущего усилия $F_1$ из выражения:

$$F_1 \quad kQ \quad (1 \quad \alpha)\, Q' + ma_0. \tag{67}$$

$F$ дно получить величину ускорения из выражения:

$$\frac{F_1 - kQ}{m} \tag{3}$$

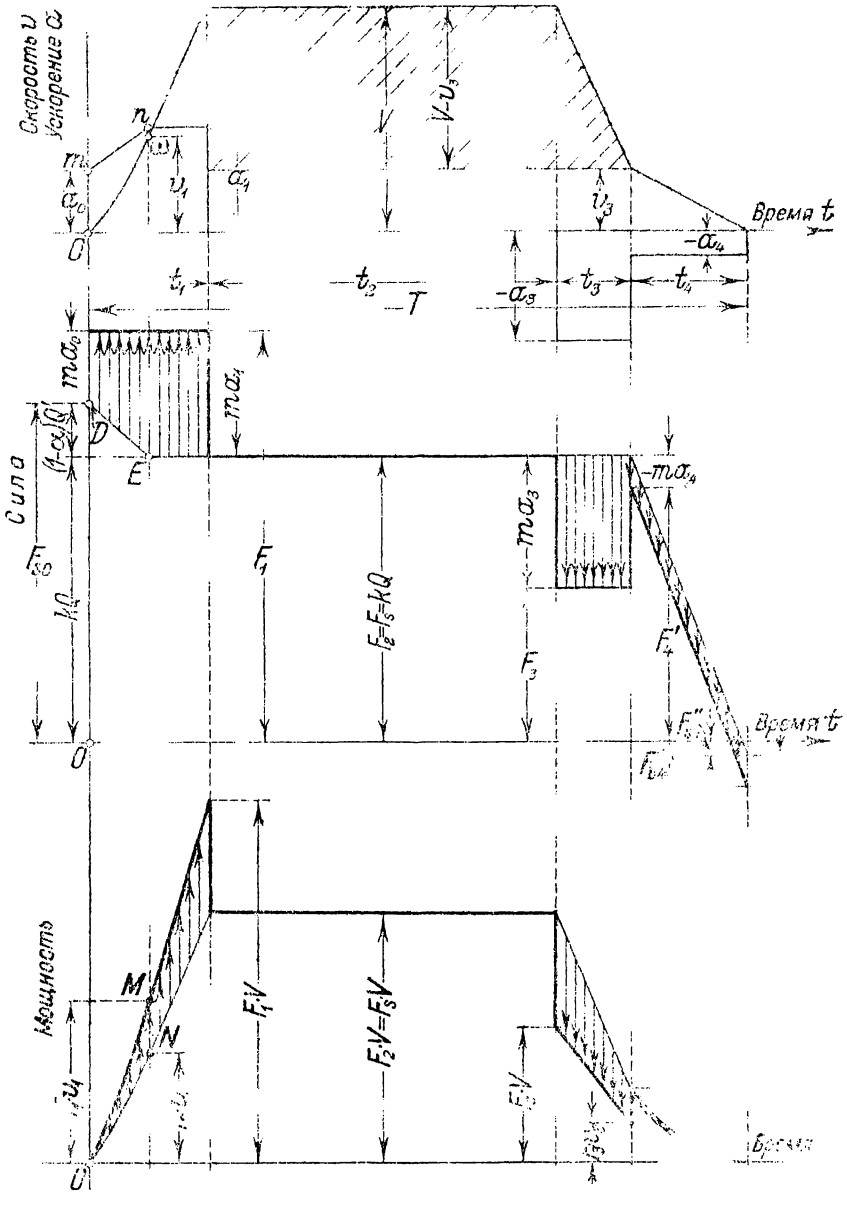
Можно также иным путем, а именно, задавшись величиной рения $a_1$, опре постоянное движущее усилие $F_1$ из выражения:

$$F_1 = kQ + ma_1. \tag{2a}$$

А. П. Герман . Н. Шкляр ск . „Рудничные подъемные установки" Час I, стр. 135. 1940.

Зная $F_1$, величину начального ускорения можно по... из выражения:

$$F_1 \quad [kQ \quad (1 \quad \alpha) Q'] \qquad (68)$$
$$m$$




Фиг. 13. Пятипериодная тахограмма с параболической частью в пери... и соответствующие ей диаграммы ускорений, усилий и мощностей статически уравновешенной системы подъема с опрокидными сосу... при моторном замедлении в период $t_3$.

При известной величине разгрузочного ... перно мож... определен из выражения:*

* Ibidem, ... 1...

$$t_0 = \sqrt{\frac{6h_0}{2a_0 + a_1}} \qquad (69)$$

Ск конце периода $t_0$ определяется из выражения (66) при $t_0$.

$$v_1 = \frac{a_0 + a_1}{2} t_0. \qquad (70)$$

Что касается остальных параметров тахограммы, представленной на фиг. 13, то таковые определяются согласно методу, примененному к тахограммам на фиг 10 и 11.

Пример 8.

Применительно к диаграммам на фиг. 13 рассчитать элементы подъ оборудованного опрокидными скипами для следующих данных.

365 *м*· $Q$ 10000 *кг*; $Q' = 6000$ *кг*; $m = 12000$ *кг*·*м*$^{-1}$·*сек*$^2$; $T = 100$ *сек*;

$V$ 4,5 $\frac{м}{сек}$ $h_0 = h_4 = 7{,}4$ *м*; $v_3 = 1{,}25 \frac{м}{сек}$; $k = 1{,}15$.

Задаемся величиной начального ускорения

$$a_0 = 0{,}25 \frac{м}{сек^2}$$

Согласно выражению (67) получаем величину постоянного движу- усилия $F_1$:

$$F_1 = 1{,}15 \cdot 10000 + (1 - 0{,}65)\, 6000 + 12000 \cdot 0{,}25;$$

$$F_1 = 16600 \text{ кг}.$$

Из выра ения (3) получаем ускорение $a_1$:

$$a_1 = \frac{16600 - 1{,}15 \cdot 10000}{12000} = 0{,}425 \frac{м}{сек^2}$$

Период $t_0$ из выражения (69):

$$t_0 = \sqrt{\frac{6}{2 \cdot 0{,}25 + 0{,}425}} \cong 6 \text{ сек}.$$

Значения скоростей для отдельных моментов периода $t_0$ получаются основании выражения (66).

Из выражения (70) скорость $v_1$ в конце периода $t_0$:

$$v_1 = \frac{0{,}25 + 0{,}425}{2} \cdot 6 \cong 2 \frac{м}{сек} < 2{,}5 \frac{м}{сек}$$

Согласно выражению (50) период $t_1$:

$$t_1 = \frac{4{,}5 - 2}{0{,}425} \cong 6 \text{ сек}.$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, согласно выражению (51):

$$h_1 = \frac{1}{2}(4{,}5 + 2) \cdot 6 = 19{,}5 \text{ м}.$$

Период разгрузки $t_4$ из выражения (36):

$$t_4 = \frac{2 \cdot 7{,}4}{1{,}25} = 11{,}84 \text{ сек.}$$

Период $t_2$ согласно выражению (54):

$$= \frac{2\,(365 \quad 2 \quad 7{,}4 \quad 19{,}5)}{4{,}5 \quad 1{,}25} - \frac{4{,}5 + 1{,}25}{4{,}5 - 1{,}25}\,(100 - 6 - 6 \quad 11{,}84);$$

$$t_2 = 68{,}76 \text{ сек.}$$

Путь $h_2 = 4{,}5 \quad 68{,}76 = 309\,42$ м.

Период $t_3$ согласно выражению (53):

$$t_3 \quad 100 - 6 - 6 - 68{,}76 \quad 11{,}84 = 7{,}4 \text{ сек.}$$

Путь $h_3 \quad \frac{4{,}5 + 1{,}25}{2} \quad 7{,}4 = 21{,}27$

Проверка;

$$H \quad 2 \quad 7{,}4 + 19{,}5 + 309{,}42 + 21{,}27 \quad 364{,}99 \sim 365 \text{ м.}$$

Замедление $\frac{4{,}5 - 1{,}25}{7{,}4} = 0{,}44 \frac{м}{сек^2}$

Замедление $a_4 = \frac{1{,}25}{11{,}84} = 0{,}1 \frac{м}{сек^2}$

Начальное статическое усилие $F_{s0}$ согласно выражению (43):

$$F_{s0} = 1{,}15 \quad 10000 + (1 \quad 0{,}65) \quad 6000 \quad 13600 \text{ кг.}$$

Статическое усилие $F_s$ в продолжение времени $t_1 + t_2 + t_3$

$$F_s \quad 1{,}15 \quad 10000 = 11500 \text{ кг.}$$

Статическое усилие $F_{s4}''$ в конце периода $t_4$ согласно выражению (44)

$$F_{s4}'' = 1{,}15 \quad 10000 \quad [(1 - 0{,}65)\,6000 + 10000] = -600 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в продолжение периода $t_2$ равно статическому усилию:

$$F_2 = F_s = 11500 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в период $t_3$:

$$F_3 = F_s - ma_3 = 11500 - 12000 \quad 0{,}44 = 6220 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$:

$$F_4' = F_s - ma_4 = 11500 - 12000 \quad 0{,}1 = 10300 \text{ кг.}$$

Тормозное усилие в конце периода $t_4$:

$$F_{b4}'' = -600 - 12000 \cdot 0{,}1 = -1800 \text{ кг.}$$

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$:

$$P_{s0} = F_s \cdot v_1 = 11500 \cdot 2 = 23000 \frac{кг.\,м}{сек} = 225{,}5 \text{ kW.}$$

Здесь следует отметить, что при построении на фиг. 13 кривой мощности $ON$ в период $t_0$ необходимые статические усилия для отдельных моментов времени этого периода получены из выполненной в масштабе диаграммы усилий в виде ординат линии $DE$; соответственные значения скоростей определены на основании выражения (66).

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в продолжение периода $t_2$:

$$F \quad V \quad 11500 \quad 4{,}5 \quad 51750 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 507\ kW.$$

Мощность, татической нагрузкой в ериода нача

$$1{,}25 \quad 14375 \frac{кг.\ м}{сек} = 141\ kW$$

Мощ барабана в конце периода $t_0$ и в на периода

$$P_1'' \quad F \quad 16600 \quad 3200 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 325{,}5\ kW$$

Ординаты кривой мощности $OM$ на валу барабана для отдельных моментов времени периода $t_0$ (фиг. 13) получены умножением постоянного усилия $F_1$ на соответственные значения скоростей, определяемые на основании выражения (66).

Мощность лу барабана в конце периода

$$P_1'' \quad F_1 \quad V \quad 16600 \cdot 4{,}5 = 74700 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 732\ kW$$

на барабана продолжение периода $t_2$:

$$P_2 = P_3 = 51750 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 507\ kW$$

Мощнос ача ериода

$$V \quad 6220 \quad 27990 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 274\ kW$$

Мощность барабана конце периода $t_3$:

$$P \quad F \quad v_3 = 6220 \quad ,25 \quad 7775 \frac{кг.}{сек} = 75\ kW$$

Мощность

$$P_4' = F \quad 10300 \quad ,25 = 12875 \frac{кг.\ м}{сек} = 126\ kW$$

## III. СИСТЕМА С ТЯЖЕЛЫМ ХВОСТОВЫМ КАНАТОМ

Поскольку дъем тяжелым хвостовым канатом на практике по чил преимущественное распространение при системе Кепе, которая применяется при скипах и опрокидных клетях, то в данном случае рассмотрению подлежит лишь трехпериодная тахограмма, имеющая место при обыкновенных клетях. Следует также отметить, что при наличии подъема истемы Кепе, обслуживаемого электрическим приводом, на практике и

нашла применения двухпериодная тахограмма встречающаяся при паровом подъеме. *

## А. ТАХОГРАММА С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ БОКАМИ

Рассмотрим условия, наличие которых является необходимым для осуществления тахограммы с прямолинейными боками.

а) Для периода пуска изменение скорости $v$ по прямой линии требует постоянства кового ускорения $\frac{dv}{dt}$ Принимая внимание,

проходимый при этом уравнение (1а) р

сматривае периода пред авить дующем вид

$$F \quad kQ \quad \delta(H \quad a_1 t^2 \quad var \tag{71}$$

где $F$ — переменное движущее усилие окружности барабана.

Выражение (71) показывает, что получения постоянного пускового ускорения $a_1$, обусловливающего изменение скорости $v$ по прям необходимо, чтобы движущее усилие $F$ змеялось в функции времен по *параболе*, обращенной оси времен своею выпуклостью.

В начале движения, при $t \quad 0$, выражение (71) принимает

$$F_1' = kQ \quad H \quad ma_1. \tag{72}$$

При $t = t_1$ (71) принимает

$$F \quad \delta(H \quad a_1 t_1^2) \tag{73}$$

или

$$F_1'' \quad kQ \quad \delta(H - 2h_1) \quad ma_1, \tag{3а}$$

где $a_1 t_1^3$ — проходимый ечение

рнода $t_1$.

Переменная татическая сила сопротивления $F_s$, обусловленная лезным грузом, вредными сопротивлениями и неуравновешенными частями канатов, определяется для периода пуска нижеследующим уравнением *параболы*, параллельной параболе, выражаемой уравнением (71):

$$F = kQ \quad \delta(H \tag{74}$$

Наименьшее значение статичес в начале подъема при $t \quad 0$:

$$F \quad F_{s1}' = kQ \quad \delta H. \tag{75}$$

В усил может

$$F = F \tag{2а}$$

---

Рассмотрение хпериодной тахограммы при товом канате по стоянным движущим усилием в период $t_1$ произведено ра „Горная электромеханика" Том II. „Рудничный электрический подъем" „Физико-механические основы", тр. 30—33, 1937

** В рассматриваемом случае исследование основано на применении динамики, согласно которому по данной форме движения определяются силы.

***) М. М. Федоров. „Теория и расчет гармонического рудничного подъема", 116. 1914.

При $t = t_1$ выражение (74) принимает вид:

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ - \delta (H - a_1 t_1^2), \tag{76}$$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ - \delta (H \quad 2h_1). \tag{76a}$$

В связи с этим выражение для движущего усилия $F_1''$ в конце периода $t_1$ может быть представлено в следующем виде:

$$F_1'' = F_{s1}'' + ma_1. \tag{73b}$$

Мощность $P$ [illegible] условленная движущим усилием $F$

$$P = F \quad v, \tag{77}$$

где [illegible] усилие $F$ [illegible] определяется выражением (71), скорость $v$ получ[illegible] выражения:

$$v = a_1 t. \tag{4}$$

При $t$ [illegible] $P_1' = F_1' \quad 0 = 0$.
При $t$ [illegible] выражение (77) принимает вид:

$$P_1'' = F_1'' \quad V. \tag{78}$$

Мощность $P_s$, затрачиваемая на преодоление [illegible]атических сопроти-

$$P_s = F_s \quad v, \tag{79}$$

[illegible]ила $F$ определяется выражением (74), скорость $v$ выражением (4).
При $t = 0$, $P'_{s1} = F'_{s1} \quad 0 = 0$.
При $t = t_1$ выражение (79) принимает вид:

$$P''_{s1} = P'_{s2} = F_{s1}'' \quad V = F'_{s2} \quad V \tag{80}$$

Выражения (77) и (79) представляют уравнения кубических парабол, [illegible]бращенных выпуклостью к оси времен, что становится очевидным, если указанные выражения вместо величин $F$, $F_s$ и $v$ подставить их значения, определяемые соответственно выражениями (71), (74) и (4).

b) Для периода равномерного хода скорость $v = V$ const; следовательно $\frac{dv}{dt} = 0$; ввиду этого уравнение (1a) принимает вид:

$$F = F_s = kQ - \delta (H - 2x), \tag{81}$$

[illegible]движущее [illegible]илие, равное статическому усилию $F_s$.

В последнем выражении пройденный клетями путь к концу [illegible]ассматриваемого промежутка времени:

$$x = h_1 + Vt, \tag{82}$$

[illegible] путь, пройденный в течение периода пуска $t_1$; $V$—по[illegible]стоянная [illegible] период полного хода $t_2$ скорость; $t$—время, удовлетворяющее условию: $t < t_2$.

Выражение (81), представляющее уравнение прямой линии, опреде[illegible] закон изменения в период $t_2$ движущего усилия $F$, которое, оста[illegible] течение всего этого периода равным статическому усилию $F_s$, неуклонно следовать за всеми его изменениями, в противном [illegible]рушилось бы условие равномерного движения.

При $t = 0$ путь $x = h_1$; в связи с этим выражение (81) принимает вид:

$$F_2' = F_{s2}' = kQ - \delta(H - 2h_1). \tag{83}$$

При $t = t_2$ выражение (81) принимает вид:

$$F_2'' = F_{s2} = kQ - \delta(H - 2h_1 \quad 2h_2), \tag{84}$$

где проходимый в период $t_2$ путь $h_2 = Vt_2$.
Или

$$F_2'' = F_{s2}'' = F_{s2}' + 2\delta h_2. \tag{84а}$$

Мощность $P$, обусловленная движущим усилием и равная в период равномерного хода мощности $P_s$, затрачиваемой на производство подъема полезного груза, включая вредные сопротивления, определяется из выражения:

$$P = P_s = F \quad V = F_s \quad V, \tag{85}$$

где усилие $F = F_s$ получается из выражения (81).
Выражение (85) представляет уравнение прямой линии.
При $t = 0$ выражение (85) принимает вид:

$$P_2' = P_{s2}' = F_2' \quad V = F'_{s2} \quad V \tag{86}$$

При $t = t_2$ выражение (85) принимает вид:

$$P_2'' = P_{s2}'' \quad F_2'' \quad V = F_{s2}'' \quad V \tag{87}$$

в) Для периода останова изменение скорости $v$ по прямой линии требует постоянства величины замедления $a_3$. Выражение скорости при этом имеет вид:

$$v = V \quad a_3 t, \tag{88}$$

где

$$0 < t < t_3.$$

Дифференцируя уравнение (88), получаем величину замедления:

$$\frac{dv}{dt} = -a_3.$$

Принимая во внимание последнее выражение для замедления, уравне-(1а) можно представить в следующем виде:

$$F = kQ - \delta(H - 2x) - ma_3, \tag{89}$$

где пройденный клетями путь $x$, считая от начала подъема,

$$x = h_1 + h_2 + Vt - \frac{1}{2}a_3 t^2. \tag{90}$$

В последнем выражении $h_1 = \frac{1}{2}a_1 t^2$; $h_2 = Vt_2$. Что касается времени $t$, должно удовлетворять вышеуказанному условию:

$$0 < t < t_3.$$

При $t = 0$ выражение (89) принимает вид:

$$F_3' = kQ - \delta(H - 2h_1 - 2h_2) - ma_3. \tag{91}$$

Принимая во внимание, что статическое усилие $F_{s2}''$ в конце период $_2$ равно статическому усилию $F_{s3}'$ в начале периода $t_3$, выражение для $F_3'$ можем представить также в следующем виде:

$$F_3' = F_{s2}'' - ma_3 = F_{s3}' - ma_3. \qquad (91a$$

Выражение (89) показывает, что движущее усилие $F$ на окружност барабана в период замедления изменяется в функции времени по закон ***параболы***, обращенной к оси времен своей вогнутостью.

Здесь необходимо отметить, что усилие $F$, определяемое выраже нием (89), может иметь как положительное, так и отрицательное значе ние; в последнем случае получается тормозной режим, при котором тор мозное усилие изменяется согласно выражению (89) по параболе, обра щенной к оси времен своей выпуклостью.

При этом может случиться, что изменяемое по параболе ус в течение периода $t_3$ перейдет из области отрицательных значений об ласть положительных значений; если подобный переход указанного уси лия чере нуль произойдет точно в середине периода $t_3$, то получаемы при этом ***тормозно-моторный*** режим окажется практически наиболе близким к режиму свободного выбега, точное осуществление которог при постоянной величине замедления явл тся невыполнимым.

Статическое усилие $F_s$ определяетс выражения:

$$F_s = kQ - \delta(H - 2x), \qquad (92$$

где путь $x$ имеет значение, определяемое ыражением (90).

Выражение (92) представляет уравнение ***параболы***, параллельной раболе, определяемой выражением (89).

При $t = 0$, выражение (92) принимает

$$F_{s} = kQ - \delta(H - 2h_2). \qquad (84a$$

Наибольшее значение усилия $F_s$ чается конце перио ления, при $x = H$:

$$F_{s} \quad \delta H \qquad (9$$

В связи этим движущее $F$ перио представлено следующем виде:

$$F_3'' \quad F_{s} \quad ma_3 = kQ + \delta H \qquad (9$$

Мощность $P$, обус движущим усилие риод замедления:

$$F \qquad (77a$$

движущее усилие $F$ определяется выраж (89) и (90), $v$ получается на основании выражения (88).

При $t=0$ выражение (77а) принимает

$$P' \quad V \qquad (9$$

При $t \quad t_3$, $P_3'' = F_3 \quad 0 = 0$.

Мощность $P_s$, обусловленная статической ершение дъем

$$= F \qquad (79a$$

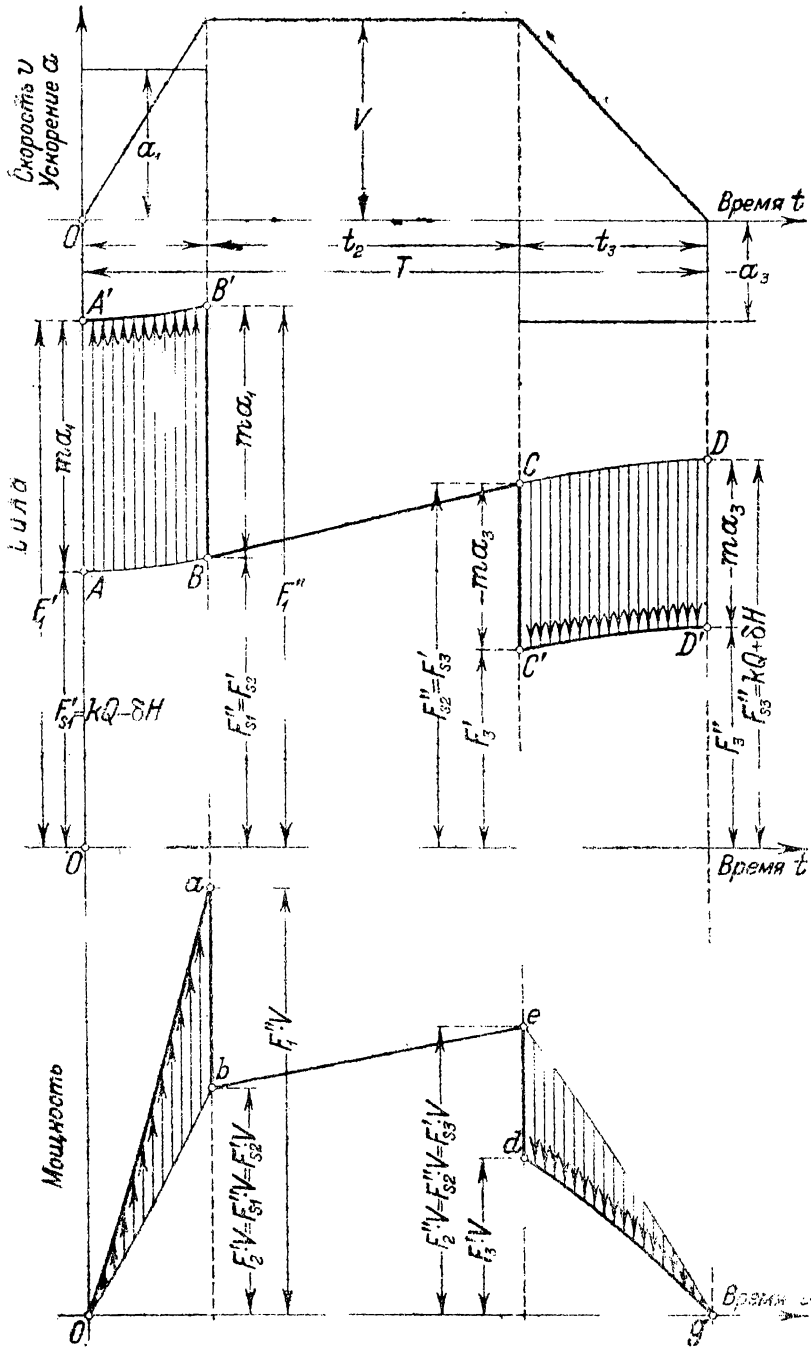
где усилие $F_s$ определяется на основании выражений (92) (90), ско рость $v$ получается из выражения (88).

При $t = 0$ выражение (79а) принимает вид:

$$_3 = F_{s3} \cdot V. \qquad (9$$

При $t = t_3$, $P_{s3}'' = F_{s3}''$ $0 = 0$.

Выражения (77а) и (79а) представляют уравнения кубических парабол, обращенных к оси времен своею вогнутостью. Исключение соста-




Фиг. 14. Трехпериодная тахограмма при постоянных ускорениях в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при моторном замедлении с переменным усилием в период $t_3$.

вляет мощность, обусловленная тормозным усилием, которая изменяется по кубической параболе, обращенной к оси времен своей выпуклостью.

Диаграммы на фиг. 14 характеризуют работу подъема с тяжелым хвостовым канатом при наличии *моторного* замедления, а на фиг. 15— при условии *тормозного* режима в период $t_з$, для случая тахограмм прямолинейными боками.

На фиг. 14 статическое усилие в период пуска изменяется по *параболе AB*, в период полного хода—по прямой *BC*, в период замедления—*параболе CD*.

Движущее усилие в период $t_1$ изменяется по *параболе A'B'*, параллельной параболе *AB*, в период $t_2$—по прямой *BC*, в период $t_3$—по *параболе C'D'*, параллельной параболе *CD*. Таким образом, движущее усилие за весь период подъема *T* изменяется по линии *A'B'BCC'D'*

Мощность, обусловленная статической нагрузкой, в период $t_1$ изменяется по кубической параболе *Ob*, в период $t_2$—по прямой *be*, в период $t_3$—по кубической параболе *eg*. Мощность, обусловленная движущим усилием, в период $t_1$ изменяется по кубической параболе *Oa*, в период $t_2$—по прямой *be*, в период $t_3$— по кубической параболе *dg*. Мощность, обусловленная движущим усилием, в течение всего периода подъема *T* изменяется по линии *Oabedg*.

На фиг. 15 движущее усилие за время $(t_1+t_2)$ изменяется по линии $A'B'BCC_0$; тормозное усилие в течение периода $t_3$ изменяется от значения $F_{b3}'$ до величины $F_{b3}''$ по параболе *C'D'*

Мощность, обусловленная движущим усилием, в течение времени $(t_1+t_2)$ изменяется по линии $Oabee_0$; мощность, обусловленная тормозным усилием, в течение периода $t_3$ изменяется по кубической параболе $e'g$.

На основании изложенного заключаем, что для осуществления тахограммы с прямолинейными боками необходимо: 1) в период пуска изменение движущего усилия в функции времени по закону *параболы* 2) в период замедления изменение по закону *параболы* движущего усилия или тормозного усилия.

Что касается режима свободного выбега в период замедления, то точное осуществление такового при прямолинейном изменении скорости невыполнимо.

Определение параметров тахограммы с прямолинейными боками для системы с тяжелым хвостовым канатом производится по методу, приведенному выше для статически уравновешенной системы, согласно выражениям (14)...(21).

Пример 9.

Пользуясь данными примера 1, определить элементы подъема применительно к диаграммам на фиг. 14. * Кроме того, дано: $\delta=1{,}5\ \frac{кг}{м}$

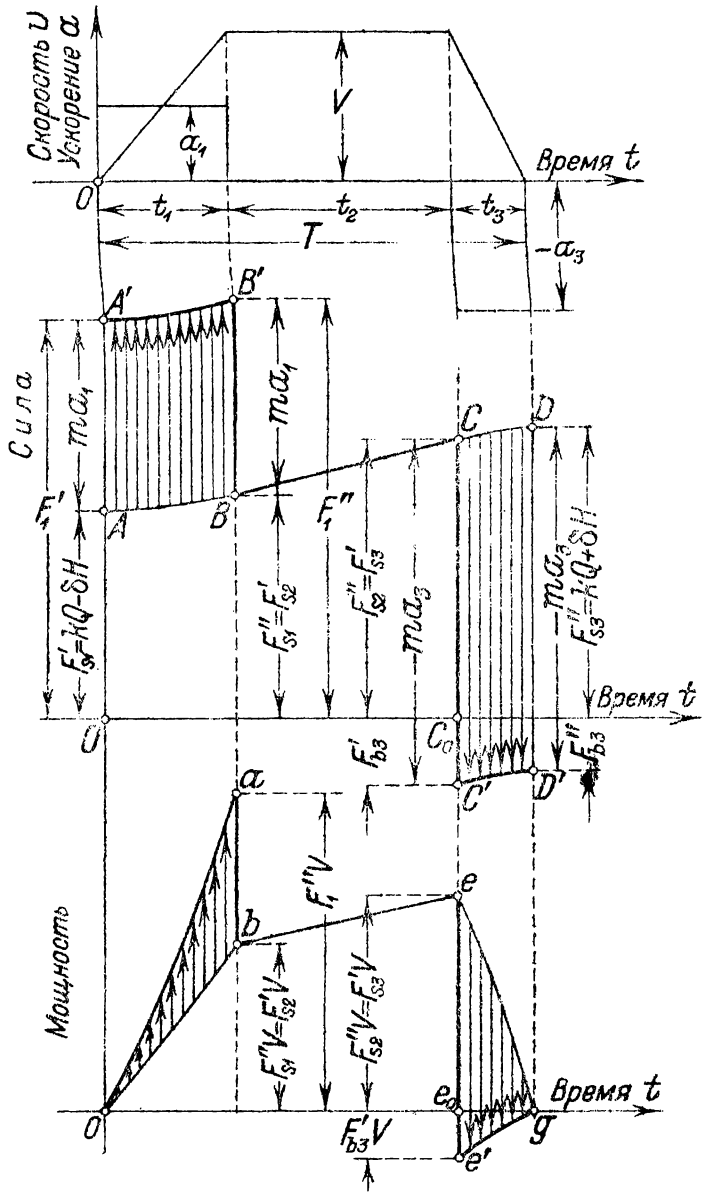
Из примера 1 имеем параметры тахограммы:

---

* Некоторым увеличением приведенной массы *m* при системе с тяжелым хвостовым канатом пренебрегаем.

$a_1 = 0{,}8\ \frac{м}{сек^2}$; $t_1 = 10$ *сек*; $h_1 = 40$ *м*; $t_2' = 25$ *сек*.

$h_2 = 200$ *м*; $t_3 = 15$ *сек*; $h_3 = 60$ *м*; $a_3$ $0{,}53\ \frac{м}{сек^2}$




Фиг. 15. Трехпериодная тахограмма при постоянных ускорениях в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при тормозном замедлении с переменным усилием в период $t_3$.

Начальное статическое усилие $F_{s1}'$ согласно выражению (75

$$F_{s1}' = 1{,}2 \quad 2200 - 1{,}5 \quad 300 = 2190\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$ согласно выражениям (76) и (76a):

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = 1{,}2 \cdot 2200 - 1{,}5(300 - 0{,}8 \quad 10^2) =$$

$$1{,}2 \quad 2200 - 1{,}5(300 - 2 \cdot 40) = 2310 \ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ согласно выражениям (84) и (84a):

$$F'' = F_{s2}' = 1{,}2 \cdot 2200 - 1{,}5(300 - 2 \cdot 40 - 2 \cdot 200) = 2310 + 2 \cdot 1{,}5 \cdot 200 = 2910 \ кг$$

Статическое усилие в конце периода $t_3$ согласно выражению (93):

$$F_{s3}'' = 1{,}2 \quad 2200 + 1{,}5 \cdot 300 = 3090 \ кг.$$

Начальное движущее усилие $F$ согласно выражению (72a):

$$F_1' = 2190 \quad 2500 \quad 0{,}8 = 4190 \ кг.$$

Движущее усилие $F_1''$ конце периода $t_1$ согласно выражению (73b):

$$F_1'' = 2310 + 2500 \cdot 0{,}8 = 4310 \ кг.$$

Движущее усилие в начале периода $t_2$:

$$F_2' = F_{s2}' \quad 2310 \ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_2$:

$$F \qquad F_{s2} = 2910$$

Движущ период $t_2$ выражению (91a):

$$F_2' = 2910 \quad 2500 \cdot 0{,}53 = 1585 \ кг.$$

Движущее усилие конце период $t_3$ согласно выражению (94):

$$F_3'' \quad 3090 \quad 2500 \quad 0{,}53 = 1765 \ кг.$$

Мощность, обусловленная статическим усилием конце периода $t_1$ начале периода $t_2$ согласно выражению (80):

$$P_{s1}'' \quad P_{s2}' \quad 2310 \quad 8 = 18480 \frac{кг.\ м}{сек} = 181 \ kW.$$

Мощность, обусловле движущим усилием в конце периода $t_1$, согласно выражению (78):

$$P_1'' = 4310 \quad 8 = 34480 \frac{кг.\ м}{сек} = 338 \ kW$$

Мощность начале периода $t_2$ согласи выраже (86):

$$P_2' \quad P_{s2} \quad 2310 \quad 8 = 18480 \frac{кг.\ м}{сек} = 181 \ kW$$

Мощность конце периода $t_2$ согласно выражению (87):

$$P_2'' \quad P_{s2}'' = 2910 \quad 8 = 23280 \frac{кг.\ м}{сек} = 228 \ kW$$

Мощность, обусловленная движущим усилием в начале периода $t_3$ гласно выражению (95):

$$P_3' = 1585 \quad 8 = 12680 \frac{кг.\ м}{сек} = 124 \ kW.$$

## В. ТАХОГРАММА С ВЫПУКЛЫМИ БОКАМИ

Рассмотрим режим подъема при *постоянном движущем усилии* в период пуска $F_1 > F_{s1}''$, где $F_{s1}''$ статическая сила сопротивления в конце периода $t_1$, обусловленная полезным грузом, вредными сопротивлениями и неуравновешенными частями канатов.

Уравнение динамического равновесия (1b) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} \quad \frac{2\delta}{m} x \qquad F_1 \quad \frac{\delta H \quad kQ}{m} \tag{1c}$$

Решая уравнение, получа общий интегра

$$\frac{\delta H - kQ}{2\delta} \quad C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) \quad C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right)$$

$C_1$ и $C_2$ произвольные постоянные.

При $t$ 0, $x = 0$; следовательно,

$$C_1 = \quad F \quad \frac{\delta H \quad kQ}{2\delta}$$

Подставляя в выражение для $x$ ение $C_1$,

$$= F \quad \frac{\delta H - kQ}{2\delta}\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right)\right] \quad C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right)$$

Дифференцируя последнее получаем скорость движения емных сосудов:

$$\frac{dx}{dt} \quad \frac{\delta H - kQ}{\sqrt{2\delta m}} \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) + C_2 \sqrt{\frac{2\delta}{m}} \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right.$$

Величину $C_2$ определим условия, $t = 0$, $v = 0$; следовательно, $C_2 = 0$.

Таким обр ойденный подъемными сосудами путь:

$$F_1 + \delta H \quad - kQ\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right)\right] \tag{97}$$

Путь пройденный подъемными сосудами в течение периода можем определить из выражения (97), полагая в нем $t = t_1$

$$h_1 \quad \frac{F_1 + \delta H - kQ}{2\delta}\left[ \quad \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_1\right)\right] \tag{98}$$

$$\frac{F_1 \quad \delta H \quad kQ}{\sqrt{2\delta m}} \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) \tag{99}$$

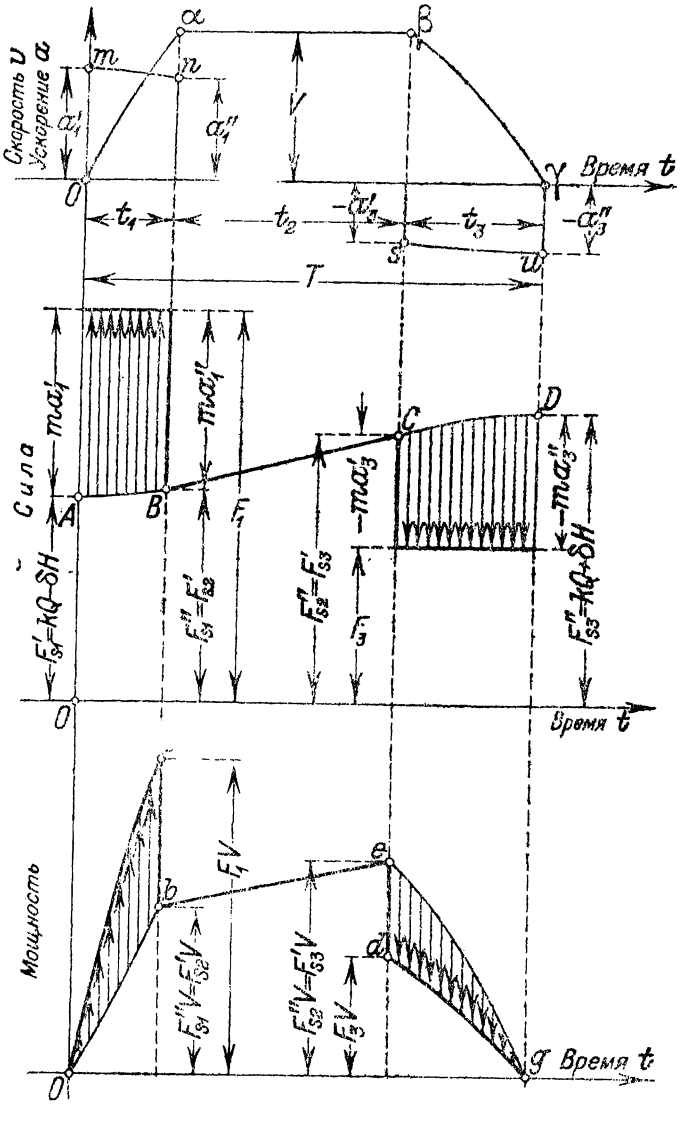
Уравнение (99) выражает для системы с тяжелым хвостовым канатом закон изменения скорости $v$ в зависимости от времени $t$ в период пуска при постоянном движущем усилии $F_1$. На фиг. 16 указанная скорость изменяется по синусоиде $O\alpha$.

---

* Выражения (97) и (99) выведены акад. М. М. Федоровым в его труде „Теория и расчет гармонического рудничного подъема". стр. 18 и 19. 1914.

В конце периода $t_1$ скорость $v$ получает максимальное значение $V$, определяемое выражением:

$$V = \frac{F_1 + \delta H - kQ}{\sqrt{2\delta m}} \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_1\right) \qquad (100)$$




Фиг. 16. Трехпериодная тахограмма с выпуклыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону косинуса, в периоды $t_1$ и $t_3$ диаграммы усилий и мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при моторном замедлении с постоянным усилием $F_3$ период $t_3$.

Из последнего выражения получаем значение движущего усилия $F_1$ функции периода $t_1$:

$$F_1 = kQ - \delta H + \frac{V\sqrt{2\delta m}}{\sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_1\right)} \qquad (101)$$

Реша уравнение (100) относительно $t_1$ получаем:

$$\sqrt{\frac{m}{2\delta}} \arcsin \frac{V\sqrt{2\delta m}}{F_1 + \delta H - kQ} \qquad (102)$$

Ускорение пуска

$$a_1 \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F_1 + \delta H - kQ}{m} \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) = var \qquad (10$$

Наибольшее значение ускорения $a_1$ получается в нач при $t = 0$:

$$a_{1\,(\max)} = a_1' = \frac{F_1 + \delta H - kQ}{m} \qquad (104)$$

На фиг. 16 ускорение пуска изменяется от значения $a_1$ по косинусоиде $mn$.

Из выражения (104) получаем ачание движ в функции начального ускорения $a_1'$:

$$F_1 = (kQ - \delta H) + ma_1' \qquad (10$$

На основании выражения (104) величина ускорс ме представлена следующим образом:

$$a_1 = a_1' \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) \qquad (10$$

Равным образом, на основании выражения (104) уравнение ) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\delta}{m} x \qquad (10$$

Статическая ила сопротивления $F_s$ опре я из ния

$$F_s = kQ - \delta(H \quad 2x). \qquad (9$$

Подставляя в последнее выражение вместо $x$ его зн з ура (97), получаем:

$$F_s = F_1 \quad (F_1 + \delta H \quad kQ) \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right. \qquad (10$$

На фиг. 16 статическое усилие изменяетс период $t_1$ косинусоиде $AB$.

---

Тот же ре получим, определяя сопротивления $F$

$$F_s = kQ \quad \delta(H - 2x) = F_1 - m\frac{dv}{dt}$$

Подставляя в последнее выражение вместо ускорения $\frac{dv}{dt}$ его уравн ния (103), получаем выражение (106).

Наименьшее значение статической силы сопротивления $F_s$ получается в начале подъема при $t = 0$:

$$F_{s(\min)} = F'_{s1} = kQ - \delta H.$$

Здесь следует отметить, что значение $F_{s(\min)}$, имеющее место в начале подъема, получилось таким же, как и для случая изменения статического сопротивления $F_s$ в период пуска по закону параболы, согласно выражению (74); объясняется это тем, что начальная величина сопротивления $F_{s(\min)} = F'$ совершенно не зависит от закона изменения статического сопротивления в период движения.

Мощность, обусловленная постоянным движущим усилием $F_1$, в период пуска определяется из выражения

$$P = F_1 v \qquad (107)$$

$$P = F_1 \frac{F_1 + \delta H - kQ}{\sqrt{2\delta m}} \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) \qquad (108)$$

На фиг. 16 мощность $P$ в период $t_1$ изменяется по синусоиде $Oa$.

Мощность, затрачиваемая на производство подъема полезного груза и преодоление вредных сопротивлений, для периода пуска изменяется по выражению:

$$P_s = F v \qquad (79)$$

Из (108), принимая во внимание выражения (99) и (105), получаем

$$P_s = \frac{F_1 + \delta H - kQ}{\sqrt{2\delta m}} \left[F_1 \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right) - \frac{F_1 + \delta H - kQ}{2} \sin\left(2\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right)\right]. \qquad (109)$$

Последнее выражение показывает, что мощность $P_s$, идущая на преодоление в период $t_1$ статических сопротивлений, изменяется в функции времени по закону разности двух синусоид. На фиг. 16 указанная мощность изменяется по линии $Ob$.

Для периода равномерного хода движущее усилие, равное статическому сопротивления $F_s$, определяется выражениями (81) и (82); необходимо, однако, иметь в виду, что входящая в выражение (82) величина $h$ пройденного в течение периода $t_1$, в рассматриваемом случае получается на основании выражения (98).

Мощность $P$, обусловленная движущим усилием, равная мощности $P_s$, затрачиваемой на преодоление статического сопротивления, получается на основании выражений (85), (81), (82) и (98).

Для периода замедления предположим аналогично рассмотренному выше для статически уравновешенной системы, что движение в указанный период имеет направление, противоположное действительному, то есть, начало движения будем считать от конечного пункта пути, при отрицательных значениях пути и времени.

При исследовании периода замедления можно исходить также и из условия действительного направления движения подъемных сосудов, что и произведено автором в труде „Динамика рудничного подъема с постоянным радиусом навивки на основе трапецоидальной диаграммы скорости", (1924 г., стр. 22-30). При этом, однако, необходимо сделать не соответствующее действительности допущение, состоящее в том, что движение в течение полного периода $T$ условно предполагается происходящим по тому же закону, что и в период замедления; в таком случае, при решении уравнения динамического равновесия (1b) определение произвольных постоянных производится из условия что при $t = T$ путь $x = H$ и скорость $v = 0$.

Тогда уравнение (1b) динамического равнове
примет ви

$$F_з = kQ \quad \delta(H \quad 2x) + m\frac{d^2x}{dt^2}$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\delta}{m} \qquad \frac{kQ+\delta H-F}{m} \tag{11}$$

причем постоянное движуще усилие $I_з \quad F_{si}$ ческая
сила сопротивления, имеющ место в начале перио
Решая уравнение (1f) относительно $x$ и принимая во
при $t=0$, $x \quad 0$ и $v=0$, окончательно получаем:

$$-\frac{kQ+\delta H \quad F}{\delta}\left[\quad \cos\left(\sqrt{\quad} \quad t\right.\right.$$

Абсолютное значение пути $h_з$, проходи
в течение периода $t_з$ может быть определено
гая в нем $t \quad -t_з$:

$$\frac{kQ+\delta H-F}{2\delta}\left[1 \quad \cos\left(\sqrt{\quad} \quad _з\right)\right]$$

Скорос

$$v \qquad \frac{kQ+\delta H}{\sqrt{\quad}m} \quad F_з \sin\left(\sqrt{\quad} \quad t\right).$$

Выражение (112) показыва
при постоянном движущем усилии $F$
На фиг. 16 указанная скорость
В начале периода замедления,
получает значение $V$ опре
период
я закон
по синус
при $t$
ая (112).

$$V = \frac{kQ+\delta H-}{\sqrt{2\delta m}} \quad \sin\left(\sqrt{\quad} \quad \right) \tag{3}$$

Из последнего выраже
$F_з$ в функции периода $t$

$$F \quad (kQ \qquad \frac{V\sqrt{\quad}}{\left(\sqrt{\quad}\frac{2\delta}{m}t\right)}$$

Реша (113)

$$t \quad \sqrt{\quad} \qquad \frac{V\sqrt{2\delta m}}{kQ \quad \delta H \quad F} \tag{115}$$

Величину
офе

$$a_з = \frac{dv}{dt} = \quad \frac{kQ+\delta H}{-} \quad \frac{F}{-} \cos\left(\sqrt{\quad} \quad t\right)$$

На фиг 16
$a_з''$ по косинусои

Наибольшее значение замедления по абсолютной величине получ я в конце подъема, то есть, при $t=0$:

$$= a_3 \qquad \frac{kQ + \delta H - F_3}{m} \qquad (117)$$

Из (117) имеем значение движущего условия $F_3$ в функции конечного замедления $a_3''$:

$$F_3 = (kQ + \delta H) + ma_3'', \quad (118)$$

где $a''_3$ — отрицательная величина.

Здесь следует отметить, что определяемое на основании выражений (114) и (118) постоянное движущее усилие $F_3$ может иметь значения:

1) $F_3 > 0$, при котором получается моторный режим (фиг. 16);

2) $F_3 = 0$, при котором имеет место режим свободного выбега (фиг. 17);

3) $F_3 = F_{b3} < 0$, при котором получается тормозной режим (фиг. 18).

На основании выражений (116) и (117) величина замедления $a_3$ может быть представлена следующим образом:

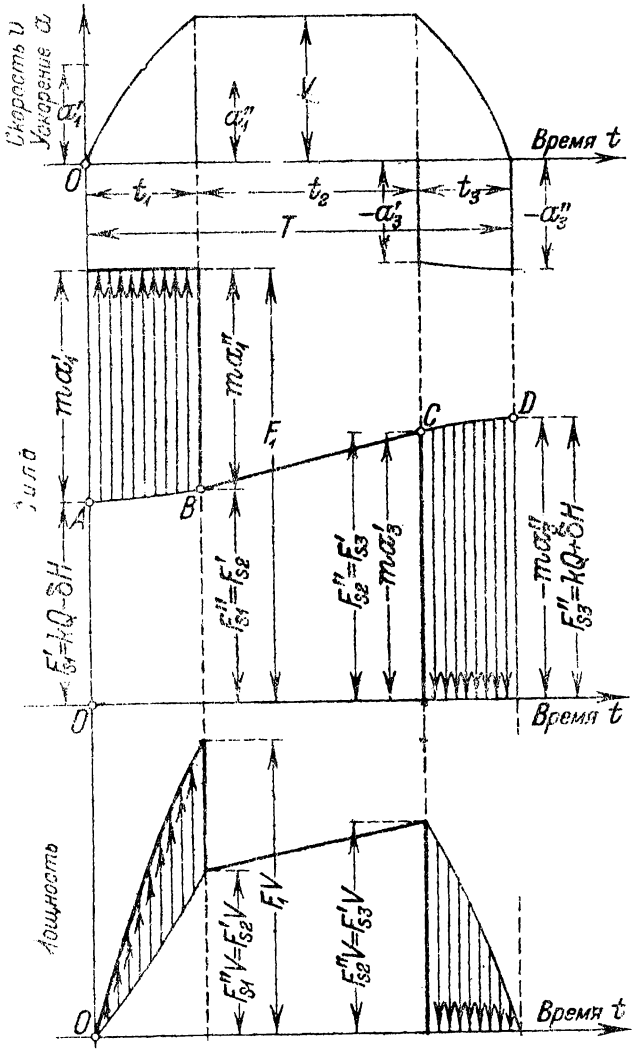
$$a_3 = a_3'' \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t\right). \quad (116a)$$

Равным образом, на основании выражения (117) уравнение (1f) для рассматриваемого случая может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\delta}{m} x = a''_3. \qquad (1g)$$

Статическая сила сопротивления определяется из выражения: *

$$F_s = kQ + \delta(H + 2x). \quad (119)$$




Фиг. 17. Трехпериодная тахограмма с выпуклыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при режиме свободного выбега в период $t_2$.

Подставляя в последнее выражение вместо $x$ его значение из выражения (100), окончательно получаем:

---

* Из выражения (1e) при $m\frac{d^2x}{dt^2} = 0$.

$$F_s = F_3 + (kQ + \delta H - F_3)\cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\,t\right). \qquad (120)$$

На фиг 16 статическое усилие в течение периода $t_3$ изменяется по косинусоиде $CD$.

Наибольшее значение силы $F_s$ получается в конце подъема, то есть, при $t=0$:

$$F_{s\,(\max)} = F_{s3}'' = kQ \quad \delta H.$$

Мощность, обусловленная в период замедления постоянным движущим усилием $F_3$, определяется из выражения:

$$P \quad F_3 v. \qquad (121)$$

Подставляя вместо величины $v$ ее значение из выражения (112), получаем:

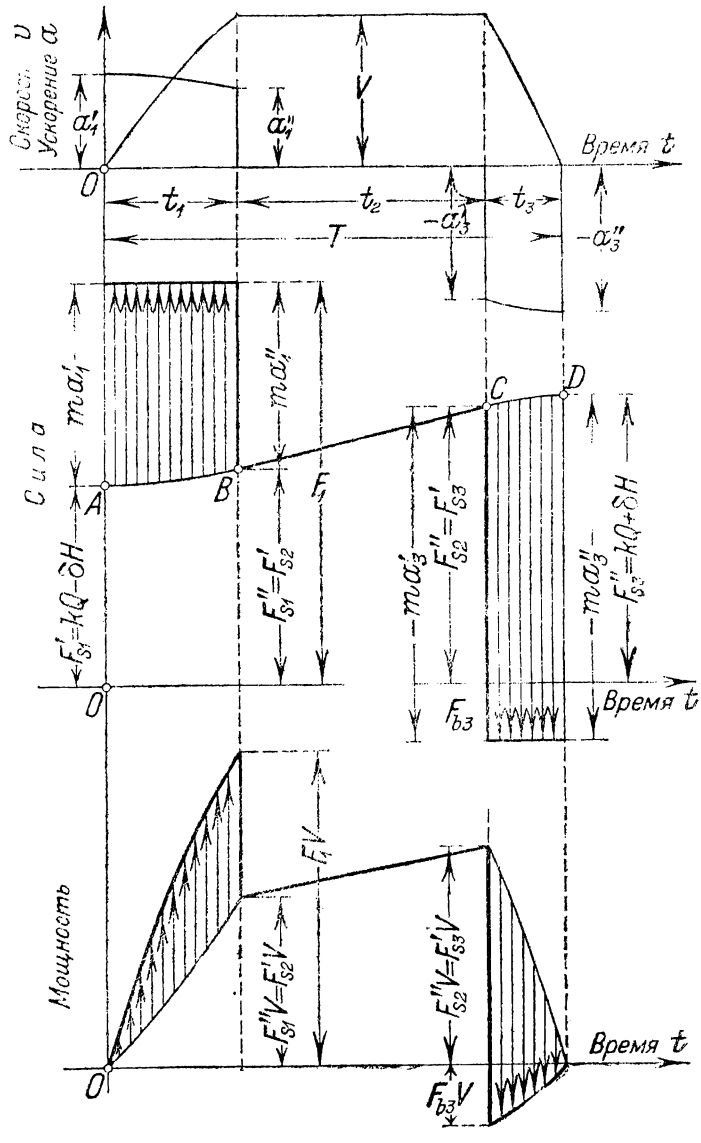
$$F_3 \times$$
$$\times \frac{kQ + \delta H - F_3}{\sqrt{2\delta m}}$$
$$\times \sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\,t\right) \qquad (122)$$

На фиг 16 мощность $P$ в период $t_3$ изменяется по синусоиде $dg$.

Мощность, обусловленная статическим сопротивлением и затрачиваемая в период замедления на завершение подъема, определяется из выражения:

$$= F_s \cdot v. \qquad (79b)$$

Принимая во внимание выражения (112) и (120), получаем:




Фиг. 18. Трехпериодная тахограмма с выпуклыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при тормозном замедлении с постоянным усилием $F_{b3}$ в период $t_3$.

Значение $F_{s(\max)}$, имеющее место в конце подъема, получилось таким же, как и для случая изменения статического сопротивления $F_s$ в период замедления по закону параболы, согласно выражению (92); объясняется это тем, что конечная величина сопротивления $F_{s(\max)}$ совершенно не зависит от закона изменения статического сопротивления в период движения.

$$\frac{kQ+\delta H-F_3}{\sqrt{2\delta m}}\left|F_3\sin\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\,t\right)\right.$$

$$\left.\frac{kQ+\delta H}{2}-F\sin\left(2\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\,t\right)\right| \qquad (123)$$

Последнее выражение показывает, что мощность $P_3$, обусловленная в период замедления статическими сопротивлениями, изменяется в функции времени по закону суммы двух синусоид. На фиг 16 указанная мощность изменяется по линии $eg$.

Графическая интерпретация работы подъема с тяжелым хвостовым канатом при тахограмме с двумя выпуклыми боками (синусоидами) представлена: на фиг 16 для случая моторного режима в период замедления, на фиг 17 для случая свободного выбега в указанный период и на фиг 18 для случая тормозного режима в период $t_3$, при постоянном тормозном усилии $F_{b3}$. На этих фигурах статические усилия изменяются по кривым $ABCD$, части которых $AB$ и $CD$ представляют косинусоиды, определяемые соответственно выражениями (106) и (120).

В заключение следует отметить, что при определении параметров тахограммы с обоими выпуклыми боками необходимо исходить или из начального значения ускорения $a'_1$, или конечного значения замедления $a''_3$, одним из коих следует задаться. При этом необходимо иметь в виду, что в рассматриваемом случае вполне точное определение указанных параметров не может быть произведено, вследствие чего определение периода полного хода $t$ приходится производить путем подбора, согласно выражению:

$$\frac{2H}{V}-T \qquad (124)$$

проверки точностью, ...сти выбора ...личины $t$ ...служить выражение:

$$H=h_1 \qquad (21)$$

...де $h_1$ опре... (98), $h_3$ выраже...ния (111).

Определить ...лами при...менительно фиг

2200 *кг*; $H=300$ $\delta=1,$... $m=2500$ *кг*

$V=8$ *сек*; $T=50$ *сек*; $k=1,2$.

$a_1'=0,8$

---

...алогичному выражению (16) для тахограммы с прямолинейн...данные примеров 1 и 9.

Постоянное движущее усилие $F_1$ в период $t_1$ согласно выражению (105):

$$F = (1{,}2 \cdot 2200 - 1{,}5 \cdot 300) + 2500 \cdot 0{,}8;$$

$$F_1 = 4190 \text{ кг}.$$

Период $t_1$ согласно выражению (102):

$$t_1 \quad \sqrt{\frac{2500}{2 \cdot 1{,}5}} \arcsin \frac{8\sqrt{2 \cdot 1{,}5 \cdot 2500}}{4190 + 1{,}5 \cdot 300 \quad 1{,}2 \cdot 2200}$$

$$t_1 = 10{,}19 \text{ сек}$$

Значение пускового ускорения имеющее в конце [пери]од $t_1$, согласно выражению (103 а):

$$a_1' \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_1\right) = 0{,}8 \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \quad 10{,}19\right);$$

$$= 0{,}75 \frac{м}{сек^2}$$

Путь $h_1$ согласно выражению (98):

$$h_1 = \frac{4190 + 1{,}5 \cdot 300 \quad 1{,}2 \cdot 2200}{2 \cdot 1{,}5}\left[1 \quad \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \quad 10{,}19\right)\right]$$

$$h_1 = 41{,}13$$

Согласно выражению (124):

$$t_2 \quad \frac{2 \cdot 300}{8} \quad 50; \qquad < 25 \text{ сек}.$$

Примем $t_2 = 24{,}5$ *сек*.
Тогда

$$V t_2 \quad 8 \cdot 24{,}5 = 196 \text{ м}.$$

Период

$$t_3 = T - (t_1 \quad t_2) \quad 50 - (10{,}19 + 24{,}5);$$

$$t_3 = 15{,}31 \text{ сек}.$$

Постоянное движущее усилие $F_3$ в период $t_3$ [со]гласно выражению (114):

$$_3 = (1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300) \quad \frac{8\sqrt{2 \cdot 1{,}5 \cdot 2500}}{\sin\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \quad \right)}$$

$$F \quad 1715 \text{ кг}.$$

Путь $h_3$ выражению (111):

$$h_3 = \frac{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300 \quad 1715}{2 \cdot 1{,}5}\left[1 \quad \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \quad 15{,}31\right)\right]$$

$$h_3 = 62{,}87 \text{ м}.$$

Проверка

$$H = \quad + h_3 = 41{,}13 + 196 + 62{,}87 = 300$$

Конечное значение замедления $a_3''$ по абсолютной величине, согласно жению (117):

$$\frac{1{,}2\cdot 2200 + 1{,}5\cdot 300 - 1715}{2500} = 0{,}55 \ \frac{м}{сек^2}$$

значение замедления согласно выражению (116 а):

$$= a_3 \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_3\right) \quad 0{,}55 \cos\left(\sqrt{\frac{2\cdot 1{,}5}{2500}}\cdot 15.31\right);$$

$$a_3 = 0{,}47 \ \frac{м}{сек^2}$$

При определении элементов тахограммы с выпуклыми боками можно акже исходить из конечного значения замедления $a_3''$ задаваясь последним. В таком случае сначала следует определить усилие $F_3$ согласно выражению (118) после чего из выражения (115) определяется период $t_3$. Затем, основании выражения (111) определяется путь $h_3$. Далее, согласно авенству (124) выбирается период $t_2$, определяется затем путь $h_2$, после чего получается период $t_1$ из равенства: $t_1 = T - (t_2 + t_3)$. аконец, согласно выражению (101) определяется постоянное пусковое усилие $F_1$ и из выражения (98) путь $h_1$, после чего правильность выбора ериода $t_2$ проверяется на основании выражения (21).

## С. ТАХОГРАММА С ОДНИМ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ И ДРУГИМ ВЫПУКЛЫМ БОКОМ

На практике может иметь место тахограмма при которой скорость период пуска изменяется по закону прямой линии, в период же замедления по закону синуса (фиг. 19 и 20). В связи с этим изменение статической нагрузки в период $t_1$ происходит по закону параболы $AB$, в период $t_2$ — по косинусоиде $CD$.

В рассматриваемом случае определение параметров тахограммы может быть произведено двумя методами.

1) При *точном* определении указанных параметров необходимо задаться одним из элементов периода замедления, как то: периодом $t_3$ или движущим усилием $F_3 \gtrless 0$.

2) При определении параметров тахограммы путем подбора периода согласно неравенству (124) можно пользоваться методом, примененным решении примера 10.

В обоих случаях соотношения между элементами периода пуска налогичны таковым для тахограммы с прямолинейными боками, соотношения же между элементами периода замедления аналогичны соотношениям, имеющим место в указанный период для тахограммы с выпуклыми боками.

Ниже приводится способ *точного* определения параметров рассматриваемой тахограммы.

При заданном периоде $t_3$ усилие $F_3$ определяется из выражения (114). Равным образом, на основании выражения (111) может быть определен путь $h_3$. Далее, пользуясь равенством

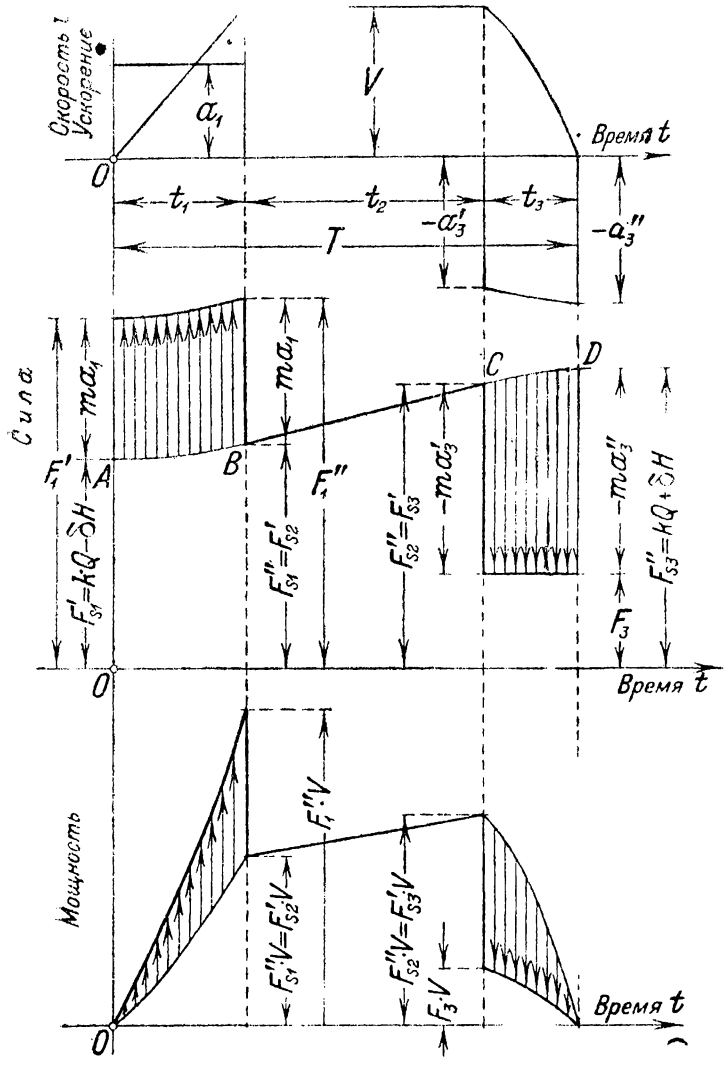
$$H = h_1 + h_2 + h_3, \tag{21}$$

представляется возможным определить период $t_1$ на основании нижеследующих соображений.

В последнем выражении:

$$h_1 = \frac{1}{2} V t_1, \tag{15}$$

$$h_3 \quad V t_2, \tag{17}$$



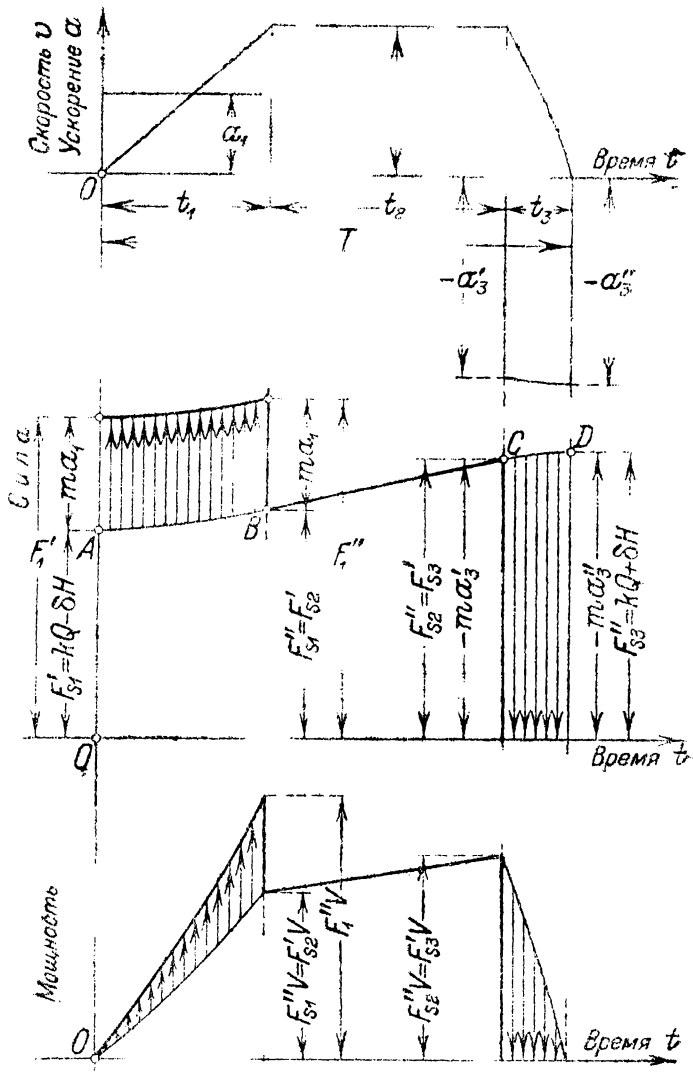

Фиг. 19. Трехпериодная тахограмма с одним прямолинейным и другим выпуклым боком, при постоянном ускорении в период $t_1$ и переменном замедлении, изменяемом по закону косинуса, в период $t_3$; соответственные диаграммы усилий мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при моторном замедлении с постоянным усилием $F_3$ в период $t_3$.

где период $t_2$ определяется из выражения:

$$t_2 = T - t_1 - t_3. \tag{125}$$

$$h_3 = \frac{kQ + \delta H - F_3}{2\delta}\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2\delta}{m}}\, t_3\right)\right] \tag{111}$$

Выражение для пути $h_3$ может быть представлено также и иначе. Дей-
ствительно, принимая во внимание выражение (115) для периода $t_3$ и




Фиг. 20. Трехпериодная тахограмма при постоянном ускорении в период $t_1$ и переменном замедлении, изменяемом по закону косинуса, в период $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют систему подъема с тяжелым хвостовым канатом для обыкновенных клетей при режиме свободного выбега в период $t_3$.

подставляя последнее выражение для $h_3$, получаем:

$$h_3 = \frac{kQ+\delta H - F_3}{2\delta}\left(1 - \cos\arcsin\frac{V\sqrt{2\delta m}}{kQ+\delta H-F_3}\right)$$

Или, принимая внимание,

$$\cos\arcsin\frac{V\sqrt{2\delta m}}{kQ+\delta H - F_3} = \sqrt{1-\left(\frac{V\sqrt{2\delta m}}{kQ+\delta H-F_3}\right)^2} = \sqrt{1-\frac{V^2\cdot 2\delta m}{(kQ+\delta H - F_3)^2}}$$

окончательно имеем:

$$h_3 = \frac{1-kQ+\delta H-F_3}{2\delta}\left[1-\sqrt{1-\frac{V^2\cdot 2\delta m}{(kQ+\delta H-F_3)^3}}\right] \qquad (111a)$$

Последнее выражение при заданном усилии $F_3$ дает возможность определять величину пути $h_3$ без предварительного определения периода замедления $t_3$ и без применения круговых функций.

Подставляя в выражение (21) приведенные выше значения $h_1$, $h_2$ и $t_3$, получаем:

$$H = \frac{1}{2}Vt_1 + V(T-t_1-t_3)+h_3. \qquad (126)$$

Решая последнее уравнение относительно $t_1$, имеем:

$$t_1 = 2\left(T-t_3-\frac{H-h_3}{V}\right). \qquad (127)$$

Пример 11.

Определить элементы тахограммы с прямолинейным боком в период $t_1$ и с выпуклым боком в период $t_3$ применительно к данным примера 10.

а. Задаемся периодом $t_3 = 10$ *сек.*

Согласно выражению (114) получаем:

$$F_3 = (1{,}2\cdot 2200 + 1{,}5\cdot 300)\,\frac{8\sqrt{2\cdot 1{,}5\cdot 2500}}{\sin\left(\sqrt{\frac{2\cdot 1{,}5}{2500}}\cdot 10\right)}$$

$$F_3 = 1040 \text{ кг (см. фиг. 19).}$$

Путь $h_3$ согласно выражению (111):

$$h_3 = \frac{1{,}2\cdot 2200+1{,}5\cdot 300-1040}{2\cdot 1{,}5}\left[1-\cos\left(\sqrt{\frac{2\cdot 1{,}5}{2500}}\ \ 10\ \right)\right];$$

$$h_3 = 41 \text{ м.}$$

Период $t_1$ согласно выражению (127):

$$t_1 = 2\left(50-10-\frac{300-41}{8}\right);$$

$$t_1 = 15{,}25 \text{ сек.}$$

Период $t_2$ согласно выражению (125):

$$t_2 \quad 50-15{,}25-10 = 24{,}75 \text{ сек.}$$

Согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{8\cdot 15{,}25}{2} = 61 \text{ м.}$$

выражению (17):

$$h_2 = 8\cdot 24{,}75 = 198 \text{ м.}$$

Проверка согласно выражению (21):

$$H = 61+198+41 = 300 \text{ м.}$$

Постоянное ускорение $a_1$ в период $t_1$ согласно выражению (14):

$$a_1 = \frac{V}{t_1} = \frac{8}{15{,}25} = 0{,}52 \ \frac{м}{сек^2}$$

Конечное значение замедления $a_3''$ по абсолютной величине, согласно выражению (117):

$$a_3'' = \frac{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300 - 1040}{2500}$$

$$a_3'' = 0{,}82 \ \frac{м}{сек^2}.$$

Начальное значение замедления $a'_3$ согласно выражению (116а),

$$a'_3 = 0{,}82 \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \ 10\right)$$

$$a_3' = 0{,}77 \ \frac{м}{сек^2}$$

b. Задаемся движущим усилием в период замедления $F = 0$, т. е. принимаем режим свободного выбега (см. фиг. 20).

Тогда период $t_3$ согласно выражению (115):

$$t_3 = \sqrt{\frac{m}{2\delta}} \arcsin \frac{V\sqrt{2\delta m}}{kQ + \delta H}$$

$$t_3 = \sqrt{\frac{2500}{2 \cdot 1{,}5}} \arcsin \frac{8\sqrt{2 \cdot 1{,}5 \cdot 2500}}{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300}$$

$$t_3 = 6{,}47 \ сек.$$

Путь $h_3$ согласно выражению (111):

$$h_3 = \frac{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300}{2 \cdot 1{,}5}\left[1 - \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \cdot 6{,}47\right)\right]$$

$$h_3 = 25{,}98 \ м.**$$

Период $t_1$ согласно выражению (127):

$$t_1 = 2\left(50 - 6{,}47 - \frac{300 - 25{,}98}{8}\right)$$

$$t_1 = 18{,}53 \ сек.$$

---

* Случай тормозного режима ($F_3 < 0$) в период $t_3$ здесь не рассмотрен на основании тех соображений, что применение тормоза для периода останова при системе с тяжелым хвостовым канатом могло бы повлечь за собой получение значительных величин замедлений, не всегда приемлемых на практике.

** При расчете по формуле (111а) получаем:

$$h_3 = \frac{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300}{2 \cdot 1{,}5}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{8^2 \cdot 2 \cdot 1{,}5 \cdot 2500}{(1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300)^2}}\right] \cong 26$$

Последний результат отличается от полученного по формуле (111) на $\sim 0{,}1\%$, практического значения не имеет.

Период $t_2$ согласно выражению (125):

$$t_2 = 50 \quad 18{,}53 - 6{,}47 = 25 \text{ сек.}$$

Путь $h_1$ согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{8 \cdot 18{,}53}{2} = 74{,}12 \text{ м.}$$

Путь $h_2$ согласно выражению (17):

$$h_2 = 8 \cdot 25 = 200 \text{ м.}$$

Проверка согласно выражению (21):

$$H = 74{,}12 + 200 + 25{,}98 = 300{,}1 \cong 300 \text{ м.}$$

Постоянное ускорение $a_1$ в период $t_1$ согласно выражению (14):

$$a_1 = \frac{V}{t_1} = \frac{8}{18{,}53} = 0{,}43 \ \frac{м}{сек^2}$$

Конечное значение замедления $a''_3$ по абсолютной величине, выражению (117):

$$\frac{1{,}2 \cdot 2200 + 1{,}5 \cdot 300}{2500}$$

$$= 1{,}2 \ \frac{м}{сек^2}.$$

Начальное значение замедления $a_3'$ согласно выражению (116а):

$$' = 1{,}2 \cos\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}5}{2500}} \cdot 6{,}47\right);$$

$$= 1{,}17 \ \frac{м}{сек^2}$$

---

Здесь следует отметить, что если бы задаться величиной периода пуска $t_1$ или же значением пускового ускорения $a_1$, то точное определение параметров тахограмм на фиг. 19 и 20 оказалось бы невозможным, так как при этом получилось бы неразрешимое трансцендентное уравнение, которое не могло бы быть приведено к алгебраическому виду. В самом деле, при заданном периоде $t_1$ определение периода $t_3$ из выражения (126) приводит к уравнению вида:*

$$t_3 + A\cos(bt_3) - C = 0,$$

где

$$A = \frac{kQ + \delta H \quad F}{2\delta V} \qquad b \quad \sqrt{2\delta} \qquad C = \frac{kQ - \delta H \quad F_3}{2\delta V} \qquad \Gamma - \frac{1}{2} \ t_1$$

В последнем случае задача могла бы быть решена лишь путем бора величины периода полного хода $t_2$, согласно методу, применен выше при решении примера 10.

* См Ф. Н. Шклярский. „Случаи точного определения основных параметров трехпериодной тахограммы рудничного подъема". (Записки Ленинградского Горного Института, Том XI, вып. 3, 1938 г).

## IV НЕУРАВНОВЕШЕННАЯ СИСТЕМА*

Уравнение динамического равновесия подъемной машины для рассматриваемой системы можем получить из общих уравнений (1 a) и (1 b), положив в них $q=0$; следовательно, $\delta = q - p = -p$.

Таким образом получаем:

$$F = kQ \quad p(H - 2x) \quad m\frac{dv}{dt} \tag{128}$$

$$F = kQ + p(H - 2x) + m\frac{d^2x}{dt^2} \tag{128a}$$

### A. ТАХОГРАММЫ С ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ БОКАМИ

### 1. Трехпериодная тахограмма

Рассмотрим условия, наличие которых является необходимым для осуществления трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками.**

Для периода пуска изменение скорости $v$ по прямой линии требует постоянства пускового ускорения $a_1 = \frac{dv}{dt}$. Принимая во внимание, что проходимый этом клетями путь $x = \frac{1}{2} a_1 t^2$ уравнение (128) на рассматриваемого периода можно представить в следующем виде:***

$$F = kQ \quad p(H \quad a_1 t^2) \quad ma_1 = var, \tag{129}$$

$F$ - переменное движущее усилие на окружности барабана.

Выражение (129) показывает, что для получения постоянного пускового ускорения $a_1$, обусловливающего изменение скорости $v$ по прямой, необходимо, чтобы движущее усилие $F$ изменялось в функции времени по *параболе*, обращенной к оси времен своею вогнутостью.

В начале движения, при $t = 0$, выражение (129) принимает вид:

$$F_1' = kQ \quad pH + ma_1. \tag{130}$$

При выражение (129) принимает вид:

$$F_1'' \quad kQ \quad p(H - a_1 t_1^2) \quad ma_1. \tag{131}$$

Из

$$F_1'' = kQ + p(H \quad 2h_1) + ma_1, \tag{131a}$$

$h_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2$ путь, проходимый клетями течение периода $t_1$.

Переменная статическая сила сопротивления $F_s$, обусловленная полезным грузом, вредными сопротивлениями и неуравновешенными частями канатов, определяется для периода *пуска* нижеследующим уравнением параболы параллельной параболе, выражаемой уравнением (129):

$$F_s \quad kQ \quad p(H - a_1 t^2) = var. \tag{132}$$

Наибольшее значение статической силы сопротивления $F_s$ получается начале подъема, при $t = 0$:

$$F_{s(max)} = F_{s1}' = kQ + pH. \tag{133}$$

* Система с цилиндрическими барабанами без хвостового каната.

** В рассматриваемом случае исследование основано на применении принципа динамики, ласно которому по данной форме движения определяются силы.

*** М. М. Федоров. „Теория и расчет гармонического рудничного подъема", . 142. 1914.

В связи с этим выражение для начального движущего усилия $F_1'$ может быть представлено в следующем виде:

$$F_1' = F_{s1}' + ma_1. \qquad (72\,b)$$

При $t = t_1$ выражение (132) принимает вид:

$$F_{s1} = F_{s2}' = kQ + p(H - a_1 t_1^2). \qquad (134)$$

Или

$$F_{s1} = F_{s2}' = kQ + p(H - 2h_1). \qquad (134\,a)$$

В связи с этим выражение для движущего усилия $F_1$ в конце периода $t_1$ может быть представлено следующим образом:

$$F'' = F''_{s1} + ma_1. \qquad (131\,b)$$

Мощность $P$, обусловленная движущим усилием $F$:

$$P = F \cdot v, \qquad (77\,a)$$

где переменное усилие $F$ определяется выражением (129), $v$ получается из выражения:

$$v = a_1 t. \qquad (4)$$

При $t = 0$, $P_1' = F_1' \cdot 0 = 0$.

При $t = t_1$ выражение (77 а) принимает вид:

$$P_1'' = F_1'' V \qquad (78\,a)$$

Мощность $P_s$, затрачиваемая на преодоление статических сопротивлений:

$$P_s = F_s \cdot v, \qquad (79\,a)$$

где сила $F_s$ определяется выражением (132), а скорость $v$ выражением (4).

При $t = 0$, $P_{s1}' = F_{s1}' \cdot 0 = 0$.

При $t = t_1$ выражение (79 а) принимает вид:

$$P_{s1} = P_{s2}' = F_{s1} V = F_{s2}' V \qquad (80\,a)$$

Выражения (77 а) и (79 а) представляют уравнения кубических парабол, обращенных вогнутостью к оси времен, что становится очевидным, если в указанные выражения вместо величин $F$, $F_s$ и $v$ подставить их значения, определяемые соответственно выражениями (129), (132) и (4).

b) Для периода равномерного хода скорость $v = V = \text{const}$; следовательно, ускорение $\frac{dv}{dt} = 0$; ввиду этого уравнение (128) принимает вид

$$F = F_s = kQ + p(H - 2x), \qquad (135)$$

где $F$ — движущее усилие, равное статическому усилию $F_s$.

В последнем выражении пройденный клетями путь к концу рассматриваемого промежутка времени:

$$x = h_1 + Vt, \qquad (82)$$

где $h_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2$ — путь, пройденный в течение периода пуска $t_1$, $V$ — постоянная в период полного хода $t_2$ скорость, $t$ — время, удовлетворяющее условию: $0 < t < t_2$.

Выражение (135), представляющее уравнение прямой линии, определяет закон изменения в период $t_2$ движущего усилия $F$, которое, оставаясь

в течение всего этого периода равным статическому усилию $F_s$, должно неуклонно следовать за всеми его изменениями; в противном случае нарушилось бы условие равномерного движения.

При $t=0$, путь $x=h_1$; в связи с этим выражение (135) принимает

$$F_2' \quad F_{s2}' = kQ + p(H - 2h_1). \tag{134 b}$$

При $t=t_2$ выражение (135) принимает вид:

$$F_2'' = F''_{s2} = kQ \quad p(H - 2h_1 \quad 2h_2), \tag{136}$$

где проходимый период $t_2$ путь $h_2 \quad Vt_2$.

Или

$$F \quad = F_{s2}'' = F_{s2}' - 2ph_2. \tag{137}$$

Мощность $P$, обусловленная движущим усилием и равная в равномерного хода мощности $P_s$, затрачиваемой на производство подъема полезного груза и на преодоление вредных сопротивлений, определяется выражения:

$$P = P_s = F \quad V = F_s \cdot V, \tag{85}$$

усилие $F \quad F_s$ получается из выражения (135).

Выражение (85 а) представляет уравнение прямой линии.

При $t=0$ выражение (85 а) принимает вид:

$$P_2' \quad P_{s2}' = F_2' \cdot V = F_{s2}' \cdot V$$

При $t=t$ жение (85 а) принимает вид:

$$P_2'' \quad P_{s2}'' = F_2'' \quad V = F_{s2}'' \cdot V \tag{87}$$

с) Для периода останова изменение скорости $v$ по прямой требует постоянства величины замедления $a_3$. Выражение скорости этом имеет вид:

$$v \quad V - a_3 t, \tag{88}$$

$0 < t < t_3$.

Диффе уравне (88), получаем величину замед

$$\frac{dv}{dt} = -a_3.$$

Принимая во внимание последнее выражение амедления, уравне- (128) можно представить в следующем виде:

$$F = kQ \quad p(H - 2x) - ma; \tag{138}$$

ный летями путь $x$, считая подъема,

$$x \quad + h_2 \quad Vt - \frac{1}{2} a_3 t^2.$$

последнем выражении $h_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1 \quad Vt_1$.

Что касается времени $t$, то оно должно удовлетворять ному условию: $0 < t < t_3$.

При $t=0$ выражение (138) принимает вид:

$$F_3' = kQ + p(H \quad 2h_1 - 2h_2) - ma_3. \tag{139}$$

Принимая во внимание, что статическое усилие $F_{s2}''$ в конце периода $t_2$ равно статическому усилию $F_{s3}'$ в начале периода $t_3$, выражение для $F_3'$ можем представить в следующем виде:

$$F_3' = F_{s2}'' - ma_3 = F_{s3}' - ma_3. \qquad (139$$

Выражение (138) показывает, что движущее усилие $F$ на окружности барабана в период замедления изменяется в функции времени по закону ***параболы***, обращенной к оси времен своей выпуклостью.

Здесь необходимо отметить, что усилие $F$, определяемое выражением (138), может иметь как положительные, так и отрицательные значения, в последнем случае получается ***тормозной*** режим, при котором тормозное усилие изменяется согласно выражению (138) по параболе, обращенной к оси времен своей вогнутостью.

При этом может случиться, что изменяемое по параболе усилие в течение периода $t_3$ перейдет из области положительных значений область отрицательных значений; если подобный переход указанного усилия через нуль произойдет точно в середине периода $t_3$, то получаемый при этом ***моторно-тормозной*** режим окажется практически наиболее близким к режиму свободного выбега, точное осуществление которого при постоянной величине замедления является невыполнимым.

Статическое усилие $F_s$ определяется из выражения:

$$F_s = kQ + p(H - 2x), \qquad (140)$$

где путь $x$ имеет значение, определяемое выражением (90).

Выражение (140) представляет уравнение параболы, параллельной параболе, определяемой выражением (138).

При $t = 0$ выражение (140) принимает вид:

$$F_{s_1} \quad kQ + p(H \quad 2h_1 - 2h_2). \qquad (1$$

Наименьшее значение силы $F_s$ получается в период замедления, при $x = H$:

$$F_{s\,(min)} = F_{s3}'' = kQ - pH.$$

В связи с этим движущее усилие $F$ в конце представлено в следующем виде:

$$F_3'' = F_{s3} \quad ma_3 \quad kQ - pH - ma_3.$$

Мощность $P$, обусловленная движущим усилием в период замедления:

$$P = F \cdot v, \qquad (77\ b)$$

где движущее усилие $F$ определяется выражениями (138) и (90), скорость $v$ получается на основании выражения (88).

При $t = 0$ выражение (77 b) принимает вид:

$$P_3' = F' \ V \qquad (95\ a)$$

При $t$ $_{3}$, $P'' - F_3'' \ 0 = 0$.

Мощность $P_s$, обусловленная статической нагрузкой и идущая на вершине подъема:

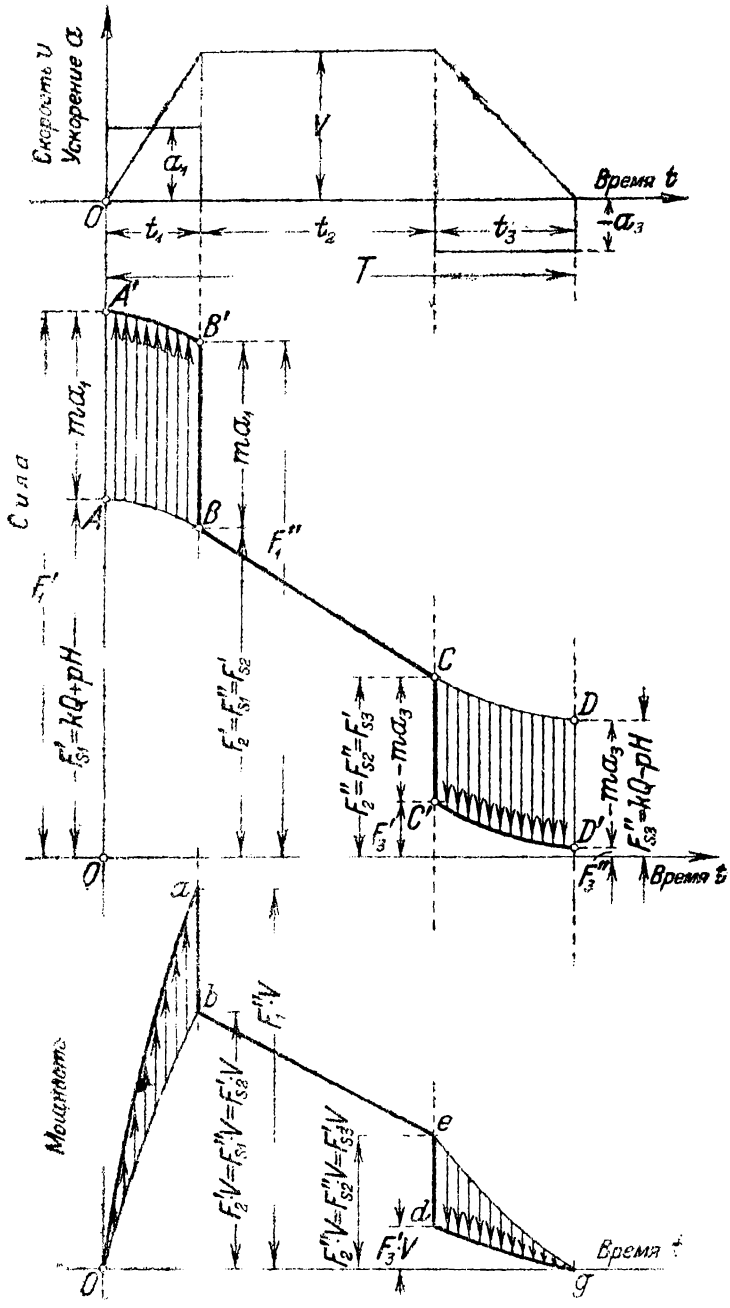
$$P_s \quad F_s \cdot$$

где усилие $F_s$ определяется на основании выражения (140) (90), скорость $v$ получается из выражения (88).

При $t$ 0 выражение (79 b) принимает вид:

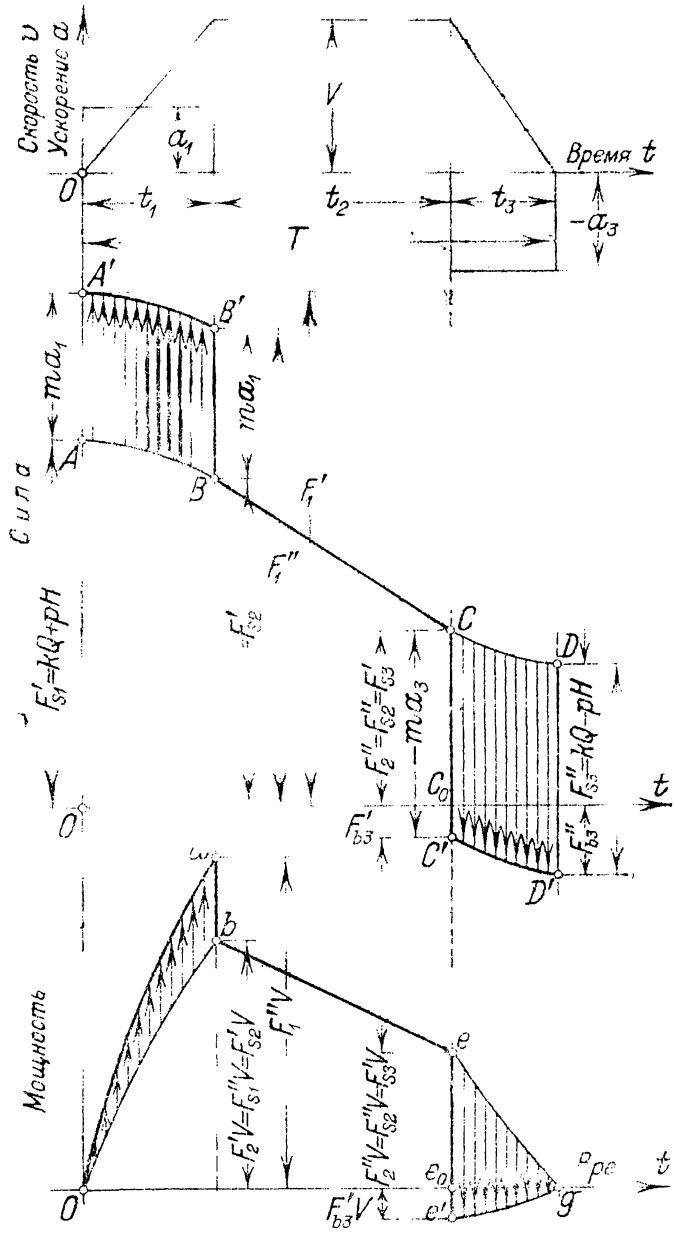
$$P_{s3}' = F_{s3} \ V.$$

При $t \quad t_a$, $P_{sa} = F_{sa} \quad 0 \quad 0$.
Выражения (77 b) и (79 b) представляют уравнения кубических пара-




Фиг. 21. Трехпериодная тахограмма при постоянных ускорениях в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при моторном замедлении с переменным усилием в период $t_3$.

бол, обращенных к оси времен своею выпуклостью. Исключение составляет мощность, обусловленная тормозным усилием, которая изменяется по кубической параболе, обращенной к оси времен своей вогнутостью.




Фиг. 22. Трехпериодная тахограмма при постоянных ниях в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы ус мощностей характеризуют неуравновешенную систему для обыкновенных клетей при тормозном замедлении ременным усилием в период $t_3$.

Диаграммы на фиг 21 характеризуют работу подъе шенной системы при наличии моторного заме, ания, а и

условии тормозного режима в период $t_3$, для случая трехпериодных тахограмм с прямолинейными боками.

На фиг. 21 статическое усилие в период пуска изменяется по параболе $AB$, в период полного хода — по прямой $BC$, в период замедления — по параболе $CD$. Движущее усилие в период $t_1$ изменяется по параболе $A'B'$, параллельной параболе $AB$, в период $t_2$ — по прямой $BC$, в период $t_3$ — по параболе $C'D'$, параллельной параболе $CD$. Таким образом, движущее усилие за весь период подъема $T$ изменяется по линии $A'B'BCC'D'$

Мощность, обусловленная статической нагрузкой, в период $t_1$ изменяется по кубической параболе $Ob$, в период $t_2$ — по прямой $be$, в период — по кубической параболе $eg$. Мощность, обусловленная движущим усилием, в период $t_1$ изменяется по кубической параболе $Oa$, в период по прямой $be$, период $t_3$ — по кубической параболе $dg$. Мощность, обусловленная движущим усилием, в течение всего периода подъема $T$ изменяется по линии $Oabedg$.

На фиг. 22 движущее усилие за время $(t_1+t_2)$ изменяется по линии $A'B'BCC_0$; тормозное усилие в течение периода $t_3$ изменяется от значения $F_{bz}'$ до величины $F_{bz}''$ по параболе $C'D'$ Мощность, обусловленная движущим усилием, в течение времени $(t_1+t_2)$ изменяется по линии $Oabee_0$; мощность, обусловленная тормозным усилием, в течение периода $t_3$ изменяется по кубической параболе $e'g$.

---

На основании изложенного заключаем, что для осуществления трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками необходимо: 1) в период пуска изменение движущего усилия в функции времени по закону *параболы*; 2) в период замедления изменение по закону *параболы* движущего усилия или тормозного усилия.

Что касается режима свободного выбега в период замедления, то точное осуществление такового при прямолинейном изменении скорости невыполнимо.

Определение параметров трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками для неуравновешенной системы производится по методу, приведенному выше для статически уравновешенной системы, согласно выражениям (14) (21)

Пример 12.

Пользуясь данными примера 1, определить элементы подъема применительно к диаграммам на фиг. 21. *

Из примера 1 имеем параметры тахограммы:

$$=0{,}8\frac{м}{сек^2} \quad t_1=10\ сек;\ h_1=40\ м;\ t_2=25\ сек;\ h_2=200\ м;$$

$$t_3=15\ сек;\ h_3=60\ м;\ a_3=0{,}53\frac{м}{сек^2}.$$

Кроме того дано: вес погонного метра каната $p=4\frac{кг}{м}$

Начальное статическое усилие $F_{s1}'$ согласно выражению (133):

$$F_{s1}'=1{,}2\cdot 2200+4\cdot 300=3840\ кг.$$

---

* Некоторым изменением приведенной массы $m$ по сравнению с таковой при статически уравновешенной системе пренебрегаем.

Статическое усилие в конце периода $t_1$ в начале периода $t_2$ согласно выражениям (134) и (134 а):

$F_{s1} = F_{s2}$ $1{,}2 \cdot 2200 + 4(300 - 0{,}8 \cdot 10^2)$ $1{,}2 \cdot 2200 + 4(300 - 2 \cdot 40) = 3520$ *кг.*

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ согласно выражениям (137) и (137а):

$F$ $1{,}2 \cdot 2200 + 4(300$ $2 \cdot 40 - 2 \cdot 200) = 3520 - 2 \cdot 4 \cdot 200 = 1920$ *кг.*

Ста лие в конце периода $t_3$ согласно выражению (141):

$$F_{s3}'' = 1{,}2 \cdot 2200 - 4 \cdot 300 = 1440 \text{ кг.}$$

Начальное движущее усилие $F_1'$ согласно выражению (72 b):

$$F_1' = 3840 + 2500 \cdot 0{,}8 = 5840 \text{ кг.}$$

Движуще усилие $F_1$ в конце периода $t_1$ согласно выражению (131 b):

$$F_1 \quad 3520 + 2500 \cdot 0{,}8 = 5520 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в начале перио $t_2$:

$$F_2' = F_{s2}' = 3520 \text{ кг.}$$

Движущее уси в конце периода $t_2$:

$$F''_2 = F''_{s2} = 1920 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$ согласно выражению (139 а)

$$F_3' = 1920 - 2500 \cdot 0{,}53 = 595 \text{ кг.}$$

Движущее усилие в конце периода $t_3$ согласно выражению (142):

$$F'' = 1440 - 2500 \cdot 0{,}53 = 115 \text{ кг.}$$

Мощность, обусловленная статическим усилием в конце периода $t_1$ и начале периода $t_2$, согласно выражению (80 а):

$$P_{s1} = P_{s2}' = 3520 \cdot 8 = 28160 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 276 \text{ kW}$$

Мощность, обусловленная движущим усилием в конце периода $t_1$, согласно выражению (78 а):

$$P_1 = 5520 \cdot 8 = 41160 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 403{,}5 \text{ kW}$$

Мощность в начале периода $t_2$ согласно выражению (86а):

$$P_2' = P_{s2}' = 3520 \cdot 8 = 28160 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 276 \text{ kW}$$

Мощность в конце периода $t_2$ согласно выражению (87а):

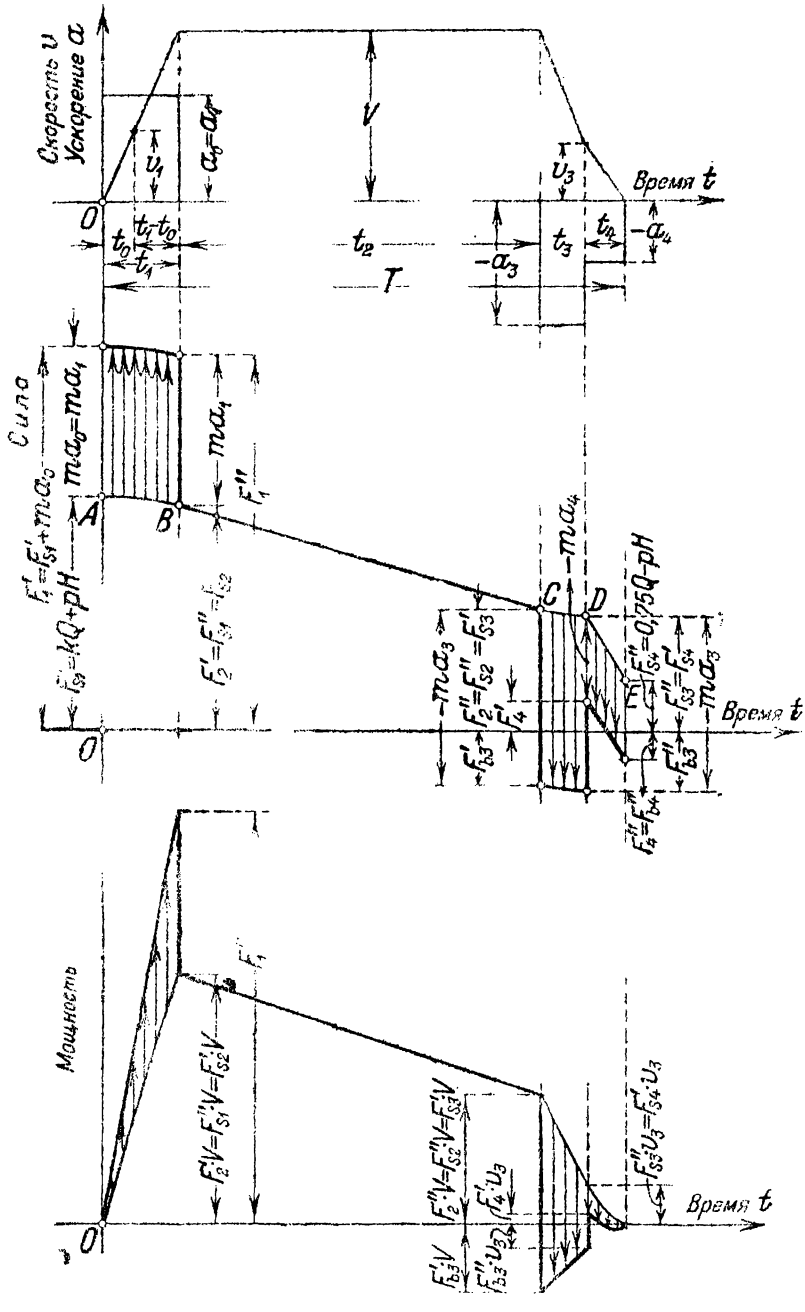
$$P_2 = P_{s2}'' = 1920 \cdot 8 = 15360 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 150{,}5 \text{ kW}$$

Мощность, обусловленная движущим усилием в начал периода $t_3$, гласно выражению (95 а):

$$P_3' = 595 \cdot 8 = 4760 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 47 \text{ kW.}$$

## 2. Четырехпериодная тахограмма

При опрокидных сосудах (скипах и клетях), а также при скипах донной разгрузкой, может иметь место четырехпериодная тахограмма, согласно представленному на фиг 23 и 24. Определение параметров четы-




Фиг 23. Четыре. риодная тахограмма при постоянных ускорениях периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для скипов с донной разгрузкой при тормозном режиме с переменным усилием в период $t_3$.

рехпериодной тахограммы с прямолинейными боками для неуравновешенной системы производится по методу, приведенному выше для статически уравновешенной системы, согласно выражениям (31) . . (40) и (46) (49).

*а. Случай скипа с донной разгрузкой*

На фиг. 23 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного скипами с *донной* разгрузкой.

Статическое усилие в период $t_1$ изменяется по параболе $AB$, период $t_2$ — по прямой $BC$, в период $t_3$ — по параболе $CD$.

Статическое усилие в конце периода $t_4$ разгрузки скипа, вследствие искажения его по сравнению со случаем обыкновенного клетевого подъема, получает значение:*

$$F_{s4} = 0{,}75Q - pH.$$

Изменение статического усилия в течение периода $t_4$ от значения $F_{s3}'' = F_{s4}'$ до величины $F_{s4}''$ предположено происходящим ориентировочно по прямой линии $DE$.

Начальное статическое усилие

$$F_{s0} = F_{s1}' = kQ + pH. \tag{133}$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ + p(H - a_1 t_1^2), \tag{134}$$

или

$$F_{s1} = F_{s2}' = kQ + p(H - 2h_1). \tag{134a}$$

Статическое усилие в конце периода $t$ в начале периода $t_3$

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = F_{s2}' \quad 2ph_2. \tag{137a}$$

Статическое усилие в конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$

$$F_{s3} = F_{s1}' = F_{s3}' - 2ph_3, \tag{143}$$

или

$$F_{s3}'' = F_{s4}' \quad kQ \quad p(H \quad 2h_4). \tag{143a}$$

Статическое усилие в конце периода $t_4$, согласно вышеуказанному:

$$F_{s4}'' = 0{,}75Q - pH. \tag{144}$$

Начальное движущее усилие

$$F_1' = F_{s1}' + ma_0 \tag{72b}$$

Движущее усилие конце периода $t_1$

$$F_1'' \quad F_{s1}'' \quad ma_1. \tag{131b}$$

Движущее усилие в начале периода $t_2$

$$F_2' = F_{s2}'$$

Движущее усилие в конце периода $t_2$

$$F_2'' = F_{s2}''$$

---

* А. П. Герман и Ф. Н. Шклярский. „Рудничные подъемные установки". Часть I, стр. 126. 1940.

Движуще в начале периода $t_3$

$$F_3' = F_{s3} \quad ma_3. \tag{139a}$$

Движущее усилие конце периода $t_3$

$$F_3'' = F_{s3}'' \quad ma_3. \tag{142a}$$

лие ачале периода $t_4$

$$F_4' = F_{s4}' \quad ma_4. \tag{145}$$

Движуще уси конце периода $t_4$

$$F_4'' = F_{s4}'' \quad ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответ- ных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 23.

Пример

Пол зуяс данными примера 3, рассчитать элементы подъема приме- ительно к диаграммам на фиг 23, в предположении скипов с донной азгу *

Кроме м $p = 4{,}3 \frac{кг}{м}$

И примера имеем параметры тахограммы: $t_0 = 3{,}5$ *сек*; $a_0 = \dot{a}_1 =$ $\frac{м}{сек^2}$ 8 *с* $t_1$ $t_0 = 4{,}5$ *сек*; $h_1 = 18{,}12$ *м*; $t_4 = 4{,}67$ *сек*; $t_2 =$ 72,77 *сек* $= 329{,}65$ $t = 4{,}56$ *сек*; $h_3 = 13{,}75$ *м*; $a_3 = 0{,}66$ $\frac{м}{сек^2}$ $32 \frac{м}{сек^2}$

Начальное усилие согласно выражению (133):

$$F_{s0} \quad F_{s1}' = 1{,}15 \quad 4000 + 4{,}3 \quad 365 = 6170 \text{ кг}.$$

Статиче усилие в конце периода $t_1$ начале периода $t_2$ со- выражению (134a):

$$F \quad = F_{s2}' \quad 1{,}15 \quad 4000 \quad -4{,}3\,(365 - 2 \cdot 18{,}12) \quad 6014$$

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t$ со- ласно выражению (137a):

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 6014 - 2 \cdot 4{,}3 \cdot 329{,}65 = 3179 \text{ кг}.$$

Статическое усиле в конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$ согласно ажению (143):

$$F \quad = F' = 3179 \quad 2 \quad 4{,}3 \cdot 13{,}75 = 3061 \text{ кг}.$$

Статичес усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (144):

$$F_{s4}'' = 0{,}75 \quad 4000 - 4{,}3 \quad 365 = 1430 \text{ кг}.$$

Начальное движущее усилие согласно выражению (72b):

$$F_1' = 6170 + 7000 \quad 0{,}57 = 10160 \text{ кг}.$$

екоторым изменением приведенной массы $m$ по сравнению с ковой при ста- уравновешенной системе пренебрегаем.

Движущее усилие в конце периода $t_1$ согласно выражению (131b):

$$F_1'' = 6014 + 7000 \cdot 0{,}57 = 10004 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале пернода $t_2$

$$F_2' = F_{s2}' = 6014 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_2$

$$F_2'' = F_{s2}'' = 3179 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$ согласно выражению (139a):

$$F_3' = F_{b3}' = 3179 - 7000 \cdot 0\,66 = -1441 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_3$ согласно выражению (142a):

$$F_3'' \quad F_{b3}'' = 3061 - 7000 \quad 0{,}66 = -1559 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$ согласно выражению (145):

$$F_4' \quad 3061 - 7000 \cdot 0{,}32 = 821 \text{ кг}.$$

Движуще усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (42):

$$F_4'' = F_{b4}'' = 1430 - 7000 \cdot 0{,}32 = -810 \text{ кг}.$$

Мощность обусловленная статической нагрузкой в начале периода $t_2$:

$$P_{s2}' = F_{s2} \quad = 6014 \quad 4{,}53 = 27243 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 267 \text{ kW}$$

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$:

$$P_{s2} \quad = F_{s2}'' \quad V = 3179 \quad 4{,}53 = 14401 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 141 \text{ kW}$$

Мощность, обусловленная статической нагрузкой в конце периода $t_3$:

$$P_{s3}'' = F_{s3}'' \quad v_3 = 3061 \cdot 1{,}5 = 4592 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 45 \text{ kW}$$

Мощность на валу барабана в конце периода $t_1$:

$$P_1'' = F_1'' \cdot V = 10004 \quad 4{,}53 = 45318 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 444 \text{ kW}$$

Мощность на валу барабана в начале периода $t_2$:

$$P_2' = P_{s2}' = 27243 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 267 \text{ kW}.$$

Мощность на валу барабана в конце периода $t_2$:

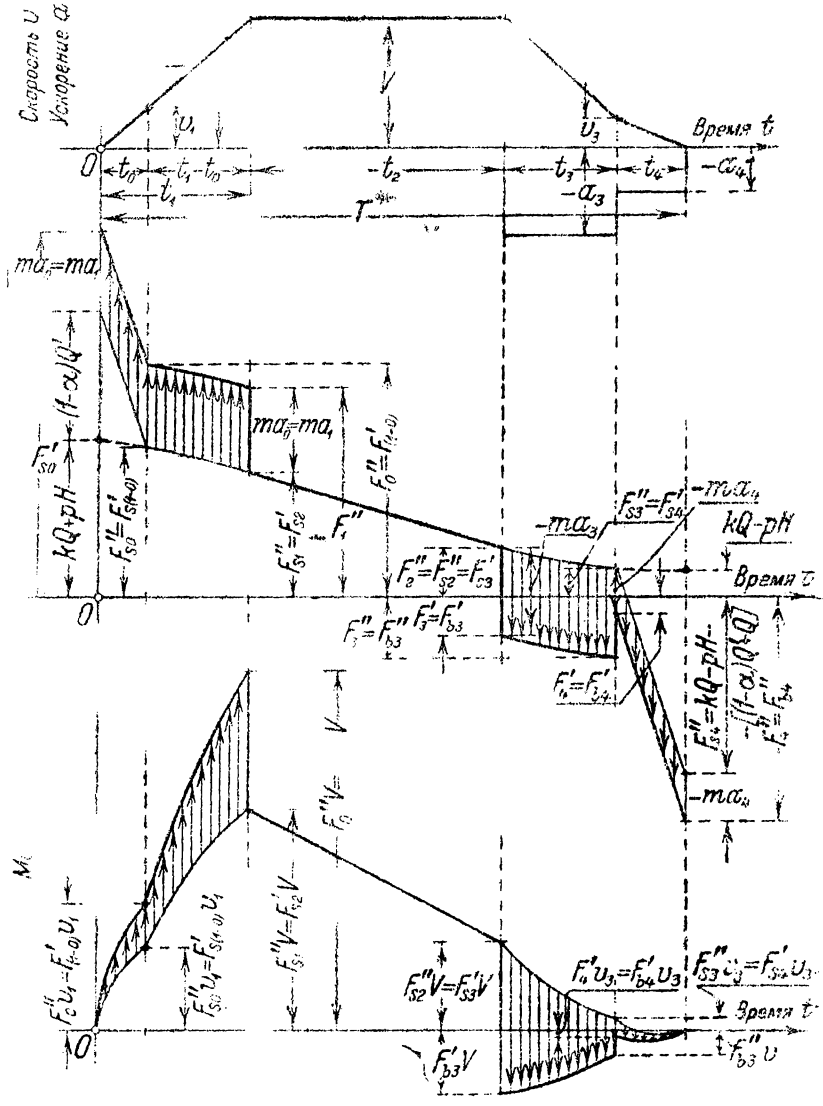
$$P_2'' = P''_{s2} = 14401 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 141 \text{ kW},$$

Мощность на валу барабана в начале периода $t_3$, обусловленная тормозным усилием $F_{b3}'$:

$$P_{b3}' = F_{b3}' \quad V = \quad 1441 \quad 4{,}53 = -6528 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = -67 \text{ kW}.$$

Мощность на валу барабана в конце периода $t_3$, обусловленная тормозным усилием $F_{b3}''$:

$$P_{b3}'' \quad F_{b3}'' \quad v_3 = -1559 \quad 1{,}5 = -2338 \frac{кг.\ м}{сек} = \quad 23\ kW$$




Фиг. 24. Четырехпериодная тахограмма при постоянных ускорениях в периоды $t_1$ и $t_3$ соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешанную систему подъема для опрокидных сосудов при тормозном режиме с переменным усилием в период $t_3$.

Мощность на валу барабана в начале периода $t_4$, обусловленная движущим усилием $F_4'$

$$P_4' = F_4' \quad v_3 = 821 \quad 1{,}5 = 1231 \frac{кг.\ м}{сек} \quad 12\ kW.$$

### *b. Случай опрокидного подъемного сосуда*

На фиг. 24 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного опрокидными сосудами.

Начальное статическое усилие

$$F_{s0}' = kQ + pH + (1 - \alpha)Q' \tag{146}$$

где $(1 - \alpha)$ — коэфициент неуравновешенности мертвой нагрузки.

Статическое усилие в конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 \quad t_0)$

$$F_{s0}'' = F_{s\,(1-0)}' = kQ + p(H - 2h_0). \tag{147}$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ + p(H - 2h_1). \tag{134a}$$

атическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = F_{s2}' - 2ph_2. \tag{137}$$

татическое усилие в конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = F_{s3}' - 2ph_3, \tag{143}$$

или

$$F_{s3} = F_{s4}' \quad kQ - p(H \quad 2h_4). \tag{143a}$$

татическое усилие в конце периода $t_4$

$$F_{s4}'' = kQ - pH - [(1 - \alpha)Q' + Q]. \tag{148}$$

Начальное движущее усилие

$$F_0' \quad F_{s0}' + ma_0. \tag{149}$$

Движущее усилие в конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 - t_0)$

$$F_0'' = F_{(1-0)} = F_{s0}'' + ma_0 = F_{s\,(1-0)}' + ma_1. \tag{150}$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$

$$F_1'' = F_{s1}'' + ma_1. \tag{131b}$$

Движущие усилия в течение всего периода $t_2$ равны статическим усилиям; следовательно,

$$F_2' = F_{s2}'; \quad F_2'' = F_{s2}''$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$

$$F_3 = F_{s3}' - ma_3. \tag{139a}$$

Движущее усилие в конце периода $t_3$

$$F_3'' = F_{s3}'' - ma_3. \tag{142a}$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$

$$F_4' = F_{s4}' - ma_4. \tag{145}$$

Движущее усилие в конце периода $t_4$

$$F_4'' = F_{s4}'' - ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 24.

Пример 14.

Пользуясь данными примера 4, рассчитать элементы подъема применительно к диаграммам на фиг. 24, в предположении *опрокидных клетей*.

Из примера 4 имеем параметры тахограммы:

$t_0 = 5$ *сек*; $a_0 = a_1 = 0{,}44\ \frac{м}{сек^2}$ $t_1 = 16$ *сек*; $t_1 - t_0 = 11$ *сек*; $h_1 = 56$

$t_4 = 7{,}33$ *сек*; $t_2 = 26{,}97$ *сек*; $h_2 = 188{,}79$ *м*; $t_3 = 11{,}7$ *сек*; $h_3$ 49,72 *м*;

$0{,}47\ \frac{м}{сек^2}$; $a_4 = 0{,}2\ \frac{м}{сек^2}$

Кроме того имеем: $p = 5{,}5\ \frac{кг}{м}$; $\alpha = 0{,}48$.

Начальное статическое усилие согласно выражению (146):

$$F_{s0}' = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5 \quad 300 + (1 - 48) \quad 7000 = 7690\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_0$ и в начале периода ($t$ $t_0$) согласно выражению (147):

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5\,(300 \quad 2 \quad 5{,}5) \quad 3990\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ начале периода $t$ гласно выражению (134а):

$$F_{s1}'' = F_{s} = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5\,(300 - 2 \quad 56) = 3434\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ выражению (137):

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 3434 - 2 \quad 5{,}5 \quad 188{,}79 = 1357\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$ гласно выражению (143):

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = 1357 - 2 \quad 5{,}5 \quad 49{,}72 = 810\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (148):

$F_{s4}''$ 1,2 2000 — 5,5 300 — [(1 — 0,48) 7000 + 2000] = — 4890 *кг*.

Начальное движущее усилие согласно выражению (149):

$$F_0' = 7690 + 5000 \cdot 0{,}44 = 9890\ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_0$ в начале периода ($t$ $t_0$) согласно выражению (150):

$$F_0'' = F_1' \quad 3990 + 5000 \cdot 0{,}44 = 6190\ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$ согласно выражению (131b):

$$F_1'' = 3434 + 5000 \quad 0{,}44 = 5634\ кг.$$

Движущие усилия в течение периода $t_2$:

$$F_2' = F = {}_{s2}' 3434\ кг;\ F_2'' = F_{s2}'' = 1357\ кг.$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$ согласно выражению (139а):

$$F_3' = F_{b3}' = 1357 \quad 5000 \cdot 047 = -993\ кг.$$

Движущее усилие конце периода $t_3$ согласно выраже (142а):

$$F_3' \quad F \quad = 810 - 5000 \quad 0{,}47 = \quad 1540 \ кг.$$

Движущее уси в начале периода $t_4$ согласно выражению (145)

$$F_4'' = F_{b4}' = 810 - 5000 \cdot 0{,}2 = -190 \ кг.$$

Движущее уси в конце периода $t_4$ согласно выражению (42

$$F_4'' = F_{b4}'' = 4890 = 5000 \quad 0{,}2 = -5890 \ кг.$$

Мощности, обусловленные статическими усилиями, имеют ниже дующие значения:

в конце периода $t_0$ и начале периода $(t_1 \quad t_0)$

$$P_{s\,0}'' = F_{s0}'' v_1 = 3990 \quad 2{,}2 = 8778 \ \frac{кг.\,м}{сек} = 86 \ kW$$

в конце периода $t_1$ и в начале пе да $t_2$

$$P_{s1}'' = P_{s2}' \quad F_{s1}'' \quad V = F \quad V \quad 3434 \quad 7 \quad 24038 \ \frac{кг.}{сек} = 236 \ kW$$

конце периода $t_2$ в начале периода $t_3$

$$P_{s2} \quad = P_{s3} = F_{s2}'' \quad V \quad F_{s3} \quad V = 1357 \quad = 9499 \ \frac{кг.\,м}{сек} = 93 \ kW$$

конце периода $t$ и в нача периода $t_4$

$$P_{s3}'' = P_{s4}' = F_s \quad = F \quad 810 \quad 1{,}2 \quad 1012{,}5 \ \frac{кг.\,м}{сек} \quad 10 \ kW$$

Мощности на валу барабана, обуслов вижущими лиями, представляются следующим образом:

конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 - t_0)$

$$P_0'' = F_0'' \quad v_1 = 6190 \quad 2{,}2 = 13618 \ \frac{кг.\,м}{сек} = 133{,}5 \ kW,$$

в конце периода $t_1$

$$P_1'' = F_1'' \quad V = 5634 \quad 7 = 39438 \ \frac{кг \cdot м}{сек} = 387 \ kW$$

в да $t_2$

$$P_2' = P_{s2}' = 24038 \ \frac{кг.\,м}{сек} = 236 \ kW$$

$$P_2'' = P_{s2} \quad 9499 \ \frac{кг.\,м}{сек} = 93 \ kW$$

начале периода $t_3$

$$P_3' = F_{b3}' \quad V = \quad 993 \quad 6951 \ \frac{кг.}{сек} \quad 68 \ kW,$$

конце периода $t_3$

$$P_3'' = F_{b3}'' \quad v_3 \quad 1540 \quad 1{,}5 = \quad 2310 \ \frac{кг.\,м}{сек} \quad 23 \ kW$$

начале периода $t_4$

$$P_4' = F_{b4}' \cdot v_3 = -190 \cdot 1{,}5 = -285 \frac{кг.м}{сек} = -3\ kW$$

### 3. Пятипериодная тахограмма с постоянным ускорением в период $t_0$

Определение параметров рассматриваемой пятипериодной тахограммы прямолинейными боками для неуравновешенной системы производится по методу, приведенному выше для статически уравновешенной системы, согласно выражениям (31), (32), (39), (40), (50).... (55).

*а. Случай скипа с донной разгрузкой*

На фиг. 25 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного скипами с *донной* разгрузкой.

Статические усилия изменяются в период $t_0$ по параболе $A_0A$ от значения $F_{s0}' = kQ + pH$ до значения $F_{s0}'' = F_{s1}'$, в период $t_1$ по параболе $AB$ значения $F_{s0}'' = F_{s1}'$ до значения $F_{s1}'' = F_{s2}'$, в период $t_2$ по прямой $BC$ от значения $F_{s2}'$ до значения $F_{s2}''$, в период $t_2$ по параболе $CD$ от значения $F_{s3}'$ до значения $F_{s3}'' = F_{s4}'$; в период $t_4$ изменение статического усилия от значения $F_{s4}'$ до значения $F_{s5}''$ принимаем происходящим ориентировочно по прямой $DE$.

Начальное статическое усилие

$$F_{s0}' = kQ + pH \tag{138a}$$

Статическое усилие в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = kQ + p(H - a_0 t_0^2), \tag{151}$$

или

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = kQ + p(H - 2h_0), \tag{151a}$$

где

$$= \frac{1}{2} a_0 t_0^2.$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = F_{s1}' \quad 2ph_1, \tag{152}$$

где $h_1$ определяется выражением (51).

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = F_{s2}' - 2ph_2, \tag{137a}$$

где $h_2$ определяется выражениями (17) и (54).

Статическое усилие в конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = F_{s3}' - ph_3, \tag{143}$$

где $h_3$ определяется выражением (37),

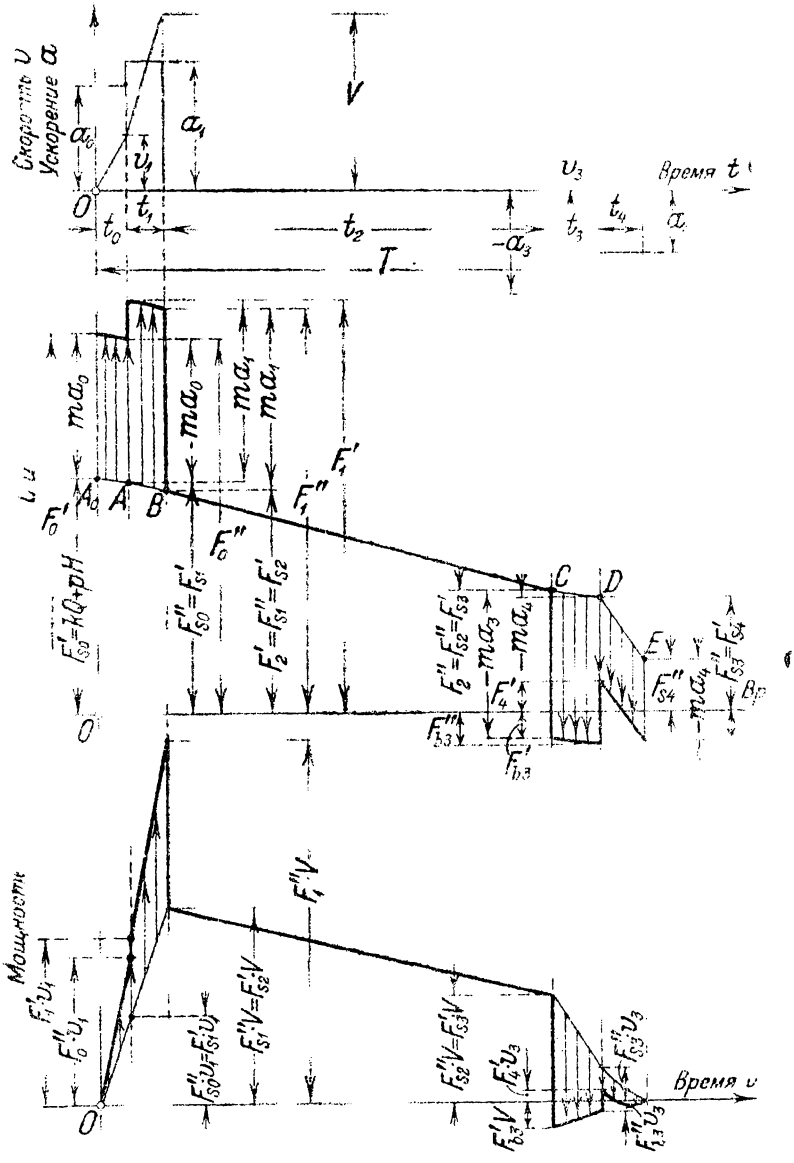
или

$$F_{s3}'' = F \quad = kQ \quad p(H - 2h_4), \tag{148a}$$

$h_4$ — путь, [illegible] димый рамой сосуда в период его разгрузки $t_4$.

Статическое усилие в конце периода $t_4$

$$F_{s4}'' = 0{,}75Q_1' - pH. \tag{144}$$




Фиг 25. Пятипериодная тахограмма с постоянными ускорениями в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для скипов с донной разгрузкой при тормозном режиме с переменным усилием в период $t_3$.

Начальное движущее усилие

$$F_0' = F_{s0}' - ma_0. \tag{153}$$

Движущее усилие в конце периода $t_0$

$$F_0'' = F_{s0}'' + ma_0. \tag{154}$$

Движущее усилие в начале периода $t_1$

$$F_1' = F_{s1}' + ma_1. \tag{155}$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$

$$F_1'' = F_{s1}'' + ma_1. \tag{131b}$$

Движущие усилия в течение периода $t_2$

$$F_2' = F_{s2}';\ F_2'' = F_{s2}''$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$

$$F_3' = F_{b3}' = F_{s3}' \quad ma_2.$$

Движущее усилие в конце периода $t_3$

$$F_3'' = F_{b3}'' = F_{s3}'' - ma_2. \tag{142a}$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$

$$F_4' = F_{s4}' - ma_4. \tag{145}$$

Движущее усилие в конце периода $t_4$

$$F_4'' = F_{b4}'' = F_{s4}'' - ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответствен-ых усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 25.

Пример 15.

Пользуясь данными примеров 3 и 5, рассчитать элементы применительно к диаграммам на фиг. 25.

Согласно полученному в указанных примерах имеем:

$t_0 = 3,$ *сек*; $0,57\ \frac{м}{сек^2}$ $h_0 = h_4 = 3,5$ *м*; $a_1 = 0,7\ \frac{м}{сек^2}$ (за 30);

3,61 *сек*; $h_1$ 11,79 *м*; $t_2 = 72,86$ *сек*; $h_2 = 330,06$ *м*; $t_3$ ,36

16,6 *м*: $a_3 = 0,56\ \frac{}{сек^2}$ $t_4 = 4,67$ *сек*; $a_4$ $0,32\ \frac{м}{сек^2}$.

Кроме $p = 4,3\ \frac{кг}{м}$

Начальное статическое усилие согласно выражению (133а):

$$F_{s0}' = 1,15 \cdot 4000 + 4,3 \cdot 365 = 6170\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_0$ и начале периода выражению (151а):

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = 1,15 \cdot 4000 + 4,3\ (365 \quad \cdot 3,5) = 6139\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ в начале периода $t$ но выражению (152):

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = 6139 - 2 \cdot 4,3 \cdot 11,79 \quad 6038\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ гласно выражению (137 а):

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 6038 - 2 \cdot 4,3 \cdot 330,06 = 3200\ кг.$$

Статическое усилие в конце периода $t$ начале периода $t_4$ гласно выражению (143):

$$F_{s4} \quad F_{s4}' \quad 3200 - 2 \cdot 4{,}3 \cdot 16{,}6 \quad 3057$$

Статическое усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (144

$$F_{s4}'' \quad 0{,}75 \cdot 4000 - 4{,}3 \cdot 365 \quad 1430{,}5 \ кг$$

Начальное движущее усилие согласно выражению (153):

$$F_0' \quad 6170 + 7000 \cdot 0{,}57 \quad 10160 \ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_0$ согласно выражению (154):

$$F_0'' \quad 6139 + 7000 \cdot 0{,}57 \quad 10129 \ кг.$$

Движущее усилие в начале периода $t_1$ гласно выражению (155

$$F_1' \quad 6139 + 7000 \cdot 0{,}7 \quad 11039 \ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$ соглас выраж (131b)

$$F_1'' \quad 6038 + 7000 \cdot 0{,}7 \quad 10938 \ кг.$$

Движущие усилия в течение периода $t_2$:

$$F_2' \quad F_{s2}' \quad 6038 \ кг; \quad F_2'' \quad F_{s2}'' \quad 3200 \ кг.$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$ выражению (139 a):

$$F_3' \quad F_{b3}' = 3200 - 7000 \cdot 0{,}56 \quad 720 \ кг.$$

Движущее усилие в конце периода $t_3$ выраже (142a)

$$F_3'' \quad F_{b3}'' \quad 3057 \quad 7000 \cdot 0{,}56 \quad -863 \ кг.$$

Движущее усилие ачале периода $t_4$ глас выр (145

$$F_4' \quad 3057 \quad 7000 \cdot 0{,}32 \quad 817$$

Движущее усилие конце периода $t_4$ согласно выражению (42)

$$F_4'' = F_{b4}'' = 1430{,}5 - 7000 \cdot 0{,}32 \quad 809{,}5 \ кг.$$

Мощности, обусловленные статическими усилиями, имеют щие значения:
в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$

$$P_{s0}'' = P \quad F_{s0}'' \cdot v_1 = F_{s1} \cdot v_1 = 6139 \cdot \quad 2278 \ \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 120 \ kW$$

в конце перио начал перио $t_2$

$$P_{s1}'' \quad P_{s2}' = F \quad V = F_{s2}' \ V = 6038 \cdot 4{,}53 \quad \frac{кг \cdot м}{сек} = 268 \ kW$$

в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$

$$P_{s2} = P_{s2}' = F_{s2} \quad V = F_{s2}' V = 3200 \cdot 4{,}53 = 14496 \ \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 142 kW.$$

в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$

$$P_{s1}'' = P_{s2}' = F_{s2}'' \cdot v_3 \quad F_{s2} \cdot v_3 = 3057 \cdot 1{,}5 = 4585 \frac{кг \cdot м}{сек} = 45 \ kW$$

Мощности на валу барабана, обусловленные движущими усилиями, представляются следующим образом:

в конце периода $t_0$

$$P_0 \quad F_0'' \cdot v_3 \quad 10129 \cdot 2 = 20258 \frac{кг \cdot м}{сек} \cong 200 \ kW$$

в начале периода $t_1$

$$P_1' = F_1' \cdot v_1 = 11039 \cdot 2 = 22078 \frac{кг \cdot м}{сек} = 216 \ kW;$$

в конце периода $t_1$

$$P_1'' = F_1'' \ V \quad 10938 \cdot 4{,}53 \quad 49549 \frac{кг \cdot м}{сек} = 486 \ kW;$$

в течение

$$P_2' = P_{s2} \quad 27352 \frac{кг \cdot м}{сек} = 268 kW;$$

$$P_2'' \quad P_{s2}'' \quad 14496 \frac{кг \cdot м}{сек} = 142 \ kW;$$

в начале периода $t_3$

$$P_3' = F_{s3} \ V = -720 \cdot 4{,}53 = -3262 \frac{кг \cdot м}{сек} = -32 \ kW;$$

в конце периода $t$

$$P_3'' = F \quad - \quad -863 \cdot 1{,}5 = -1294 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad -13 \ kW;$$

в начале периода $t_4$

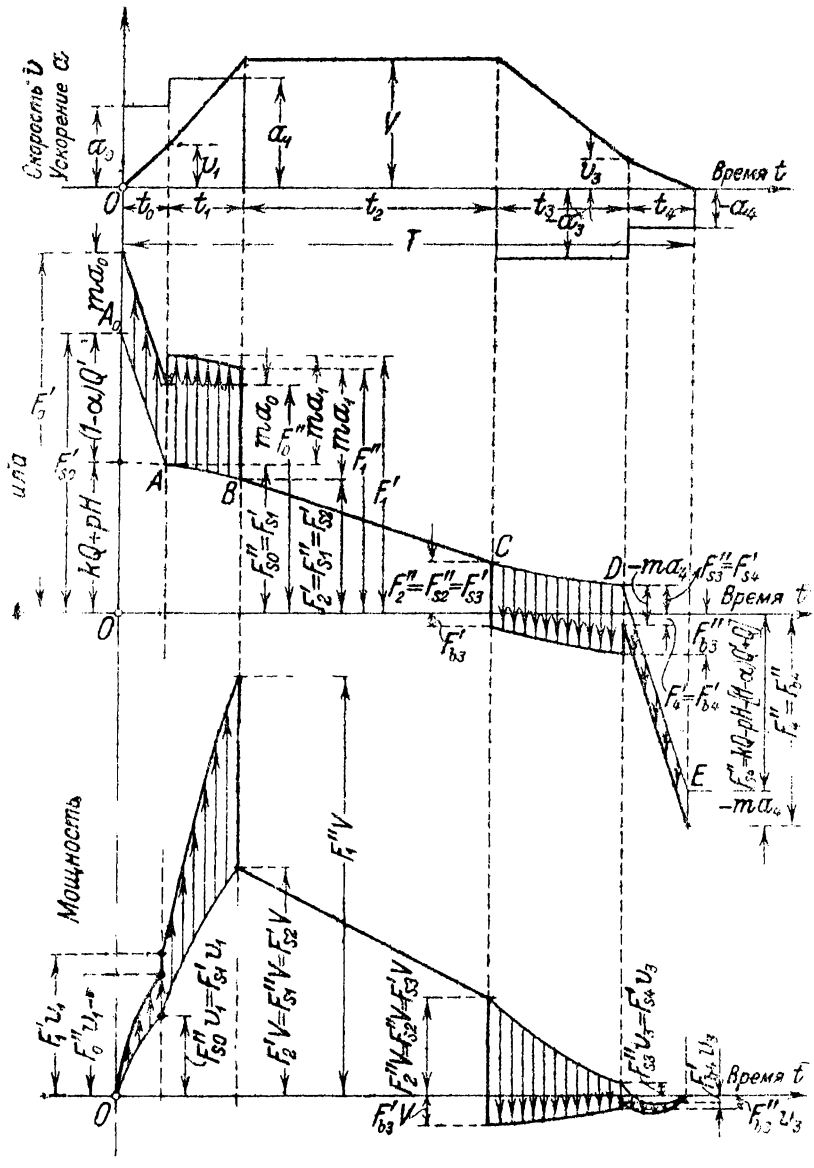
$$= F_4' \cdot v_3 \quad -817 \ 1{,}5 = 1225 \frac{кг \cdot м}{сек} = 12 \ kW.$$

### *b. Случай опрокидного подъемного сосуда*

На фиг. 26 наряду с тахограммой представлены также диаграммы усилий и мощностей для подъема, оборудованного *опрокидными* подъемными сосудами.

Статические усилия в период $t_0$ изменяются ориентировочно по прямой $A_0A$ от значения $F_{s0}' = kQ + pH + (1 \quad \alpha) Q'$ до значения $F_{s0}'' = F_{s1}' = kQ + p (H \quad 2h_0)$; в период $t_1$ указанные усилия изменяются по параболе $AB$ от значения $F_{s1}'$ до значения $F_{s1}'' = F_{s2}'$, в период $t_2$ по прямой $BC$ от значения $F_{s2}'$ до значения $F_{s2}'' = F_{s3}'$, в период $t_3$ по параболе $CD$ от значения $F_{s3}'$ до значения $F_{s3}'' = F_{s4}'$ и, наконец, в период $t_4$ изменение стати-

ческого усилия от значения $F_{s4}'$ до значения $F_{s4}'' = kQ - pH - [(1 - \alpha)Q' + Q]$ (принимаем происходящим ориентировочно по прямой $DE$.




Фиг. 26. Пятипериодная тахограмма с постоянными ускорениями в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для опрокидных сосудов при тормозном замедлении с переменным усилием в период $t_3$.

Начальное статическое усилие [illegible] анному:

$$F_{s0}' = kQ + pH + (1 - \alpha) \qquad (156)$$

В дальнейшем статические усилия [illegible]ставятся сле[illegible] в конце периода $t_0$ и в начале периода

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = kQ + p(H - 2k_0). \qquad (151a)$$

перио  ачале периода $t_2$

$$F_{s1}'' = F_{s'} = F_{s1}' - 2h_1, \tag{152}$$

$$F_{s1} \quad F_{s2} = kQ + p\,[H - 2(h_0 + h_1)], \tag{152a}$$

перио  периода $t_3$

$$F \quad F_{s3}' = F_{s2} - 2ph_2, \tag{137a}$$

$$F_{s2} = F \quad kQ \quad p\,[H \quad 2(h_0 + h_1 + h_2)], \tag{137b}$$

периода $t_4$

$$F_{s3} \quad F_s = F_{s2} \quad 2ph_3, \tag{143}$$

$$F_{s3} \quad F_{s4} = kQ \quad p(H \quad 2h_4). \tag{143a}$$

илие  конце периода $t_4$

$$F_{s4}'' = kQ \quad pH \quad |(1-\alpha)\,Q' + Q|. \tag{157}$$

Движущие усилия по отдельным периодам представляются следующим образом: в начале подъема согласно выражению (153), в конце периода $t_0$ согласно выражению (154), в начале периода $t_1$ согласно выражению (155), конце периода $t_1$ согласно выражению (131b); в течение периода $t_2$ движущие усилия равны соответственным статическим усилиям; движущее усилие в начале периода $t_3$ определяется выражением (139a), в конце периода $t_3$ выражением (142a), в начале периода $t_4$ — выражением (145) в конце периода $t_4$ выражением (42).

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 26.

Пример 16.

Пользуясь данными примеров 4 и 6, рассчитать элементы подъема применительно к диаграммам на фиг. 26, в предположении *опрокидных цепей*.

С  лученному в примерах 4 и 6 имеем параметры тахограммы:

$$,44\ \frac{м}{сек^2} \quad h_0 = h_4 = 5{,}5\ м;\ a_1 = 0{,}6\ \frac{м}{сек^2}\ \text{(задано)};\ t_1 =$$

$$8\ сек; \quad = 36{,}8\ м \quad 7{,}33\ сек;\ t_2 \quad 27{,}31\ сек;\ h_2 = 191{,}17\ м;\ t_3 =$$

$$= 14{,}36\ сек; \quad -61{,}03 \quad = 0{,}38\ \frac{м}{сек^2};\ a_4 = 0{,}2\ \frac{м}{сек^2}$$

Кроме  имеем: $p = 5{,}5\ \frac{кг}{м}$ $\alpha = 0{,}48$.

Нач  татическое усилие согласно выражению (156):

$$F \quad ,2 \cdot 2000 + 5{,}5 \cdot 300 + (1 - 0{,}48)\ 7000 = 7690\ кг.$$

Дальне ачения статических усилий представятся в следую щем виде:

огласно выражению (151 а)

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = 1{,}2 \cdot 2000 + 5{,}5\,(300 - 2.\,5{,}5) = 3\,990 \text{ кг};$$

огласно выражению (152)

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = 3\,390 - 2 \quad 5{,}5 \quad 36{,}8 = 3\,585 \text{ кг};$$

согл выражению (137а)

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 3\,585 - 2 \quad 5{,}5 \quad 191{,}17 = 1\,482 \text{ кг};$$

выражению (143)

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = 1\,482 - 2 \cdot 5{,}5 \cdot 61{,}03 = 811 \text{ кг}.$$

татиче усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (157)

$$F_{s4}'' \quad 1{,}2 \quad 2000 - 5{,}5 \quad 300 \quad [(1 - 0{,}48) \quad 7000 + 2000] = -4890 \text{ кг}.$$

Движущие усилия отдельным периодам представляются следую щим образом.

Начальное движущее усилие согласно выражению (153):

$$F_0' = 7690 + 5000 \cdot 0{,}44 = 9890 \text{ кг}.$$

Движущее илие в конце периода $t_0$ согласно выражению (154):

$$F_0'' = 3990 + 5000 \cdot 0{,}44 = 6\,190 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_1$ согласно выражению (155):

$$F_1' = 3990 + 5000 \cdot 0{,}6 = 6990 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$ согласно выражению (131b):

$$F_1'' = 3585 + 5000 \quad 0{,}6 = 6585 \text{ кг}.$$

Движущие усилия в течение периода $t_2$:

$$F_2' = F_{s2}' = 3585 \text{ кг}; \quad F_2'' = F_{s2}'' = 1482 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_3$ согласно выражению (139а):

$$F_3' = F_{b3}' = 1482 - 5000 \cdot 0{,}38 = -418 \text{ кг}.$$

Движущее усилие конце периода $t_3$ согласно выражению (142а):

$$F_3'' = F_{b3}'' = 811 - 5000 \cdot 0{,}38 = -1089 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_4$ согласно выражению (145):

$$F_4 = F_{b4}' = 811 - 5000 \quad 0{,}2 = -189 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_4$ согласно выражению (42):

$$F_4'' = F_{b4}'' = -4890 - 5000 \cdot 0{,}2 = -5890 \text{ кг}.$$

Мощности, обусловленные статическими усилиями, имеют ниже следующие значения:

конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$

$$P_s \quad P_{s1} \quad F_{s0}'' \quad v_1 = F_{s1}' \cdot v_1 = 3990 \cdot 2{,}2 = 8778 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 86\ kW$$

периода $t$ начале периода $t$

$$P_{s1}'' \quad P_{s2}' = F_{s1}'' \quad V \quad F_{s} \quad V = 3585 \cdot 7 = 25095 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 246\ kW;$$

ко периода ле периода $t_3$

$$P \quad = P_{s3} \quad F \quad V = F_{s} \quad V \quad 1482 \cdot 7 = 10374 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 102\ kW;$$

ко нце пери начале периода $t_4$

$$P''_3 = P' \quad F_{s3}'' \cdot v_3 = F_{s4} \cdot v_3 = 811 \quad 1{,}5 = 216 \frac{кг \cdot}{сек} \quad 12\ kW$$

Мощности на валу барабана, обусловленные движущими усилиями, представляются следующим образом:

ко нце периода $t_0$

$$P_0'' = F_0'' \quad 6190 \quad 2{,}2 = 13618 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 133{,}5\ kW$$

нача периода

$$P_1 \quad F_1 \quad v_1 = 6990 \quad 2{,}2 = 15378 \frac{кг \cdot м}{сек} = 151\ kW;$$

периода $t_1$

$$P_1 = F_1'' \quad v_1 = 6585 \quad 7 = 46095 \frac{кг \cdot м}{сек} = 452\ kW;$$

тение пери

$$\begin{cases} P_2' = P_{s2}' = 25095 \frac{кг \cdot м}{сек} = 246\ kW, \\ P_2'' = P_{s2}'' = 10374 \frac{кг \cdot м}{сек} \quad 102\ kW; \end{cases}$$

периода

$$P \quad = F_{b3} \quad 418 \quad 7 = -2926 \frac{кг \cdot м}{сек} = -29\ kW;$$

в конце периода $t_3$

$$P_3'' = F_{b3}'' \cdot v_3 = -1089 \quad 1{,}5 = 1633 \frac{кг \cdot м}{сек} = -16\ kW$$

нача периода $t_4$

$$P \quad F_{b4} \quad v_3 = 189 \quad 1{,}5 = 284 \frac{кг \cdot м}{сек} = -2{,}8 \approx 3\ kW.$$

## В. ТАХОГРАММЫ С ВОГНУТЫМИ БОКАМИ

### 1. Трехпериодная тахограмма

Рассмотрим режим подъема при *постоянном* движущем усилии $F_1$ в период *пуска* $t_1$.

Уравнение динамического равновесия (128а) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{2p}{m}x = \frac{F_1 - kQ - pH}{m} \tag{128b}$$

Решая это уравнение, получим общий интеграл его:

$$x = -\frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p} + C_1' e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t}$$

где $e$ — основание Неперовых логарифмов, $C_1'$ и $C_2'$ — произвольные постоянные, определяемые из условия, что при $t = 0$, $x = 0$.

Таким образом, из последнего выражения получаем:

$$C_1' + C_2' = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p}. \tag{$\alpha$}$$

Дифференцируя полученное выше выражение для $x$, получаем скорость:

$$v = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2p}{m}}\left( C_1' e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t} - C_2' e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t} \right)$$

Так как в начале подъема, при $t = 0$, скорость $v = 0$, то из последнего выражения получаем:

$$C_1' = C_2 \tag{$\beta$}$$

Решая уравнения ($\alpha$) и ($\beta$), получаем:

$$C_1' = C_2' = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{4p}$$

Таким образом, окончательно получаем выражение для пройденного клетями (подъемными сосудами) пути:

$$x = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p}\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t} + e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t}}{2} - 1 \right) \tag{158}$$

или

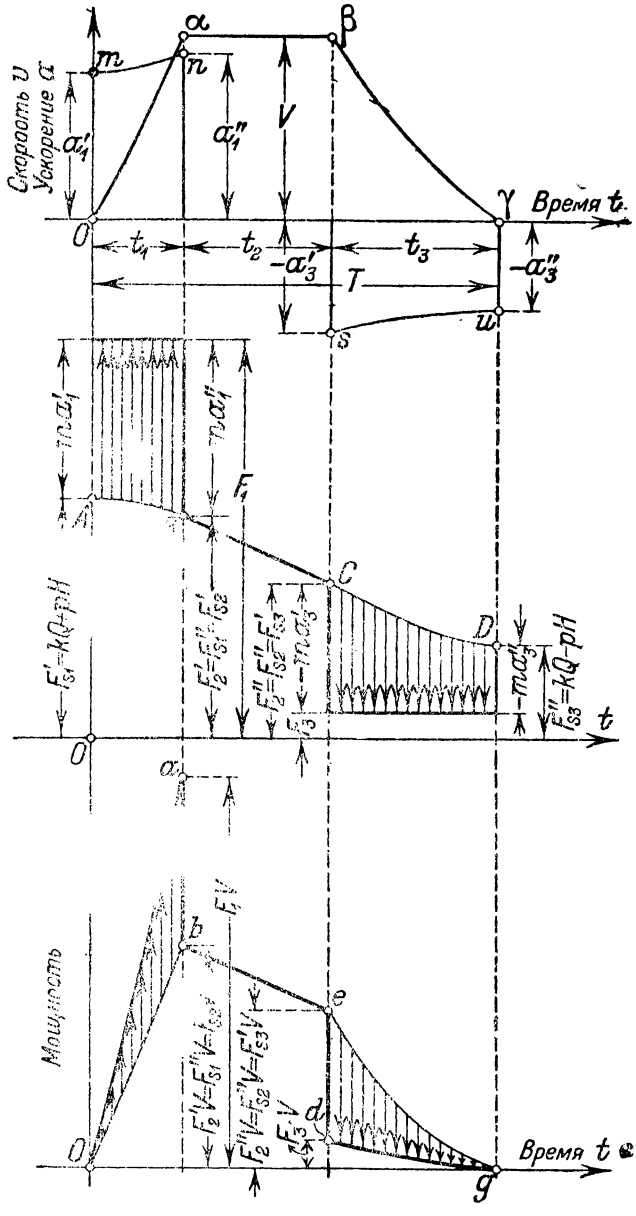
$$x = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p}\left[ \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) - 1 \right] \tag{158a}$$

Путь $h_1$, пройденный в течение периода пуска, можем определить из выражений (158) и (158а), полагая в них $t = t_1$:

$$h_1 = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p}\left( \frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t_1} + e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t_1}}{2} - 1 \right) \tag{159}$$

или

$$h_1 = \frac{F_1 - (kQ+pH)}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right) - 1\right] \qquad (159a)$$




Фиг. 27. Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону гиперболического косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при моторном замедлении с постоянным усилием $F_3$ в период $t_3$.

Скорость

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{F_1 - (kQ+pH)}{\sqrt{2pm}} \times \times \frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t} - e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t}}{2}, \qquad (160)$$

или

$$v = \frac{F_1 - (kQ+pH)}{\sqrt{2pm}} \times \times \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t\right). \qquad (160a)$$

Выражения (160) и (160а) показывают, что при неуравновешенной системе подъема в случае *постоянного движущего усилия* в период *пуска* изменение скорости в функции времени происходит по закону *гиперболического синуса.* На фиг. 27 указанная скорость изменяется по гиперболической синусоиде $O\alpha$.

В конце периода $t_1$ скорость $v$ получает максимальное значение $V$, определяемое выражениями:

$$V = \frac{F_1 - (kQ+pH)}{\sqrt{2pm}} \times \times \frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1} - e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}}{2}, \qquad (161)$$

или

$$V = \frac{F_1 - (kQ+pH)}{\sqrt{2pm}} \times \times \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right). \qquad (161a)$$

Из последнего выражения получаем значение движущего усилия $F_1$

в функции периода $t_1$:

$$F_1 = kQ + pH + \frac{V\sqrt{2pm}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right)}. \qquad (162)$$

Решая уравнение (161а) относительно $t_1$, получаем:

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\ \mathrm{Arsinh}\ \frac{V\sqrt{2pm}}{F_1 - (kQ + pH)} \qquad (163)$$

Ускорение пуска

$$a_1 = \frac{dv}{dt} = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{m}\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) = var. \qquad (164)$$

Наименьшее значение пускового ускорения $a_{1(\min)}$ получается в начале подъема при $t=0$:

$$a_{1\,(\min)} = a_1' = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{m} \qquad (165)$$

На фиг. 27 ускорение пуска изменяется от значения $a_1'$ до величины $a_1''$ по гиперболической косинусоиде $mn$.

Из выражения (165) получаем значение движущего усилия $F_1$ в функции начального ускорения $a_1'$:

$$F_1 = (kQ + pH) + ma_1'. \qquad (166)$$

На основании выражения (165) величина ускорения $a_1$ может быть представлена следующим образом:

$$a_1 = a_1' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) \qquad (164а)$$

Равным образом, на основании выражения (165) уравнение (128b) может быть представлено так:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{2p}{m}x = a_1' \qquad (128c)$$

Статическая сила сопротивления $F_s$, обусловленная полезным грузом, вредными сопротивлениями и неуравновешенными частями канатов, определяется из выражения:

$$F_s = kQ + p\,(H - 2x).$$

Подставляя в последнее выражение вместо $x$ его значение из выражения (158а), получаем:

$$F_s = F_1 - [F_1 - (kQ + pH)]\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) \qquad (167)$$

На фиг. 27 статическое усилие изменяется в течение периода $t_1$ по гиперболической косинусоиде $AB$.

Наибольшее значение статической силы сопротивления $F_s$ получается в начале подъема, при $t = 0$:

$$F_{s\,(\max)} = F_{s1}' = kQ + pH.$$

Здесь следует отметить, что значение $F_{s\,(\max)}$, имеющее место в начале подъема, получилось таким же, как и для случая изменения статического

сопротивления $F_s$ в период пуска по закону параболы согласно выражению (133); объясняется это тем, что начальная величина сопротивления $F_{s\,(max)}$ совершенно не зависит от закона изменения статического сопротивления в период движения.

Мощность на валу барабана, обусловленная постоянным движущим усилием $F_1$ в период пуска, равна:

$$P = F_1 \cdot v,$$

или

$$P_1 = F_1 \cdot \frac{F_1 - (kQ + pH)}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right). \tag{168}$$

Мощность в период пуска, обусловленная статическим усилием:

$$P_s = F_s \cdot v,$$

или

$$P_s = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{\sqrt{2pm}} \left[ F_1 \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) - \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2} \sinh\left(2\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right)\right]. \tag{169}$$

Последнее выражение показывает, что мощность $P_s$, идущая на преодоление в период $t_1$ статических сопротивлений, изменяется в функции времени по закону разности двух гиперболических синусоид.

На фиг. 27 указанная мощность изменяется по линии $Ob$.

Для периода *равномерного хода* $t_2$ движущее усилие $F$, равное статическому усилию $F_s$, определяется выражением:

$$F = F_s = kQ + p(H - 2x), \tag{135}$$

где путь

$$x = h_1 + Vt. \tag{82}$$

Необходимо, однако, отметить, что входящая в выражение (82) величина пути $h_1$, проходимого в течение периода $t_1$, получается на основании выражений (159) и (159 а).

Мощность на валу барабана $P$, равная мощности $P_s$, обусловленной статическими усилиями, получается на основании выражения:

$$P = P_s = F \cdot V = F_s V, \tag{85a}$$

где $F = F_s$ определяется выражениями (135) и (82).

Для периода *замедления* предположим аналогично рассмотренному выше для системы с тяжелым хвостовым канатом, что движение в указанный период имеет направление, противоположное действительному, то есть, начало движения будем считать от конечного пункта пути, при отрицательных значениях пути и времени.*

---

* При исследовании периода замедления можно исходить также и из условия действительного направления движения, что и произведено автором в труде „Динамика рудничного подъема с постоянным радиусом навивки на основе трапецоидальной диаграммы скорости". (1924 г., стр. 42 — 51). При этом, однако, необходимо сделать не соответствующее действительности допущение, состоящее в том, что движение условно предполагается происходящим в течение полного периода $T$ по тому же закону, что и в период замедления; в таком случае при решении уравнения динамического равновесия (128b) определение произвольных постоянных производится из условия, что при $t = T$, путь $x = H$ и скорость $v = 0$.

Тогда уравнение (128 а) динамического равновесия для данного случая примет вид:

$$F_з = kQ - p(H+2x) + m\frac{d^2x}{dt^2}, \tag{128c}$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{2p}{m}x = -\frac{kQ - pH - F_з}{m}, \tag{128d}$$

причем постоянное движущее усилие $F_з < F_{sз}''$, где $F_{sз}''$—статическая сила сопротивления, имеющая место в конце подъема.

Решая последнее уравнение относительно $x$ и принимая во внимание, что при $t=0$, $x=0$ и $v=0$, окончательно получаем:

$$x = -\frac{kQ - pH - F_з}{2p}\left(\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t} + e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t}}{2} - 1\right), \tag{170}$$

или

$$x = -\frac{kQ - pH - F_з}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t\right) - 1\right] \tag{170a}$$

Абсолютное значение пути $h_з$, проходимого подъемными сосудами в течение периода $t_з$, может быть определено из выражений (170) и (170 а), полагая в них $t = -t_з$:

$$h_з = \frac{kQ - pH - F_з}{2p}\left[\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з} + e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з}}{2} - 1\right] \tag{171}$$

$$h_з = \frac{kQ - pH - F_з}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з\right) - 1\right] \tag{171a}$$

Скорость

$$v = -\frac{kQ - pH - F_з}{\sqrt{2pm}} \cdot \frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t} - e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t}}{2}, \tag{172}$$

или

$$v = -\frac{kQ - pH - F_з}{\sqrt{2pm}}\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t\right). \tag{172a}$$

Выражения (172) и (172 а) показывают, что *скорость* в период *замедления* при *постоянном движущем усилии* $F_з$ изменяется по закону *гиперболического синуса*. На фиг. 27 указанная скорость изменяется по гиперболической синусоиде $\beta\gamma$.

В начале периода замедления, то есть, при $t=-t_з$, скорость $v$ получает значение $V$, определяемое из выражений (172) и (172 а):

$$V=\frac{kQ-pH-F_з}{\sqrt{2pm}}\cdot\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з}-e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з}}{2}. \tag{173}$$

$$V=\frac{kQ-pH-F_з}{\sqrt{2pm}}\sin h\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з\right). \tag{173а}$$

Из последнего выражения получаем значение движущего усилия $F_з$ в функции периода $t_з$:

$$F_з=(kQ-pH)-\frac{V\sqrt{2pm}}{\sin h\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t_з\right)}. \tag{174}$$

Решая уравнение (173 а) относительно $t_з$, получаем:

$$t_з=\sqrt{\frac{m}{2p}}\,\mathrm{Arsin\,h}\,\frac{V\sqrt{2pm}}{kQ-pH-F_з} \tag{175}$$

Величину замедления получим, продифференцировав выражение (172а):

$$a_з=\frac{dv}{dt}=-\frac{kQ-pH-F_з}{m}\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t\right)=var. \tag{176}$$

На фиг. 27 замедление изменяется от значения $a'_з$ до величины $a''_з$ по гиперболической косинусоиде *su*.

Наименьшего значения по абсолютной величине замедление достигает в конце подъема, то есть, при $t=0$:

$$a_{з\,(\min)}=a_з''=-\frac{kQ-pH-F_з}{m}. \tag{177}$$

Из выражения (177) имеем значение движущего усилия $F_з$ в функции конечного замедления $a_з''$:

$$F_з=(kQ-pH)+ma_з'', \tag{178}$$

где $a_з''$ — отрицательная величина.

Здесь следует отметить, что определяемое на основании выражений (174) и (178) постоянное движущее усилие $F_з$ может иметь значения:

1) $F_з>0$, при котором получается моторный режим (фиг. 27);

2) $F_з=0$, при котором имеет место режим свободного выбега (фиг. 28);

3) $F_з<0$, при котором получается тормозной режим (фиг. 29).

На основании выражения (177) величина замедления $a_з$ может быть представлена следующим образом:

$$a_з=a_з''\cos h\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t\right). \tag{176а}$$

Равным образом, на основании выражения (177) уравнение (128d) для рассматриваемого случая может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{2p}{m}x = a_3'' \qquad (128e)$$

Статическая сила сопротивления определяется из выражения:*

$$F_s = kQ - p(H+2x). \qquad (179)$$

Подставляя в последнее выражение вместо $x$ его значение из выражения (170 а), окончательно получаем:

$$F_s = F_3 + (kQ - pH - F_3) \times$$

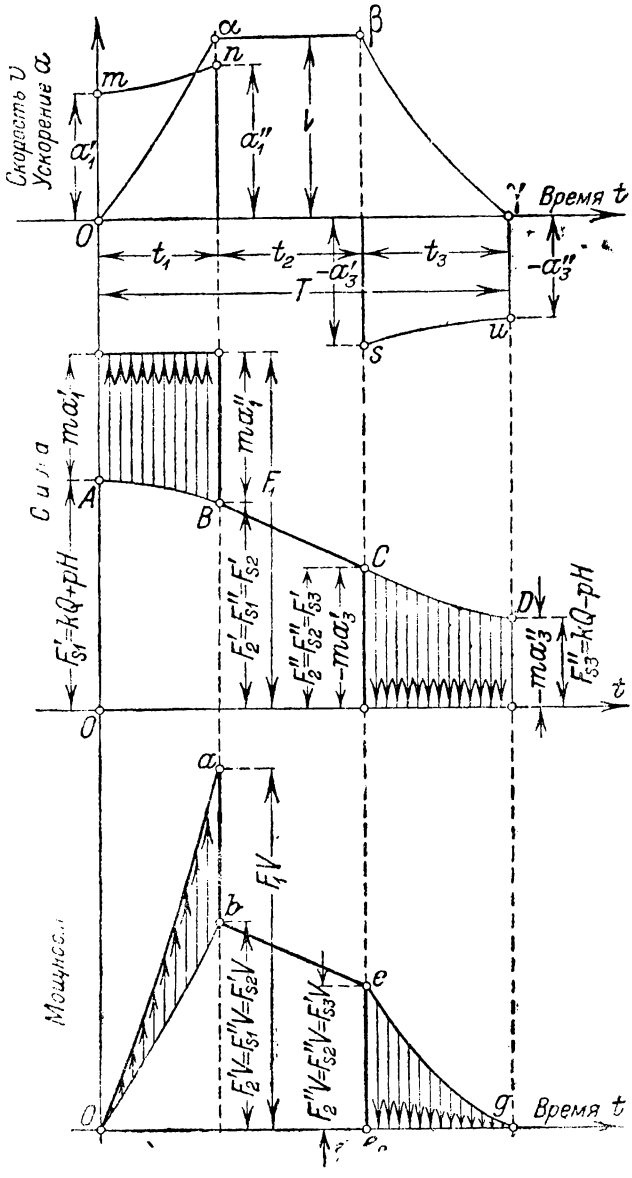
$$\times \cos h\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right). \qquad (180)$$

На фиг. 27 статическое усилие в течение периода $t_3$ изменяется по гиперболической косинусоиде $CD$.

Наименьшее значение силы $F_s$ получается в конце подъема, то есть, при $t=0$;

$$F_{s(\min)}{}^{**} = F''_{s3} = kQ - pH.$$

Мощность, обусловленная в период за-




Фиг. 28. Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону гиперболического косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при режиме свободного выбега в период $t_3$.

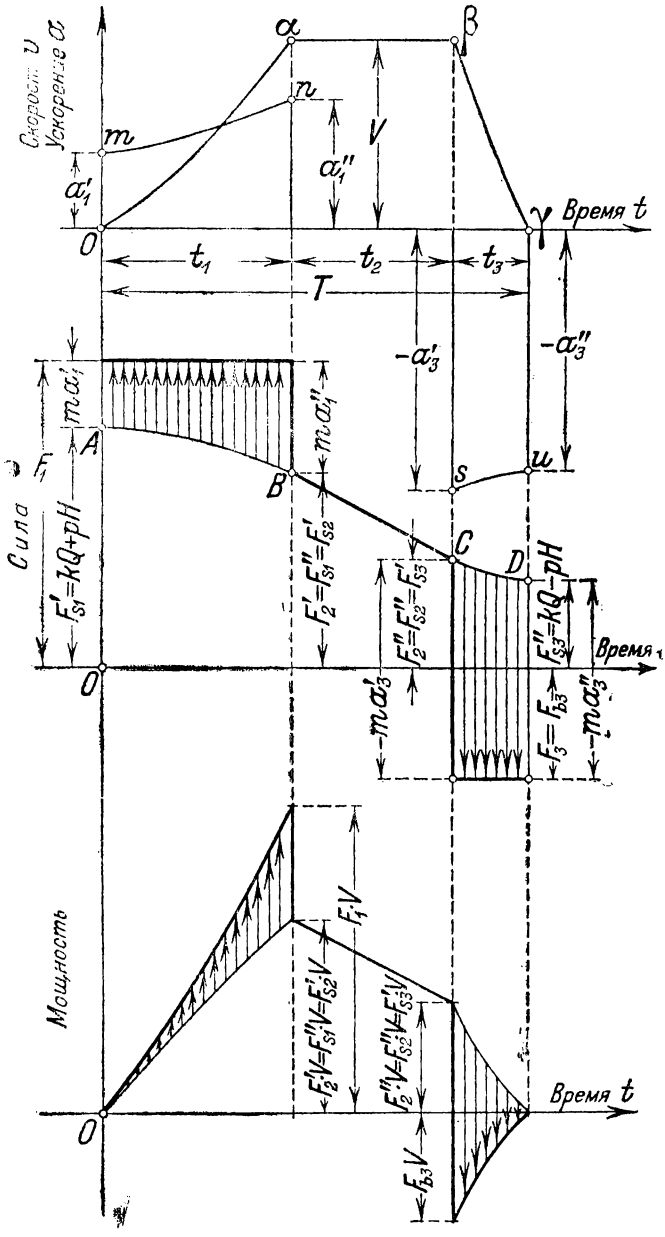
---

* Получаемого из выражения (128c) при $m\frac{d^2x}{dt^2}=0$.

**Значение $F_{s(\min)}$, имеющее место в конце подъема, получилось таким же, как и для случая изменения статического сопротивления $F_s$ в период замедления по закону параболы согласно выражению (141); объясняется это тем, что конечная величина сопротивления $F_{s(\min)}$ совершенно не зависит от закона изменения статического сопротивления в период движения.

медления постоянным движущим усилием $F_з$, определяется из выражения:

$$P = F_з \cdot v.$$




Фиг. 29. Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону гиперболического косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при тормозном режиме с постоянным усилием $F_{b3}$ в период $t_3$.

Подставляя вместо величины $v$ ее значение из выражения (172а), получаем:

$$P = -F_з \cdot \frac{kQ - pH - F_з}{\sqrt{2pm}} \times \times \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right). \quad (181)$$

На фиг. 27 мощность $P$ в период $t_з$ изменяется по гиперболической синусоиде $dg$.

Мощность, обусловленная статическим сопротивлением и затрачиваемая в период замедления на завершение подъема, определяется из выражения:

$$P_s = F_s \cdot v.$$

Принимая во внимание выражения (180) и (172а), получаем:

$$P_s = -\frac{kQ - pH - F_з}{\sqrt{2pm}} \times \times \left[F_з \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) + + \frac{kQ - pH - F_з}{2} \times \times \sinh\left(2\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right)\right] \quad (182)$$

Последнее выражение показывает, что мощность $P_s$, идущая на преодоление в период замедления статических сопротивлений, изменяется в функции времени по закону суммы двух гиперболических синусоид. На фиг. 27 указанная мощность изменяется по линии $e_g r$.

Графическая интерпретация работы подъема неуравновешенной системы при тахограмме с двумя вогнутыми боками (гиперболическими синусоидами) представлена: на фиг. 27 для случая моторного режима в период замедления, на фиг. 28 для случая свободного выбега в указанный период и на фиг. 29 для случая тормозного режима в период $t_3$, при постоянном тормозном усилии $F_{b3}$. На этих фигурах статические усилия изменяются по кривым $ABCD$, части которых $AB$ и $CD$ представляют гиперболические косинусоиды, определяемые соответственно выражениями (167) и (180).

---

В заключение следует отметить, что при определении параметров тахограммы с обоими вогнутыми боками необходимо исходить или из начального значения ускорения $a_1'$, или из конечного значения замедления $a_3''$, одним из коих следует задаться. При этом необходимо иметь в виду, что в рассматриваемом случае вполне точное определение указанных параметров не может быть произведено, вследствие чего определение периода полного хода $t_2$ приходится производить путем подбора, согласно выражению*:

$$t_2 > \frac{2H}{V} - T' \tag{183}$$

С целью проверки правильности выбора величины $t_2$, с достаточной для практики точностью может служить выражение:

$$H = h_1 + h_2 + h_3, \tag{21}$$

где $h_1$ определяется выражениями (159) и (159а), $h_2 = Vt_2$, $h_3$ получается из выражений (171) и (171а).

Пример 17.

Определить элементы тахограммы с двумя вогнутыми боками применительно к фиг. 29 для следующих данных.

$Q = 2200$ *кг*; $H = 300$ *м*; $m = 2500$ *кг*. $м^{-1}$. $сек^2$; $V = 10\ \frac{м}{сек}$; $T = 45$ *сек*;

$p = 4\ \frac{кг}{м}$ $\quad k = 1{,}2$.

Задаемся начальным значением пускового ускорения $a_1' = 0{,}4\ \frac{м}{сек^2}$.

Постоянное движущее усилие $F_1$ в период $t_1$ согласно выражению (166):

$$F_1 = (1{,}2 \cdot 2200 + 4 \cdot 300) + 2500 \cdot 0{,}4;$$

$$F_1 = 4840\ кг.$$

Период $t_1$ согласно выражению (163):

$$t_1 = \sqrt{\frac{2500}{2 \cdot 4}}\ \mathrm{Ar\,sinh}\ \frac{10\sqrt{2 \cdot 4 \cdot 2500}}{4840 - (1{,}2 \cdot 2200 + 4 \cdot 300)}$$

$$t_1 = 20{,}26\ сек.$$

---

* Аналогичному выражению (16) для тахограммы с прямолинейными боками. См. А. П. Герман и Ф. Н. Шклярский. „Рудничные подъемные установки" Часть I, стр. 130 1940, а также труды акад. А. П. Германа, относящиеся к шахтному подъему.

Значение пускового ускорения $a_1''$, имеющее место в конце периода $t_1$, согласно выражению (164а):

$$a_1'' = a_1' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) = 0{,}4 \cosh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 4}{2500}}\cdot 20{,}26\right);$$

$$a_1'' = 0{,}69\ \frac{м}{сек^2}$$

Путь $h_1$ согласно выражению (159а):

$$h_1 = \frac{4840 - (1{,}2\cdot 2200 + 4\cdot 300)}{2\cdot 4}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 4}{2500}}\cdot 20{,}26\right) - 1\right]$$

$$h_1 = 91{,}37\ м.$$

Согласно выражению (183):

$$t_2 > \frac{2\cdot 300}{10} - 45;\ t_2 > 15\ сек.$$

Примем $t_2 = 17{,}05$ *сек*

Тогда $h_2 = Vt_2 = 10\cdot 17{,}05 = 170{,}5$ *м*.
Период $t_3 = T - (t_1 + t_2) = 45 - (20{,}26 + 17{,}05)$;

$$t_3 = 7{,}69\ сек.$$

Постоянное движущее (тормозное) усилие $F_3 = F_{b3}$ в период $t_3$ согласно выражению (174):

$$F_3 = F_{b3} = (1{,}2\cdot 2200 - 4\cdot 300) - \frac{10\sqrt{2\cdot 4\cdot 2500}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 4}{2500}}\cdot 7{,}69\right)};$$

$$F_3 = F_{b3} = -1717\ кг.$$

Путь $h_3$ согласно выражению (171а):

$$h_3 = \frac{1{,}2\cdot 2200 - 4\cdot 300 + 1717}{2\cdot 4}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 4}{2500}}\cdot 7{,}69\right) - 1\right]$$

$$h_3 = 37{,}93\ м.$$

Проверка:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 = 91{,}37 + 170{,}5 + 37{,}93 = 299{,}8\ м \leqq 300\ м.$$

Конечное значение замедления $a_3''$ по абсолютной величине согласно выражению (177):

$$a_3'' = \frac{1{,}2\cdot 2200 - 4\cdot 300 + 1717}{2500} = 1{,}26\ \frac{м}{сек^2}.$$

---

* При $t_2 = 17{,}1$ *сек* полная высота подъема $H = 300{,}47\ м > 300\ м$; при $t_2 = 17$ *сек* получается $H = 299{,}44\ м < 300\ м$.

Начальное значение замедления $a_3'$ согласно выражению (176а)

$$a_3' = a_3'' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) = 1{,}26 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \cdot 7{,}69\right);$$

$$a_3'' = 1{,}38 \frac{м}{сек^2}$$

---

При определении элементов тахограммы с вогнутыми боками можно также исходить из конечного значения замедления $a_3''$, задаваясь последним. В таком случае сначала следует определить усилие $F_3$ согласно выражению (178), после чего из выражения (175) определяется период $t_3$. Затем, на основании выражения (171) определяется путь $h_3$. Далее, согласно неравенству (183) выбирается период $t_2$, определяется затем путь $h_2$, после чего получается период $t_1$ из равенства: $t_1 = T - (t_2 + t_3)$. Наконец, согласно выражению (162) определяется постоянное пусковое усилие $F_1$ и из выражения (159а) путь $h_1$, после чего правильность выбора периода $t_2$ проверяется на основании выражения (21).

## 2. Двухпериодная тахограмма

В отдельных случаях практики, при неглубоких шахтах с клетевым подъемом, может иметь место при $t_2 = 0$ двухпериодная тахограмма с двумя вогнутыми боками, как частный случай трехпериодной тахограммы. Следует при этом иметь в виду, что при неуравновешенной системе подъема, во избежание недопустимых значений пускового ускорения, период замедления $t_3$ не должен быть продолжительным, что может быть достигнуто при осуществлении в указанный период свободного выбега (фиг. 30) или тормозного режима.

Максимальная скорость $V$ при этом имеет значение:*

$$V > 2\frac{H}{T} \qquad (184)$$

При точном определении параметров двухпериодной тахограммы необходимо исходить из условий режима в период замедления. Задаваясь, например, режимом свободного выбега в последний период, определение искомых величин, каковыми в рассматриваемом случае являются параметры $t_1$ и $F_1$, можем произвести, основываясь на нижеследующих двух положениях:

1) скорости, достигаемые в конце периода пуска и в начале периода замедления, должны иметь одну и ту же величину $V$;

2) сумма путей, пройденных в периоды пуска и замедления, должна составлять полную высоту подъема $H$.

Пользуясь выражениями (161а) и (173а) для значений скорости $V$

---

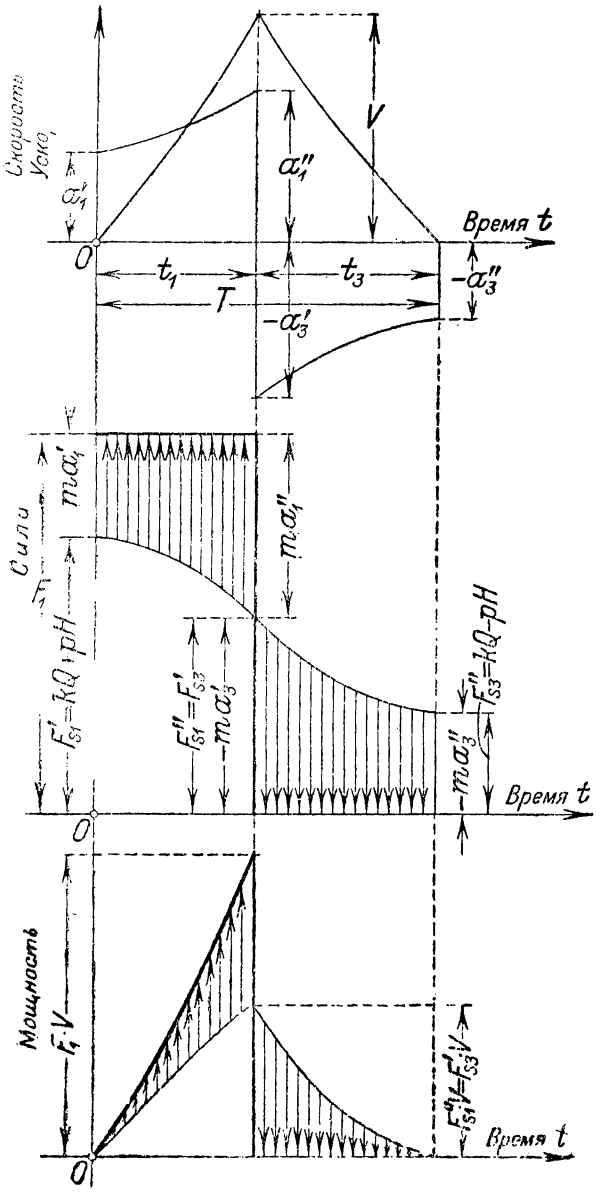
* По аналогии с выражением (22).

** При $F_3 = 0$, выражение (173а) принимает вид:

$$V = \frac{kQ - pH}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right)$$

принимая во внимание, что в данном случае период $t_3 = T - t_1$, на основании первого из приведенных выше положений можем написать:

$$|F_1 - (kQ + pH)| \times \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) = (kQ - pH) \times \sinh\left[\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T - t_1)\right]. \quad (185)$$




Фиг 30. Двухпериодная тахограмма с вогнутыми боками при переменных ускорениях, изменяемых по закону гиперболического косинуса в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при режиме свободного выбега в период $t_3$.

Пользуясь выражением (159а) для пути $h_1$ и абсолютным значением пути $h_3$ из выражения (171а)*, на основании второго положения, имея в виду, что $t_3 = T - t_1$, можем написать:

$$\frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p} \times \left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) - 1\right] + \frac{kQ - pH}{2p} \times \left\{\cosh\left[\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T - t_1)\right] - 1\right\} = H. \quad (186)$$

Совместное решение уравнений (185) и (186) производим следующим образом.

Решая каждое из указанных уравнений относительно $F_1$, получаем:

---

* При $F_3 = 0$ выражение (171а) принимает вид:

$$h_3 = \frac{kQ - pH}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) - 1\right]. \quad (171б)$$

$$F_1 = \frac{(kQ - pH)\sinh\left[\sqrt{\frac{2p}{m}}(T - t_1)\right]}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right)} + (kQ + pH). \qquad (187)$$

$$F_1 = \frac{(kQ + pH)\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right) - (kQ - pH)\cosh\left[\sqrt{\frac{2p}{m}}(T - t_1)\right]}{\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right) - 1}. \qquad (188)$$

Приравнивая между собой выражения (187) и (188) и исключая тем самым параметр $F_1$, после ряда преобразований получаем:

$$\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right)\left[kQ + pH - (kQ - pH)\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)\right] +$$

$$+ (kQ - pH)\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right) - 1\right] = 0. \qquad (189)$$

Полагая в выражении (189):

$$\left.\begin{aligned} kQ + pH - (kQ - pH)\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right) &= a \\ (kQ - pH)\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right) &= b \\ \sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1 &= x \end{aligned}\right\} \qquad (A)$$

указанное выражение (189) можем представить в следующем виде:

$$a\sinh x + b(\cosh x - 1) = 0,$$

или

$$a\sinh x - b(1 - \cosh x) = 0. \qquad (190)$$

Имея в виду, что:

$$\sinh x = 2\sinh\frac{x}{2}\cosh\frac{x}{2}$$

$$1 - \cosh x = -2\sinh^2\frac{x}{2},$$

выражение (190) можем представить следующим образом:

$$2a\sinh\frac{x}{2}\cosh\frac{x}{2} + 2b\sinh^2\frac{x}{2} = 0.$$

Из последнего выражения имеем:

$$\operatorname{tgh}\frac{x}{2} = -\frac{a}{b} \qquad (191)$$

Подставляя в последнее уравнение вместо величин $a$, $b$ и $x$ их значения из выражений (А), получаем:

$$\operatorname{tgh}\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right)=-\frac{(kQ+pH)-(kQ-pH)\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)}{(kQ-pH)\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)}.$$

Решая последнее уравнение относительно $t_1$, имеем:

$$t_1=\sqrt{\frac{2m}{p}}\ \operatorname{Artgh}\frac{(kQ-pH)\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)-\left(kQ+pH\right)}{(kQ-pH)\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T\right)}. \qquad (192)$$

Зная $t_1$, на основании выражений (187) или (188) можем определить величину пускового усилия $F_1$ *.

---

Выражения для $t_1$ и $F_1$ можно получить и в ином виде. В самом деле, пользуясь выражениями (161) и (173) для значений скорости $V$, на основании первого из приведенных выше положений можем написать:

$$[F_1-(kQ+pH)]\left(e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}-e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}\right)=$$

$$=(kQ-pH)\left[e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T-t_1)}-e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T-t_1)}\right]. \qquad (185a)$$

Пользуясь выражениями (159) и (171) соответственно для путей $h_1$ и $h_3$ на основа- второго положения имеем:

$$\frac{F_1-(kQ+pH)}{2p}\left(\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}+e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}}{2}-1\right)+$$

$$+\frac{kQ-pH}{2p}\left[\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T-t_1)}+e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,(T-t_1)}}{2}-1\right]=H. \qquad (186a)$$

Решение уравнений (185а) и (186а) дает следующее выражение для определения периода $t_1$:

$$t_1=\sqrt{\frac{m}{2p}}\cdot\frac{1}{\lg e}\ \lg\frac{(kQ-pH)\,e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T}-(kQ+pH)}{(kQ+pH)-(kQ-pH)\,e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T}} \qquad (192a)$$

Зная $t_1$, на основании выражения (185а) можем получить величину пускового уси- $F_1$ в следующем виде:

$$F_1=\frac{(kQ-pH)\left(e^{2\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T}-e^{2\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}\right)}{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,T}\left(e^{2\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1}-1\right)}+kQ+pH. \qquad (187a)$$

Следует при этом отметить, что на практике могут иметь место случаи, когда при свободном выбеге и в отсутствии периода полного хода период замедления $t_3$ получается настолько значительным, а период пуска настолько непродолжительным, что пусковое усилие $F_1$, обусловливающее величину пиковой мощности, может оказаться практически неприемлемым (слишком большим). Тогда, с целью уменьшения периода $t_3$, пришлось бы в означенный период применить тормоз, развивающий определенное постоянное усилие $F_b$. Для определения искомых величин $t_1$ и $F_1$ можно было бы воспользоваться выражениями (192) и (187),* в которых, однако, вместо величины $kQ$ следовало бы поставить $kQ+F_b$, причем величиной $F_b$ пришлось бы задаться.

Зная величины $t_1$ и $F_1$, нетрудно определить остальные параметры подъема.

Пример 18.

В применении к диаграммам на фиг. 30 определить основные элементы подъема для следующих данных.

$$Q=2200\ кг;\ H=300\ м;\ m=2500\ кг\cdot м^{-1}\cdot сек^2;\ T=45\ сек;\ p=4\frac{кг}{м};$$

$k=1{,}1$.

На основании выражения (192) получаем:

$$t_1=\sqrt{\frac{2.2500}{4}}\operatorname{Ar\,tgh}\frac{(1{,}1.2200-4.300)\cosh\left(\sqrt{\frac{2.4}{2500}}\cdot 45\right)-(1{,}1.2200+4.300)}{(1{,}1.2200-4.300)\sinh\left(\sqrt{\frac{2.4}{2500}}\ 45\right)}$$

$$t_1=21{,}4\ сек.$$

На основании выражения (187) имеем:

$$F_1=\frac{(1{,}1.2200-4.300)\ \sinh\left[\sqrt{\frac{2.4}{2500}}(45-21{,}4)\right]}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2.4}{2500}}\cdot 21{,}4\right)}+(1{,}1.2200+4.300);$$

$$F_1\cong 5000\ кг.$$

Скорость $V$, имеющая место в конце периода $t_1$, на основании выражения (161а):

$$V=\frac{5000-(1{,}1\ \ 2200+4\ \ 300)}{\sqrt{2\ \ 4\ \ 2500}}\sinh\left(\sqrt{\frac{2\ \ 4}{2500}}\cdot 21{,}4\right)$$

$$V=15{,}05\frac{м}{сек}$$

Наименьшее значение ускорения, имеющее место в начале подъема, согласно выражению (165):

$$a_{1(\min)}=a_1'=\frac{5000-(1{,}1\ \ 2200+4\ \ 300)}{2500}$$

$$a_{1(\min)}=a_1'=0{,}55\frac{м}{сек^2}.$$

---

* Или выражениями (192а) и (187а).

** Те же результаты для $t_1$ и $F_1$ получим, производя вычисления по форм.(192а) и (187а).

Ускорение $a_1''$ в конце периода пуска получается из выражения (164а) при $t = t_1$:

$$a_1'' = 0{,}55 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 4}{2500}} \quad 21{,}4 \quad\right)$$

$$a_1'' = 1 \frac{м}{сек^2}$$

Наименьшее значение замедления, имеющее место в конце подъема, по абсолютной величине согласно выражению (177) при $F_3 = 0$ составляет:

$$a_{3(\min)} = a_3'' = \frac{1{,}1 \quad 2200 - 4 \quad 300}{2500}$$

$$a_{3(\min)} = a_3'' \quad 0{,}5 \frac{м}{сек^2}$$

Замедление $a_3'$ в начале периода $t_3$ получается из выражения (176а) при $t = t_3 = T - t_1 = 45 - 21{,}4 = 23{,}6$ *сек*:

$$a_3' = 0{,}5 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 4}{2500}} \quad 23{,}6 \quad\right)$$

$$a_3' = 1{,}015 \frac{м}{сек^2}$$

### 3. Пятипериодная тахограмма

При установках с опрокидными сосудами может иметь место случай постоянного движущего усилия $F_1$ в течение всего пускового периода $(t_0 + t_1)$, в результате чего скорость в продолжение переода $t_0$ схода ролика с разгрузочной кривой будет изменяться ориентировочно по параболе $O\omega$ (тахограмма на фиг. 31), в течение же периода $t_1$—по гиперболической синусоиде $\omega b$; в связи с этим пусковое ускорение в период $t_0$ будет возрастать от начального значения $a_0$ до величины $a_1'$, изменяясь по прямой $mn$, в период же $t_1$ будет иметь место возрастание ускорения от значения $a_1'$ до $a_1''$ с изменением по гиперболической косинусоиде $nr$.

Уравнение параболы $O\omega$ имеет вид:

$$v = a_0 t + \frac{a_1' - a_0}{2t_0} t^2. \qquad (66а)$$

Изменение статической нагрузки в период $t_0$ происходит по прямой $AB$, а в период $t_1$ по гиперболической косинусоиде $BC$.

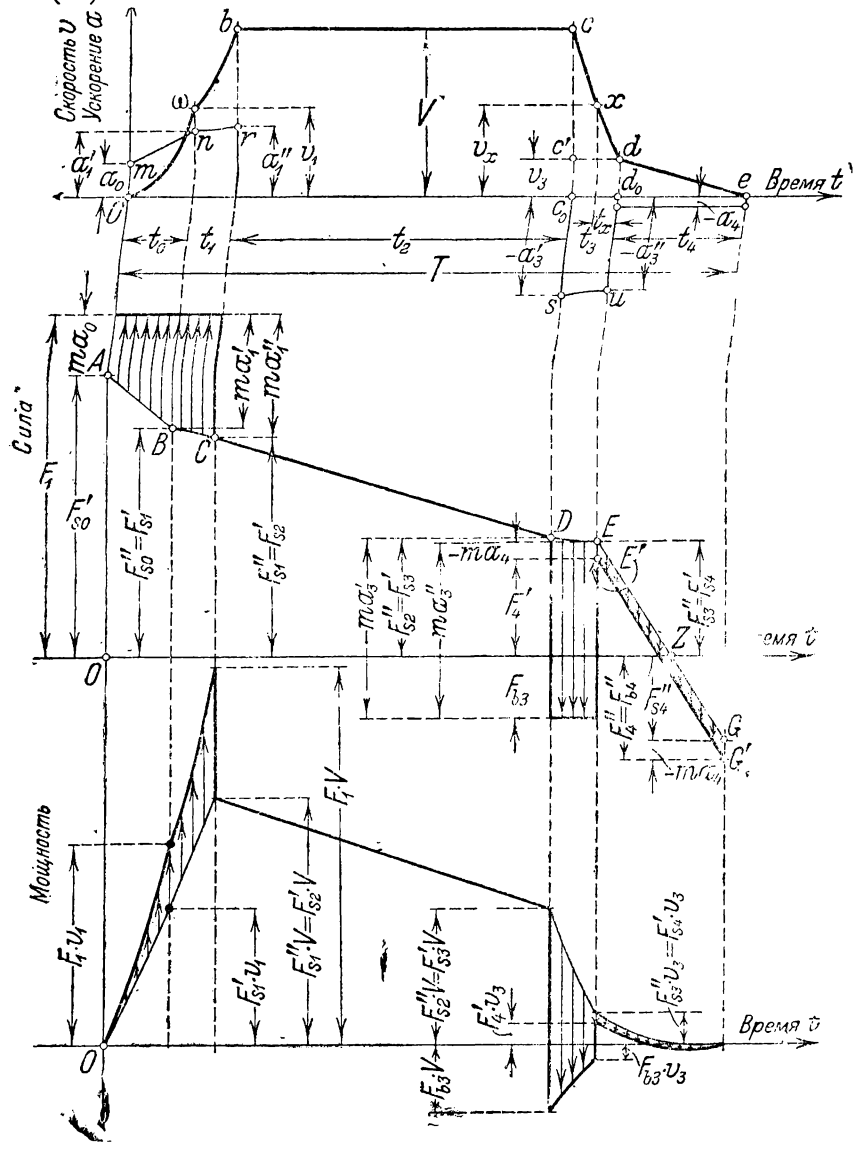
В период замедления $t_3$ при постоянном тормозном усилии $F_{b3}$ скорость изменяется по гиперболической синусоиде $cxd$, замедление по гипероболической косинусоиде $su$, а статическое усилие по гиперболической косинусоиде $DE$.

В период $t_4$ разгрузки скипа изменение скорости принято происходящим по прямой $de$ при постоянном ускорении $a_4$. Изменение статической нагрузки в последний период предположено происходящим ориентировочно по линии $EG$, а движущего усилия по параллельной линии $E'G'$.

При заданном начальном ускорении $a_0$ величина постоянного движущего усилия $F_1$ может быть определена из выражения:

$$F_1 = kQ + pH + (1 - \alpha)Q' + ma_0, \qquad (193)$$

где $p$—вес погонного метра каната, $H$—высота подъема; остальные входящие в последнее выражение величины имеют значения, принятые в выражении (67).




Фиг. 31. Пятипериодная тахограмма с параболической частью в период $t_0$ и с вогнутыми боками в периоды $t_1$ и $t_3$; соответственные диаграммы ускорений, усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для опрокидных сосудов при тормозном режиме с постоянным усилием $F_{b3}$ в период $t_3$.

Зная величину $F_1$, значение начального ускорения $a_1'$ в период $t_1$ можем определить из выражения:

$$a_1' = \frac{F_1 - [kQ + p(H - 2h_0)]}{m}, \qquad (194)$$

где $h_0 = h_4$—разгрузочный участок пути.

Можно также итти и иным путем, а именно, задавшись величиной ускорения $a_1'$, определить постоянное движущее усилие $F_1$ из выражения:

$$F_1 = kQ + p(H - 2h_0) + ma_1'. \tag{195}$$

Зная $F_1$, величину начального ускорения $a_0$ можно получить из выражения:

$$a_0 = \frac{F_1 - [kQ + pH + (1-\alpha)Q']}{m} \tag{196}$$

При известной величине разгрузочного пути $h_0$ период $t_0$ может быть определен из выражения :*

$$t_0 = \sqrt{\frac{6h_0}{2a_0 + a_1'}}. \tag{197}$$

Скорость $v_1$ в конце периода $t_0$ определяется из выражения:

$$v_1 = \frac{a_0 + a_1'}{2} t_0. \tag{198}$$

Ускорение $a_1''$ в конце периода $t_1$ получается из выражения:

$$a_1'' = a_1' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right). \tag{199}$$

Выражение максимальной скорости $V$ в зависимости от величины периода $t_1$ при подъеме обыкновенными клетями, то есть при отсутствии периода $t_0$, имеет вид:

$$V = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right). \tag{161a}$$

В случае подъемных установок с опрокидными сосудами при наличии периода $t_0$ с конечной скоростью $v_1$ в этот период, выражение (161a), как нетрудно видеть, представится следующим образом:

$$V - v_1 = \frac{F_1 - [kQ + p(H - 2h_0)]}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right). \tag{200}$$

Отсюда получаем период $t_1$:

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\, \mathrm{Arsinh}\, \frac{(V - v_1)\sqrt{2pm}}{F_1 - [kQ + p(H - 2h_0]}. \tag{201}$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$ при подъеме обыкновенными клетями, определяется из выражения:

$$h_1 = \frac{F_1 - (kQ + pH)}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) - 1\right] \tag{159a}$$

Для установок с опрокидными сосудами последнее выражение принимает вид:

$$h_1 = \frac{F_1 - [kQ + p(H - 2h_0)]}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) - 1\right] + v_1 t_1. \tag{202}$$

---

* А. П. Герман и Ф. Н. Шклярский. „Рудничные подъемные установки". Часть I, стр. 135. 1940.

Для определения периода $t_2$ воспользуемся следующими соображениями.

Если бы в период $t_3$ скорость изменялась по прямой линии, согласно представленному на тахограмме фиг. 11, то величина периода $t_2$ определялась бы выражением:

$$t_2 = \frac{2(H - 2h_0 - h_1)}{V - v_3} - \frac{V + v_3}{V - v_3}(T - t_0 - t_1 - t_4). \tag{54}$$

Однако, так как в данном случае скорость в период $t_3$ изменяется не по прямой линии, а по гиперболической синусоиде $cd$, представляющей собою вогнутую кривую, то вместо равенства (54) должно существовать неравенство:

$$t_2 > \frac{2(H - 2h_0 - h_1)}{V - v_3} - \frac{V + v_3}{V - v_3}(T - t_0 - t_1 - t_4), \tag{203}$$

где $t_4$ определяется из выражения:

$$t_4 = \frac{2h_4}{v_3} \tag{36}$$

Соответственным подбором величины $t_2$, удовлетворяющей неравенству (203), можно с достаточной для практики точностью получить ее значение.

Путь $h_2$, проходимый в период $t_2$, определяется выражением:

$$h_2 = Vt_2. \tag{17}$$

Усилие $F_3 \gtrless 0$, имеющее место в период $t_3$, определяется из нижеследующего выражения, аналогичного выражению (174) для трехпериодной тахограммы:

$$F_3 = [kQ - p(H - 2h_4)] - \frac{(V - v_3)\sqrt{2pm}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right)} \tag{204}$$

Ординаты промежуточных точек кривой скорости $cxd$ на тахограмме фиг. 31 в период $t_3$ для каждого отдельного значения времени $t_x$, отсчитываемого от точки $d_0$ по направлению к точке $c_0$, могут быть определены из выражения:

$$v_x^{**} = \frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) + v_3. \tag{173b}$$

Абсолютное значение пути $h_3$, проходимого в период $t_3$, получается из выражения, аналогичного выражению (171$a$) для трехпериодной тахограммы:

$$h_3 = \frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) - 1\right] + v_3 t_3. \tag{205}$$

В последней формуле член

$$\frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) - 1\right]$$

---

* На фиг. 31 усилие $F_3 = F_b$).

Значение $v_x$ может быть получено из выраж. (204) решением его относит. $V = v$

выражает на тахограмме фиг. 31 площадь треугольника $cc'd$ с вогнутой стороной $cd$; член $v_3t_3$ выражает площадь прямоугольника $c'c_0d_0d$. Площадь $c_0cdd_0c_0$, равная сумме площадей треугольника $cc'd$ и прямоугольника $c'c_0d_0d$, определяет путь, проходимый опрокидными сосудами в течение периода $t_3$.

В применении к указанной тахограмме полная высота подъема $H$, определяемая площадью $O\omega bcdeO$, может быть выражена следующим образом:

$$H = 2h_0 + h_1 + h_2 + h_3. \tag{55}$$

Последнее выражение может служить для проверки правильности выбора величины периода $t_2$, произведенного согласно неравенству (203).

Абсолютное значение замедления $a_3''$ в конце периода $t_3$ определяется из выражения:

$$a_3'' = \frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{m} \tag{206}$$

Замедление $a'_3$ в начале периода $t_3$:

$$a_3' = a_3'' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) \tag{207}$$

Замедление $a_4$ в продолжение периода $t_4$:

$$a_4 = \frac{v_3}{t_4} \tag{40}$$

Начальное статическое усилие $F'_{s0}$ определяется выражением:

$$F'_{s0} = kQ + pH + (1 - \alpha)\,Q'. \tag{156}$$

В дальнейшем статические усилия представляются следующим образом.

В конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$:

$$F''_{s0} = F'_{s1} = kQ + p(H - 2h_0). \tag{151a}$$

В конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$:

$$F''_{s1} = F'_{s2} = F'_{s1} - 2ph_1, \tag{152}$$

или

$$F''_{s1} = F'_{s2} = kQ + p[H - 2(h_0 + h_1)]. \tag{152a}$$

В конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$:

$$F''_{s2} = F'_{s3} = F'_{s2} - 2ph_2, \tag{137a}$$

или

$$F''_{s2} = F'_{s3} = kQ + p[H - 2(h_0 + h_1 + h_2)]. \tag{137b}$$

В конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$:

$$F''_{s3} = F'_{s4} = F'_{s3} - 2ph_3, \tag{143}$$

или

$$F''_{s3} = F'_{s4} = kQ - p(H - 2h_4). \tag{143a}$$

В конце периода $t_4$:

$$F''_{s4} = kQ - pH - [(1 - \alpha)\,Q' + Q]. \tag{157}$$

Движущее усилие $F_4'$ в начале периода $t_4$:

$$F'_4 = F'_{s4} - ma_4. \tag{145}$$

Движущее усилие $F_4''$ в конце периода $t_4$:

$$F''_4 = F''_{b1} = F''_{s4} - ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответственных усилий и скоростей изображены на нижней диаграмме фиг. 31.

Пример 19.

Определить элементы подъема, оборудованного *опрокидными скипами*, применительно к диаграммам на фиг. 31, для следующих данных:

$H=365$ *м*; $T=102$ *сек*; $V=4{,}53$ $\frac{м}{сек}$ $v_3=1$ $\frac{м}{сек}$; $Q=4000$ *кг*;

$Q'=4000$ *кг*; $m=7000$ *кг. м*$^{-}$ *сек*$^2$; $p=4{,}3$ *кг/м*; $h_0=h_4=7{,}4$ *м*; $k=1{,}15$.

Задаемся начальным ускорением $a_0=0{,}25$ $\frac{м}{сек^2}$

Согласно выражению (193) пусковое усилие $F_1$ в течение периода $(t_0+t_1)$:

$$F_1 = 1{,}15 \cdot 4000 + 4{,}3 \cdot 365 + (1 - 0{,}65) \quad 4000 + 7000 \quad 0{,}25;$$

$$F_1 = 9320 \text{ кг}.$$

На основании выражения (194) ускорение $a_1$ в начале периода $t_1$:

$$a_1' = \frac{9320 - [1{,}15 \quad 4000 + 4{,}3(365 - 2 \quad 7{,}4)]}{7000};$$

$$a_1' = 0{,}46 \ \frac{м}{сек^2}$$

Согласно выражению (197) период $t_0$:

$$t_0 = \sqrt{\frac{6 \quad 7{,}4}{2 \quad 0{,}25 + 0{,}46}};$$

$$t_0 = 6{,}8 \text{ сек}.$$

На основании выражения (198) скорость $v_1$ в конце периода $t_0$:

$$v_1 = \frac{0{,}25 + 0{,}46}{2} \cdot 6{,}8;$$

$$v_1 = 2{,}4 \ \frac{м}{сек} < 2{,}5 \ \frac{м}{сек}$$

Период $t_1$ согласно выражению (201):

$$t_1 = \sqrt{\frac{7000}{2 \quad 4{,}3}} \operatorname{Arsinh} \frac{(4{,}53 - 2{,}4)\sqrt{2 \cdot 4{,}3 \cdot 7000}}{9320 - [1{,}15 \quad 4000 + 4{,}3(365 - 2 \quad 7{,}4)]};$$

$$t_1 = 4{,}56 \text{ сек}.$$

Ускорение $a_1''$ в конце периода $t_1$ согласно выражению (199):

$$a_1'' = 0{,}46 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 4{,}3}{7000}} \cdot 4{,}56\right);$$

$$a_1'' = 0{,}466 \cong 0{,}47 \ \frac{м}{сек^2}$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, согласно выражению (202);

$$h_1 = \frac{9320 - [1{,}15 \cdot 4000 + 4{,}3(365 - 2 \ \ 7{,}4)]}{2 \ \ 4{,}3} \times$$

$$\times \left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2 \ \ 4{,}3}{7000}} \cdot 4{,}56\right) - 1\right] + 2{,}4 \ \ 4{,}56;$$

$$h_1 = 15{,}73 \ м.$$

Согласно выражению (203) период $t_2$ должен удовлетворять условию:

$$t_2 > \frac{2(365 - 2 \ \ 7{,}4 - 15{,}73)}{4{,}53 - 1} - \frac{4{,}53 + 1}{4{,}53 - 1}(102 - 6{,}8 - 4{,}56 - 14{,}8);$$

$$t_2 > 70{,}66 \ сек.$$

Примем $t_2 = 70{,}72$ *сек.*
Согласно выражению (17)

$$h_2 = 4{,}53 \cdot 70{,}72 = 320{,}36 \ м.$$

Согласно выражению (53)

$$t_3 = 102 - 6{,}8 - 4{,}56 - 14{,}8 - 70{,}72;$$

$$t_3 = 5{,}13 \ сек.$$

Согласно выражению (204)

$$F_3 = [1{,}15 \cdot 4000 - 4{,}3(365 - 2.7{,}4)] - \frac{(4{,}53 - 1)\sqrt{2 \cdot 4{,}3 \ \ 7000}}{\sin h\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4{,}3}{7000}} \cdot 5{,}12\right)};$$

$$F_3 = F_{b3} = -1707 \ кг.$$

Согласно выражению (205)

$$h_3 = \frac{1{,}15 \cdot 4000 - 4{,}3 \cdot 365 + 1707}{2 \ \ 4{,}3}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2 \ \ 4{,}3}{7000}} \cdot 5{,}12\right) - 1\right] + 1 \ \ 5{,}12;$$

$$h_3 = 14{,}12 \ м.$$

Проверка:

$$H = 14{,}8 + 15{,}73 + 320{,}36 + 14{,}12 = 365{,}01 \cong 365 \ м.$$

Период $t_4$ согласно выражению (36):

$$t_4 = \frac{2 \ \ 7{,}4}{1} = 14{,}8 \ сек.$$

Замедление $a_4$ в период $t_4$ согласно выражению (40):

$$a_4 = \frac{1}{14{,}8} = 0{,}07 \ \frac{м}{сек^2}$$

Замедление $a_3''$ в конце периода $t_3$ согласно выражению (206):

$$a_3'' = \frac{1{,}15 \quad 4000 - 4{,}3(365 - 2 \quad 7{,}4) + 1707}{7000};$$

$$a_3'' = 0{,}686 \cong 0{,}69 \ \frac{м}{сек^2}$$

Замедление $a_3'$ в начале периода $t_3$ согласно выражению (207)

$$a_3' = 0{,}686 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 4{,}3}{7000}} \cdot 5{,}12\right);$$

$$a_3' = 0{,}697 \cong 0{,}7 \ \frac{м}{сек^2}$$

Начальное статическое усилие $F'_{s0}$ согласно выражению (156)

$$F_{s0}' = 1{,}15 \cdot 4000 + 4{,}3 \quad 365 + (1 - 0{,}65) \quad 4000;$$

$$F_{s0}' = 7570 \ кг.$$

Усилие $F_{s0}'' = F'_{s1}$ согласно выражению (151а):

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = 1{,}15 \quad 4000 + 4{,}3(365 - 2 \quad 7{,}4);$$

$$F_{s0}'' = F_{s1}' = 6106 \ кг.$$

Усилие $F_{s1}'' = F_{s2}' = F_2'$ согласно выражению (152):

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = 6106 - 2 \quad 4{,}3 \quad 15{,}73.$$

Или согласно выражению (152а):

$$F_{s1}'' = F_{s2}'' = 1{,}5 \quad 4000 + 4{,}3[365 - 2(7{,}4 + 15{,}73)];$$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = F'_2 = 5970 \ кг.$$

Усилие $F_{s2}'' = F_{s3}' = F_2''$ согласно выражению (137а):

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 5970 - 2 \quad 4{,}3 \quad 320{,}36.$$

Или согласно выражению (137b):

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = 1{,}15 \cdot 4000 + 4{,}3[365 - 2(7{,}4 + 15{,}73 + 320{,}36)];$$

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = F_2'' = 3216 \ кг.$$

Усилие $F_{s3}'' = F_{s4}'$ согласно выражению (143):

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = 3216 - 2 \quad 4{,}3 \quad 14{,}12.$$

Или согласно выражению (143а):

$$F_{s3}'' = F_{s4} = 1{,}15 \cdot 4000 - 4{,}3(365 - 2 \cdot 7{,}4);$$

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = 3095 \ кг.$$

Усилие $F_{s4}''$ согласно выражению (157):

$$F_{s4}'' = 1{,}15 \quad 4000 - 4{,}3 \quad 365 - [(1 - 0{,}65) \quad 4000 + 4000];$$

$$F_{s4}'' = -2370 \ кг$$

Движущее усилие $F_4'$ в начале периода $t_4$ согласно выражению (145):

$$F_4' = 3095 - 7000 \quad 0{,}07;$$

$$F_4' = 2065 \text{ кг.}$$

Усилие $F_4''$ в конце периода $t_4$ согласно выражению (42):

$$F_4'' = F_{b4}'' = -2370 - 7000 \cdot 0{,}07;$$

$$F_4'' = F_{b4}'' = -2860 \text{ кг.}$$

Мощности, обусловленные статической нагрузкой, имеют нижеследующие значения:

$$P_{s0} = 0$$

$$P_{s1}' = F_{s1}' \quad v_1 = 6106 \quad 2{,}4 = 14654 \ \frac{\text{кг.м}}{\text{сек}} = 144 \ kW$$

$$P_{s1}'' = P_{s2}' = F_{s1}'' \quad V = F_{s2}' \quad V = 5970 \quad 4{,}53 = 27044 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 265 \ kW$$

$$P_{s2}'' = P_{s3}' = F_{s2}'' \quad V = F_{s3}' \quad V = 3216 \quad 4{,}53 = 14568 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 143 \ kW$$

$$P_{s3}'' = P_{s4} = F_{s3} \quad v_3 = F_{s4}' \quad v_3 = 3095 \quad 1 = 3095 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 30 \ kW$$

$$P_{s4}'' = 0.$$

Мощности на валу барабана, обусловленные движущими усилиями, имеют следующие значения.

$$P_0 = 0$$

$$P_1' = F_1 \quad v_1 = 9320 \quad 2{,}4 = 22368 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 220 \ kW$$

$$P_1'' = F_1 \quad V = 9320 \quad 4{,}53 = 42220 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 414 \ kW$$

$$P_2' = P_{s2}' = 27044 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 265 \ kW$$

$$P_2'' = P_{s2}'' = 14568 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 143 \ kW$$

$$P_b' = F_{b3} V = -1707 \quad 4{,}53 = -7733 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = -76 \ kW$$

$$P_b'' = F_{b3} \quad v_3 = -1707 \quad 1 = -1707 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = -17 \ kW$$

$$P_4' = F_4' \quad v_3 = 2605 \cdot 1 = 2605 \ \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 26 \ kW$$

## С. ТАХОГРАММЫ С ОДНИМ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ И ДРУГИМ ВОГНУТЫМ БОКОМ

### 1. Трехпериодная тахограмма

На практике может иметь место трехпериодная тахограмма (фиг. 32.), при которой скорость в период пуска изменяется по закону прямой линии $O\alpha$, в период же замедления по закону гиперболического синуса (линия $\beta\gamma$).

В связи с этим изменение статической нагрузки в период $t_1$ происходит по закону параболы $AB$, в период же $t_3$ — по гиперболической косинусоиде $CD$.

В рассматриваемом случае определение параметров тахограммы может быть произведено двумя методами.

1) При точном определении указанных параметров необходимо задаться одним из элементов периода замедления, как-то: периодом $t_3$ или движущим усилием $F_3 \gtrless 0$.

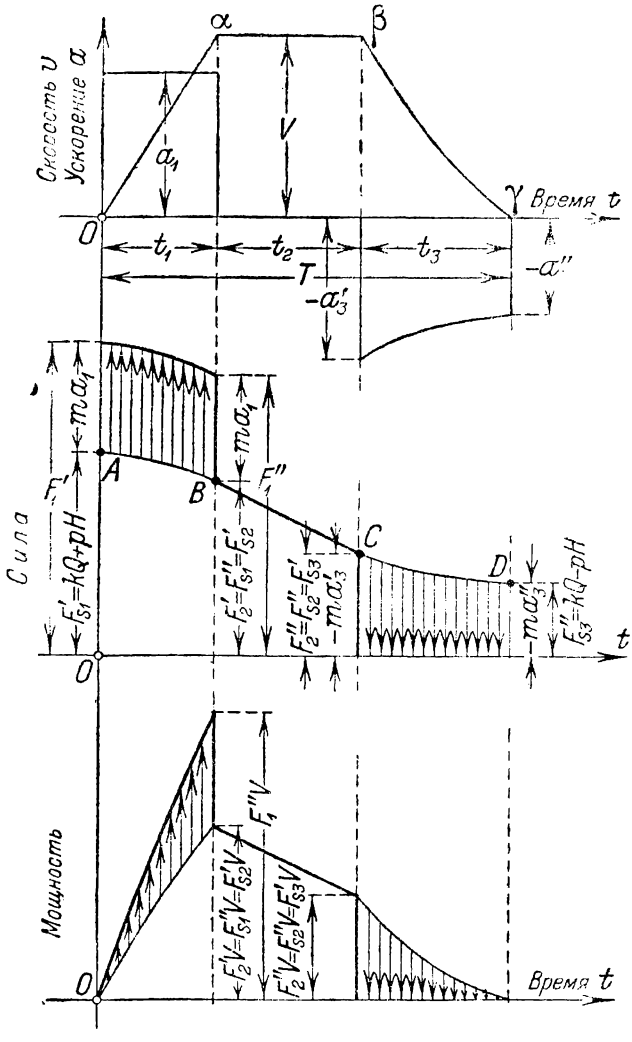
2) При определении параметров тахограммы путем подбора периода $t_2$ согласно неравенству (183), можно пользоваться методом, примененным при решении примера 17

В обоих случаях соотношения между элементами периода пуска аналогичны таковым для тахограммы с прямолинейными боками, соотношения же между элементами периода замедления аналогичны соотношениям, имеющим место в указанный период для тахограммы с вогнутыми боками.

Ниже приводится способ точного определения параметров рассматриваемой тахограммы.

При заданном периоде $t_3$ усилие $F_3$ определяется из выражения (174). Равным образом, на основании выражений (171) и (171а) может быть определен путь $h_3$. Далее, пользуясь равенством

$$H = h_1 + h_2 + h_3, \quad (21)$$




Фиг. 32. Трехпериодная тахограмма с одним прямолинейным и другим вогнутым боком, при постоянном ускорении в период $t_1$ и переменном замедлении, изменяемом по закону гиперболического косинуса, в период $t_3$; соответственные диаграммы усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для обыкновенных клетей при режиме свободного выбега в период $t_3$.

представляется возможным определить период $t_1$ на основании нижеследующих соображений.

В последнем выражении

$$h_1 = \frac{1}{2} V t_1, \quad (15)$$

$$h_2 = Vt_2, \tag{17}$$

где период $t_2$ определяется из выражения:

$$t_2 = T - t_1 - t_3. \tag{125}$$

$$h_3^* = \frac{kQ - pH - F_3}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3\right) - 1\right] \tag{171a}$$

Выражение для пути $h_3$ может быть представлено также и иначе. В самом деле, принимая во внимание выражение (175) для периода $t_3$ и подставляя его в последнее выражение для $h_3$, получаем:

$$h_3 = \frac{kQ - pH - F_3}{2p}\left(\text{coshArsinh}\ \frac{V\sqrt{2pm}}{kQ - pH - F_3} - 1\right).$$

Или, принимая во внимание, что

$$\text{coshArsinh}\ \frac{V\sqrt{2pm}}{kQ - pH - F_3} = \sqrt{1 + \left(\frac{V\sqrt{2pm}}{kQ - pH - F_3}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{1 + \frac{V^2 \cdot 2pm}{(kQ - pH - F_3)^2}}$$

окончательно имеем:

$$h_3 = \frac{kQ - pH - F_3}{2p}\left[\sqrt{1 + \frac{V^2 \cdot 2pm}{(kQ - pH - F_3)^2}} - 1\right]. \tag{171b}$$

Последнее выражение дает возможность при заданном усилии $F_3$ определять величину пути $h_3$ без предварительного определения периода замедления $t_3$ и без применения гиперболических функций.

Подставляя в выражение (21) приведенные выше значения $h_1$, $h_2$ и $t_2$, получаем:

$$H = \frac{1}{2}Vt_1 + V(T - t_1 - t_3) + h_3. \tag{126a}$$

Решая последнее уравнение относительно $t_1$, имеем:

$$t_1 = 2\left(T - t_3 - \frac{H - h_3}{V}\right). \tag{127a}$$

Пример 20.

Определить элементы трехпериодной тахограммы с прямолинейным боком в период $t_1$ и с вогнутым боком в период $t_3$ для следующих данных:

$Q = 2200$ *кг*; $H = 300$ *м*; $m = 2500$ *кг. м.*$^{-1}$ *сек*$^2$; $V = 10\ \frac{м}{сек}$; $T = 45$ *сек*;

$$p = 4\ кг/м;\quad k = 1{,}15.$$

а. Задаемся периодом $t_3 = 12$ *сек*.

---

* Или

$$h_3 = \frac{kQ - pH - F_3}{2p}\left(\frac{e^{\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3} + e^{-\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3}}{2} - 1\right) \tag{171}$$

Согласно выражению (174) получаем:

$$F_3 = (1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300) - \frac{10\sqrt{2 \cdot 4 \quad 2500}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \quad 12\right)}$$

$$F_3 = F_{b3} = -607 \text{ кг}.$$

Путь $h_3$ согласно выражению (171а):

$$h_3 = \frac{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300 + 607}{2 \cdot 4}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \cdot 12\right) - 1\right]$$

$$h_3 = 58 \text{ м}.$$

Период $t_1$ согласно выражению (127а):

$$t_1 = 2\left(45 - 12 - \frac{300 - 58}{10}\right);$$

$$t_1 = 17{,}6 \text{ сек}.$$

Период $t_2$ согласно выражению (125):

$$t_2 = 45 - 17{,}6 - 12 = 15{,}4 \text{ сек}.$$

Проходимый в период $t_1$ путь согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{10 \cdot 17{,}6}{2} = 88 \text{ м}.$$

Проходимый в период $t_2$ путь согласно выражению (17):

$$h_2 = 10 \cdot 15{,}4 = 154 \text{ м}.$$

Проверка согласно выражению (21):

$$H = 88 + 154 + 58 = 300 \text{ м}.$$

Постоянное ускорение $a_1$ в период $t_1$ согласно выражению (14):

$$a_1 = \frac{V}{t_1} = \frac{10}{17{,}6} = 0{,}57 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$$

Конечное значение замедления $a_3''$ согласно выражению (177):

$$a''_3 = \frac{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300 + 607}{2500};$$

$$a''_3 = 0{,}77 \text{ м/сек}^2.$$

Начальное значение замедления $a'_3$ согласно выражению (176а):

$$a'_3 = 0{,}77 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \quad 12\right);$$

$$a'_3 = 0{,}95 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}.$$

b. Задаемся движущим усилием в период замедления $F_3 = 0$, то принимаем режим свободного выбега (см. фиг. 32).

Тогда период $t_3$ согласно выражению (175):

$$t_3 = \sqrt{\frac{2500}{2 \cdot 4}} \operatorname{Ar\,sinh} \frac{10\sqrt{2 \cdot 4 \cdot 2500}}{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300};$$

$$t_3 = 16{,}35 \text{ сек.}$$

Путь $h_3$ согласно выражению (171а):

$$h_3 = \frac{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300}{2 \cdot 4} \left[ \cosh\left( \sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \; 16{,}35 \right) - 1 \right]$$

$$h_3 = 76{,}21 \text{ м.}$$

Период $t_1$ согласно выражению (127а):

$$t_1 = 2\left(45 - 16{,}35 - \frac{300 - 76{,}21}{10}\right);$$

$$t_1 = 12{,}54 \text{ сек.}$$

Период $t_2$ согласно выражению (125):

$$t_2 = 45 - 12{,}54 - 16{,}35 = 16{,}11 \text{ сек.}$$

Путь согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{10 \cdot 12{,}54}{2} = 62{,}7 \text{ м.}$$

Путь $h_2 = Vt_2 = 10 \cdot 16{,}11 = 161{,}1$ м.
Проверка:

$$H = 62{,}7 + 161{,}1 + 76{,}21 = 300{,}01 \cong 300 \text{ м.}$$

Постоянное ускорение $a_1$ в период $t_1$ согласно выражению (14):

$$a_1 = \frac{V}{t_1} = \frac{10}{12{,}54} = 0{,}8 \frac{м}{сек^2}$$

Конечное значение замедления $a_3''$ согласно выражению (177):

$$a_3'' = \frac{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300}{2500};$$

$$a''_3 = 0{,}53 \frac{м}{сек^2}.$$

Начальное значение замедления $a'_3$ согласно выражению (176а):

$$a'_3 = 0{,}53 \cosh\left( \sqrt{\frac{2 \cdot 4}{2500}} \; 16{,}35 \right);$$

$$a''_3 = 0{,}776 \frac{м}{сек^2}.$$

---

При расчете по формуле (171b) получаем:

$$h_3 = \frac{1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300}{2 \cdot 8} \left[ \sqrt{1 + \frac{10^2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 2500}{(1{,}15 \cdot 2200 - 4 \cdot 300)^2}} - 1 \right] = 76{,}47 \text{ м.}$$

Последний результат отличается от полученного по формуле (171а) на $\sim 0{,}3\%$, что практического значения не имеет.

Здесь следует отметить, что если бы задаться величиной периода $t_1$ или же значением пускового ускорения $a_1$, то точное определение параметров трехпериодной тахограммы с прямолинейным боком в период $t_1$ и с вогнутым боком в период $t_3$ оказалось бы невозможным, так как при этом получилось бы неразрешимое трансцендентное уравнение, которое не могло бы быть приведено к алгебраическому виду. В самом деле, при заданном периоде $t_1$ определение периода $t_3$ из выражения (126а) приводит к уравнению вида:*

$$t_3 - A\cosh(bt_3) + C = 0,$$

где:

$$A = \frac{kQ - pH - F_3}{2pV}, \qquad b = \sqrt{\frac{2p}{m}},$$

$$C = \frac{kQ + pH - F_3}{2pV} - T + \frac{1}{2}t_1.$$

В последнем случае задача могла бы быть решена лишь путем подбора величины периода полного хода $t_2$, согласно методу, примененному выше при решении примера 17.

## 2. Четырехпериодная тахограмма

На тахограмме фиг. 33, характеризующей подъем с *опрокидными сосудами*, изменение скорости в течение всего периода $t_1$ предположено происходящим по закону прямой линии $O\omega b$ при постоянном пусковом ускорении $a_0 = a_1$.

При этом необходимо иметь в виду, что в конце периода $t_0$ схода ролика опускающегося опрокидного сосуда с разгрузочной кривой скорость $v_1$ не должна превышать определенного значения ($v_1 \leqslant 2{,}5$ *м/сек*), каковое обстоятельство, в свою очередь, ограничивает пусковое ускорение $a_1$.

Изменение статической нагрузки в период $t_0$, который является частью пускового периода $t_1$, предположено происходящим ориентировочно по прямой линии $AB$. Изменение скорости в период $(t_1 - t_0)$ по закону прямой линии обусловливает изменение статической нагрузки в функции времени по закону параболы $BC$ (фиг. 33).

В период $t_3$ имеет место постоянное тормозное усиление $F_{b3}$, обусловливающее изменение скорости по закону гиперболического синуса (линия *cmd* на тахограмме фиг. 33), а замедление по закону гиперболического косинуса (линия *fg*).

Следует отметить, что при определении параметров тахограммы по приводимому ниже точному методу основным исходным параметром является *период замедления* $t_3$, которым необходимо предварительно задаться.

Тогда усилие $F_3 \gtrless 0$, имеющее место в период $t_3$, определяется из выражения: **

$$F_3{}^{***} = [kQ - p(H - 2h_4)] - \frac{(V - v_3)\sqrt{2pm}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t_3\right)}. \qquad (204)$$

---

* См. Ф. Н. Шклярский. „Случаи точного определения основных параметров трехпериодной тахограммы рудничного подъема". Записки Ленинградского Горного Института. Том XI, вып. 3. 1938.

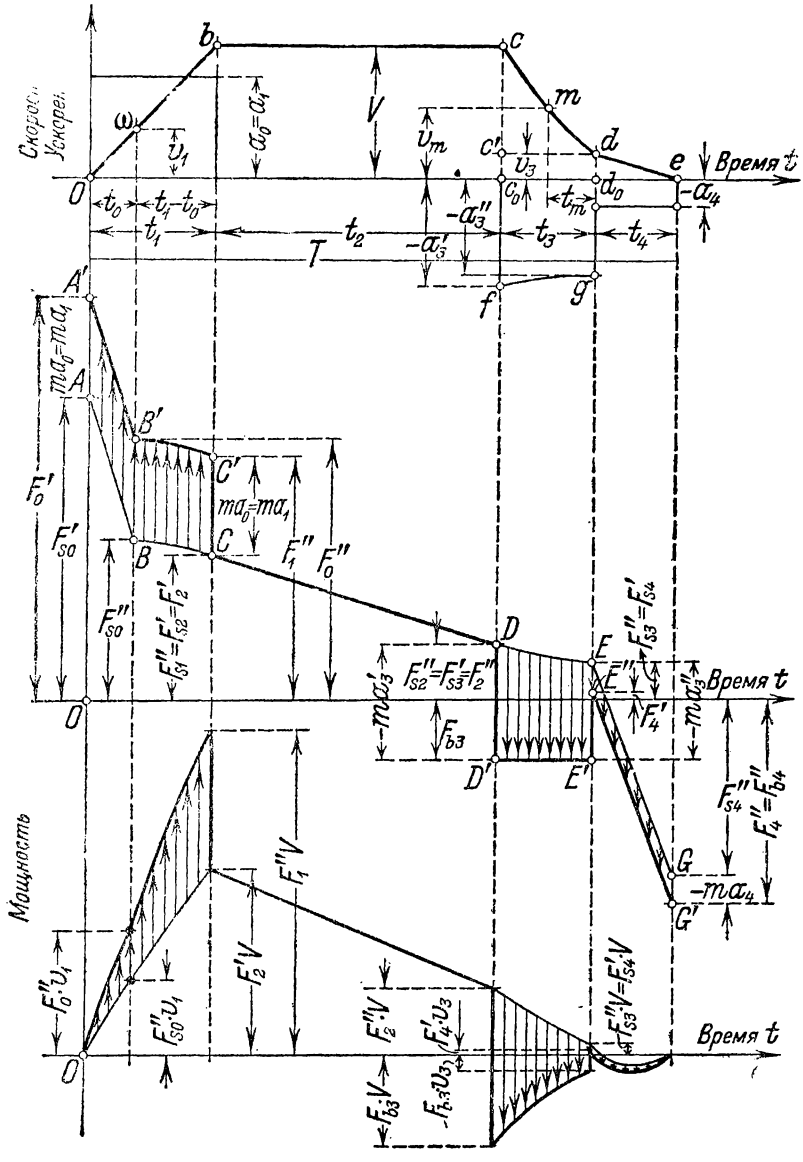
** Можно также задаться величиной усилия $F_3$; тогда искомым окажется период $t_3$, определяемый из выражения:

$$t_3 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\,\mathrm{Arsinh}\,\frac{(V - v_3)\sqrt{2pm}}{kQ - p(H - 2h_4) - F_3} \qquad (175а)$$

*** На фиг. 33 усилие $F_3 = F_{b3}$

Абсолютное значение пути $h_3$, проходимого в период $t_3$, определяется из выражения;

$$h_3 = \frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{2p}\left[\operatorname{cosh}\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3\right) - 1\right] + v_3 t_3. \qquad (171b)$$




Фиг. 33. Четырехпериодная тахограмма с прямолинейным боком в период $t_1$ и вогнутым боком в период $t_3$; соответственные диаграммы ускорений, усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для опрокидных сосудов при тормозном режиме с постоянным усилием $F_b$ в период $t_3$.

В последней формуле член

$$\frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{2p}\left[\operatorname{cosh}\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3\right) - 1\right]$$

выражает на тахограмме фиг. 33 площадь треугольника $cc'd$ с вогнутой стороной $cd$; член $v_3t_3$ выражает площадь прямоугольника $c'c_0d_0d$. Площадь $c_0cdd_0c_0$, равная сумме площадей треугольника $cc'd$ и прямоугольника $c'c_0d_0d$, определяет путь, проходимый опрокидными сосудами в течение периода $t_3$.

В применении к тахограмме на фиг. 33 полная высота подъема $H$, определяемая площадью $O\omega bcdeO$, может быть выражена следующим образом:

$$H=h_1+h_2+h_3+h_4, \tag{38}$$

где:
путь $h_1$, проходимый в период $t_1$,

$$h_1=\frac{1}{2}Vt_1; \tag{15}$$

путь $h_2$, прохдимый в период $t_2$,

$$h_2=Vt_2; \tag{17}$$

путь $h_3$, проходимый в период $t_3$, определяется выражением (171b);
путь $h_4=\frac{1}{2}v_3t_4$ является известным.

Период $t_4$ определяется из выражения:

$$t_4=\frac{2h_4}{v_3}. \tag{36}$$

Принимая во внимание выражение для периода $t_2$:

$$t_2=T-t_1-t_3-t_4, \tag{207}$$

где $T$ — полный период подъема, выражение (38) для плоной высоты подъема $H$ можем представить в следующем виде:

$$H=\frac{1}{2}Vt_1+V(T-t_1-t_3-t_4)+h_3+\frac{1}{2}v_3t_4.$$

Решая последнее выражение относительно $t_1$, получаем:

$$t_1=2\left(T-t_3-t_4-\frac{H-h_3}{V}\right)+\frac{v_3}{V}t_4. \tag{208}$$

Ускорение пуска

$$a_0=a_1=\frac{V}{t_1} \tag{209}$$

Скорость $v_1$ в конце периода $t_0$ может быть определена на основании нижеследующих соображений.

Пусть $h_0$, проходимый рамой опрокидного сосуда в период $t_0$, равен:

$$h_0=\frac{1}{2}v_1t_0.$$

В свою очередь

$$t_0=\frac{v_1}{a_1}. \tag{210}$$

Следовательно,

$$h_0 = \frac{1}{2} v_1 \cdot \frac{v_1}{a_1} = \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{a_1}$$

Отсюда получаем:

$$v_1 = \sqrt{2 a_1 h_0}, \tag{211}$$

где $h_0 = h_4$ является известным.

Скорость $v_1$, определяемая последним выражением, не должна, как указывалось выше, превышать определенного значения. В случае, если бы при расчете получилось значение $v_1$ превосходящим допустимую величину, то с целью ее уменьшения необходимо было бы соответственным образом уменьшить период $t_3$, что при определенных значениях полного периода $T$ подъема и полной скорости $V$ послужило бы к увеличению пускового периода $t_1$, а следовательно, к соответственному уменьшению ускорения $a_1$.

Абсолютное значение замедления $a''$ в конце периода $t_3$ определяется из выражения:

$$a''_3 = \frac{kQ - p(H - 2h_4) - F_3}{m} \tag{212}$$

Замедление $a'_3$ в начале периода $t_3$:

$$a'_3 = a''_3 \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right). \tag{176 а}$$

Замедление в продолжение разгрузочного периода $t_4$:

$$a_4 = \frac{v_3}{t_4} \tag{40}$$

Здесь следует отметить, что если бы представилось желательным задаться величиной периода пуска $t_1$, или же значением пускового ускорения $a_1$, то точное определение параметров тахограммы на фиг. 33 оказалось бы невозможным, так как при этом получилось бы неразрешимое трансцендентное уравнение, которое не могло бы быть приведено к алгебраическому виду *. В последнем случае задача могла бы быть решена лишь путем подбора величины периода полного хода $t_2$ согласно выражению (203) **.

Вышеприведенный метод определения параметров тахограммы, представленной на фиг. 33, может быть применен в случае оборудования подъема как опрокидными сосудами, так и скипами с донной разгрузкой.

Статические усилия представляются следующим образом.

В начале подъема

$$F_{s0}' = kQ + pH + (1 - \alpha) Q'. \tag{156}$$

В конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 - t_0)$

$$F_{s0}'' = kQ + p(H - 2h_0). \tag{151а}$$

В конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = F_{s0}'' - 2p(h_1 - h_0). \tag{213}$$

---

При заданном периоде $t_1$ для определения периода $t_3$ получается уравнение вида:

$$t_3 - A \cosh(b t_3) + C = 0$$

См. выше стр. 115.

Или

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ + p(H - 2h_1). \tag{152b}$$

В конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = F_{s2}' - 2ph_2. \tag{137a}$$

Или

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = kQ + p[H - 2(h_1 + h_2)]. \tag{137c}$$

В конце периода $t_3$ и в начале периода $t_4$

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = F_{s3}' - 2ph_3. \tag{143}$$

Или

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = kQ - p(H - 2h_4). \tag{143a}$$

В конце периода $t_4$

$$F_{s4}'' = kQ - pH - [(1 - \alpha)Q' + Q]. \tag{157}$$

Движущие усилия на окружности барабана по отдельным периодам представляются в следующем виде.

В начале подъема

$$F_0' = F_{s0}' + ma_0 \tag{214}$$

В конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 - t_0)$

$$F_0'' = F_{s0}'' + ma_0 = F_{s0}'' + ma_1. \tag{215}$$

В конце периода $t_1$

$$F_1'' = F_{s1}'' + ma_1. \tag{131b}$$

В течение всего периода $t_2$ движущие усилия равны статическим усилиям; следовательно,

$$F_2' = F_{s2}'; \quad F_2'' = F_{s2}''.$$

Следует отметить, что в период $t_3$ имеет место постоянное отрицательное усилие $F_{b3}$, которое в данном случае является тормозным.

В начале периода $t_4$

$$F_4' = F_{s4}' - ma_4. \tag{145}$$

В конце периода $t_4$

$$F_4'' = F_{b4}'' = F_{s4}'' - ma_4. \tag{42}$$

Значения отдельных мощностей в виде произведения из соответственных усилий и скоростей представлены на нижней диаграмме фиг. 33.

Пример 21.

Рассчитать элементы подъема, оборудованного *опрокидными клетями* для следующих данных:

$H = 300$ *м*; $Q = 2000$ *кг*; $Q' = 7000$ *кг*; $m = 5000$ *кг. м*$^{-1}$*. сек*$^2$; $T = 62$ *сек*;

$V = 7 \frac{м}{сек}$ $\quad p = 5{,}5 \frac{кг}{м}$; $\quad h_0 = h_4 = 5{,}5$ *м*.

Кроме того принимаем; $k = 1{,}2$; $\alpha = 0{,}48$; $v_3 = 1{,}25 \frac{м}{сек}$

Задаемся периодом замедления $t_3 = 10$ *сек*.

Постоянное движущее усилие в период $t_3$ согласно выражению (204):

$$F_3 = \left[1{,}2 \cdot 2000 - 5{,}5\left(300 - 2 \cdot 5{,}5\right)\right] - \frac{(7-1{,}25)\sqrt{2 \cdot 5{,}5 \cdot 5000}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5{,}5}{5000}}\,10\right)};$$

$$F_3 = F_{b3} = -1750 \text{ кг}.^*$$

Проходимый в период $t_3$ путь $h_3$ согласно выражению (171b):

$$h_3 = \frac{1{,}2 \cdot 2000 - 5{,}5\,(300 - 2 \cdot 5{,}5) + 1750}{2 \cdot 5{,}5}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5{,}5}{5000}} \cdot 10\right) - 1\right] + 1{,}25 \cdot 10;$$

$$h_3 = 38{,}68 \text{ м}.$$

Период $t_4$ согласно выражению (36):

$$t_4 = \frac{2 \quad 5{,}5}{1{,}25} = 8{,}8 \text{ сек}.$$

Период $t_1$ согласно выражению (208):

$$t_1 = 2\left(62 - 10 - 8{,}8 - \frac{300 - 36{,}68}{7}\right) + \frac{1{,}25}{7} \quad 8{,}8;$$

$$t_1 = 13{,}3 \text{ сек}.$$

Ускорение пуска согласно выражению (209):

$$a_0 = a_1 = \frac{7}{13{,}3} = 0{,}526 \cong 0{,}53 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$$

Скорость $v_1$ в конце периода $t_0$ согласно выражению (211):

$$v_1 = \sqrt{2 \quad 0{,}526 \quad 5{,}5} = 2{,}4 \frac{\text{м}}{\text{сек}} < 2{,}5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

Период $t_0$ согласно выражению (210):

$$t_0 = \frac{2{,}4}{0{,}526} = 4{,}56 \text{ сек}.$$

Проходимый в течение периода $t_1$ путь $h_1$ согласно выражению (15):

$$h_1 = \frac{7 \quad 13{,}3}{2} = 46{,}55 \text{ м}.$$

Период $t_2$ согласно выражению (207):

$$t_2 = 62 - 13{,}3 - 10 - 8{,}8 = 29{,}9 \text{ сек}.$$

---

Для точки $m$, соответствующей времени $t_m = 5$ *сек* в период $t_3$ на тахограмме фиг.33, скорость $v_m$ согласно выражению (173b) на стр. 115, при $v_m = v_x$, составляет:

$$v_m = \frac{1{,}2 \cdot 2000 - 5{,}5\,(300 - 2 \cdot 5{,}5) + 1750}{\sqrt{2 \cdot 5{,}5 \cdot 5000}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5{,}5}{5000}} \quad 5\right) + 1{,}25;$$

$$v_m = 3{,}83 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

Путь $h_2$ согласно выражению (17):

$$h_2 = 7 \quad 29{,}9 = 209{,}3 \ м.$$

Замедление $a''_3$ согласно выражению (212):

$$a''_3 = \frac{1{,}2 \quad 2000 - 5{,}5(300 - 2 \quad 5{,}5) + 1750}{5000}$$

$$a''_3 = 0{,}512 \ \frac{м}{сек^2}.$$

Замедление $a'_3$ согласно выражению (176а):

$$a'_3 = 0{,}512 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 5{,}5}{5000}} \cdot 10\right);$$

$$a'_3 = 0{,}57 \ \frac{м}{сек^2}$$

Замедление $a_4$ согласно выражению (40):

$$a_4 = \frac{1{,}25}{8{,}8} = 0{,}142 \ \frac{м}{сек^2} < 0{,}3 \ \frac{м}{сек^2}$$

Проверка согласно выражению (38):

$$H = 46{,}55 + 209{,}3 + 38{,}68 + 5{,}5 = 300 \ м.$$

Статические усилия представляются следующим образом. Согласно выражению (156):

$$F'_{s0} = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5 \quad 300 + (1 - 0{,}48) \cdot 7000;$$

$$F_{s0}' = 7690 \ кг.$$

Согласно выражению (151а):

$$F_{s0}'' = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5(300 - 2 \cdot 5{,}5);$$

$$F_{s0}'' = 3990 \ кг.$$

Согласно выражению (213):

$$F''_{s1} = F'_{s2} = 3990 - 2 \quad 5{,}5 \cdot (46{,}55 - 5{,}5);$$

Или согласно выражению (152b):

$$F''_{s1} = F'_{s2} = 1{,}2 \cdot 2000 + 5.5(300 - 2 \quad 46{,}55);$$

$$F''_{s1} = F'_{s2} = 3538 \ кг.$$

Согласно выражению (137а):

$$F''_{s2} = F'_{s3} = 3538 - 2 \quad 5{,}5 \quad 209{,}3;$$

Или согласно выражению (137с):

$$F''_{s2} = F'_{s3} = 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5\,[300 - 2\,(46{,}55 + 209{,}3)];$$

$$F''_{s2} = F'_{s3} = 1236 \ кг.$$

---

* $a_4 = 0{,}3 \ \frac{м}{сек^2}$ —максимальное допустимое значение.

Согласно выражению (143);

$$F_{s3}'' = F_{s4}' = 1236 - 2 \cdot 5{,}5 \quad 38{,}68;$$

Или согласно выражению (143а)

$$F''_{s3} = F'_{s4} = 1{,}2 \quad 2000 - 5{,}5\ (300 - 2 \quad 5{,}5)$$

$$F''_{s} = F'_{s4} = 810 \ кг.$$

Согласно выражению (157):

$$F''_{s4} = 1{,}2 \quad 2000 - 5{,}5 \quad 300 - [(1 - 0{,}48) \quad 7000 + 2000];$$

$$F''_{s4} = -4890 \ кг.$$

Движущие усилия на окружности барабана представляются следующим образом.

Согласно выражению (214):

$$F'_0 = 7690 + 5000 \quad 0{,}526 = 10320 \ кг.$$

Согласно выражению (215):

$$F_0'' = 3990 + 5000 \quad 0{,}526 = 6620 \ кг.$$

Согласно выражению (131b):

$$F_1'' = 3538 + 5000 \quad 0{,}526 = 6170 \ кг.$$

В течение периода $t_2$:

$$F'_2 = F_{s2}' = 3538 \ кг,$$

$$F''_2 = F''_{s2} = 1236 \ кг$$

В период $t_3$:

$$F_3 = F_{b3} \qquad 1750 \ кг.$$

Согласно выражению (145):

$$F_4' = 810 - 5000 \quad 0{,}142 = 100 \ кг.$$

Согласно выражению (42):

$$F_4'' = F_{b4}'' = -4890 - 5000 \quad 0{,}142 = -5600 \ кг.$$

Мощности, обусловленные статической нагрузкой, имеют нижеследующие значения (см. нижнюю диаграмму на фиг. 33):

$$P''_{s0} = F''_{s0} \quad v_1 = 3990 \quad 2{,}4 = 9576 \frac{кг.\ м}{сек} = 94 \ kW;$$

$$P''_{s1} = P'_{s2} = F_{s1}'' \quad V = F'_{s2} \quad V = 3538 \quad 7 = 24766 \frac{кг.\ м}{сек} = 243 \ kW;$$

$$P''_{s2}' = P'_{s3} = F''_{s2} \quad V = F'_{s3} \quad V = 1236 \quad 7 = 8652 \frac{кг.\ м}{сек} = 85 \ kW;$$

$$P''_{s3} = P'_{s4} = F''_{s3} \quad v_3 = F'_{s4} \quad v_3 = 810 \quad 1{,}25 = 1012{,}5 \frac{кг.\ м}{сек} = 10 \ kW;$$

Мощности на валу барабана, обусловленные движущими усилиями, представляются следующим образом:

$$P_0'' = F_0'' \quad v_1 = 6620 \quad 2{,}4 = 15888 \frac{кг.\ м}{сек} = 156 \ kW;$$

$$P_1'' = F_1'' \quad V = 6170 \quad 7 = 43180 \frac{кг.\ м}{сек} = 423\ kW;$$

$$P_2' = P'_{s2} = 24766 \frac{кг.\ м}{сек} = 243\ kW;$$

$$P_2'' = P''_{s2} = 8652 \frac{кг.\ м}{сек} = 85\ kW;$$

$$P_3' = F_{b3} V = -1750 \quad 7 = -12250 \frac{кг.\ м}{сек} = -120\ kW;$$

$$P_3'' = P_{b3} \quad v_3 = -1750 \quad 1{,}25 = -2187 \frac{кг.\ м}{сек} = -21{,}4\ kW.$$

$$P_4' = F_4' \quad v_3 = 100 \quad 1{,}25 = 125 \frac{кг.\ м}{сек} = 1{,}2\ kW$$

### 3. Пятипериодная тахограмма

Сход ролика опрокидного сосуда по разгрузочной кривой в период $t_0$ может происходить с ускорением $a_0 < a_1$, в результате чего получается соответственное уменьшение начального движущего усилия $F_0'$.

Диаграммы на фиг. 34 характеризуют подобный режим при условии $v_1 > v_3$. С целью точного определения параметров тахограммы в данном случае, как и при режиме, иллюстрируемом диаграммами на фиг. 33, в качестве исходного параметра будем принимать период $t_3$, которым необходимо задаться; равным образом должны быть заданы также величины $v_1$ и $v_3$.

В рассматриваемом случае остаются в силе полученные выше выражения (204), (171b), (17), (36), (212), (176a) и (40), обусловливающие определение соответственных параметров тахограммы. Что касается значений остальных параметров, то в применении к тахограмме на фиг. 34 они представляются следующим образом.

$$t_0 = \frac{2h_0}{v_1} \tag{31}$$

$$a_0 = \frac{v_1}{t_0} \tag{32}$$

$$h_1 = \frac{1}{2}(V + v_1)t_1. \tag{51}$$

$$t_2 = T - t_0 - t_1 - t_3 - t_4. \tag{216}$$

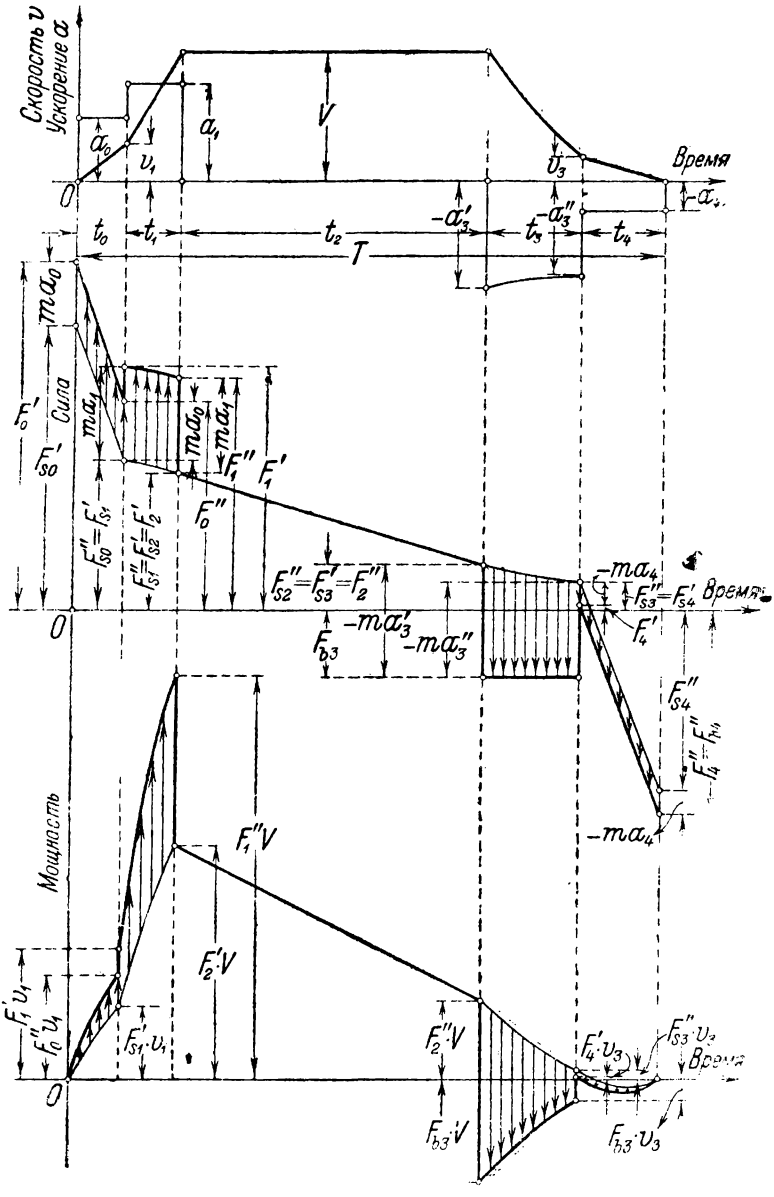
$$H = h_0 + h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 2h_0 + h_1 + h_2 + h_3. \tag{55}$$

Подставляя в последнее выражение значение $h_1$, определяемое выражением (51), а также значение $h_2$, получаемое на основании выражений (17) и (216), имеем:

$$H = 2h_0 + \frac{1}{2}(V + v_1)t_1 + V(T - t_0 - t_1 - t_3 - t_4) + h_3.$$

Решая относительно $t_1$, получаем:

$$t_1 = \frac{4h_0}{V - v_1} + \frac{2V}{V - v_1}(T - t_0 - t_3 - t_4) - \frac{2}{V - v_1}(H - h_3). \quad (217)$$




Фиг. 34. Пятипериодная тахограмма с прямолинейным боком в период $t_1$ и вогнутым боком в период $t_3$; соответсвенные диаграммы ускорений, усилий и мощностей характеризуют неуравновешенную систему подъема для опрокидных сосудов при тормозном режиме с постоянным усилием $F_{b3}$ в период $t_3$.

$$a_1 = \frac{V - v_1}{t_1}. \quad (218)$$

На диаграмме усилий фиг. 34 величины $ma_0$ и $ma_1$ представляют значения положительных динамических усилий соответственно в периоды $t_0$ и $t_1$, величины $-ma_3'$, $-ma_3''$ и $-ma_4$ — значения отрицательных динамических усилий соответственно в периоды $t_3$ и $t_4$; $m$ — масса движущихся частей подъемного устройства, $a_0$, $a_1$, $-a_3'$, $-a_3''$, $-a_4$ — соответственные значения ускорений и замедлений.

Пример 22.

Пользуясь данными примера (21), рассчитать элементы подъема в применении к диаграммам на фиг. 34.

Задаемся параметрами:

$$t_3 = 10 \text{ сек}; \; v_1 = 2 \frac{м}{сек}.$$

Согласно выражению (31)

$$t_0 = \frac{2 \quad 5{,}5}{2} = 5{,}5 \text{ сек}.$$

Начальное ускорение согласно выражению (32):

$$a_0 = \frac{2}{5{,}5} = 0{,}36 \frac{м}{сек^2}.$$

Из предыдущего примера имеем:

$$t_4 = 8{,}8 \text{ сек}; \; h_3 = 38{,}68 \text{ м}.$$

Период $t_1$ получается из выражения (217):

$$t_1 = \frac{4.5{,}5}{7-2} + \frac{2.7}{7-2}(62 - 5{,}5 - 10 - 8{,}8) - \frac{2}{7-2}(300 - 38{,}68);$$

$$t_1 = 5{,}43 \text{ сек}.$$

Согласно выражению (51)

$$h_1 = \frac{1}{2}(7 + 2) \quad 5{,}43 = 24{,}43.$$

Согласно выражению (216)

$$t_2 = 62 - 5{,}5 - 5{,}43 - 10 - 8{,}8;$$

$$t_2 = 32{,}27 \text{ сек}.$$

Согласно выражению (17)

$$h_2 = 7 \quad 32{,}27 = 225{,}89 \text{ м}.$$

Согласно выражению (55)

$$H = 2 \quad 5{,}5 + 24{,}43 + 225{,}89 + 38{,}68 = 300 \text{ м}.$$

Согласно выражению (218)

$$a_1 = \frac{7 - 2}{5{,}43} = 0{,}92 \frac{м}{сек^2}.$$

Из предыдущего примера имеем величины замедлений:

$$a_3' = 0{,}57 \frac{м}{сек^2}; \quad a_3'' = 0{,}512 \frac{м}{сек^2}; \quad a_4 = 0{,}142 \frac{м}{сек^2}$$

Из предыдущего примера начальное статическое усилие $F_{s0}' = 7690$ *кг*. Начальное движущее усилие

$$F_0' = F_{s0}' + ma_0 = 7690 + 5000 \quad 0{,}36 = 9490 \text{ кг}.$$

Из предыдущего примера статическое усилие в конце периода $t_0$ и в начале периода $t_1$:

$$F''_{s0} = F_{s1}' = 3990 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_0$:

$$F_0'' = F_{s0}'' + ma_0 = 3990 + 5000 \quad 0{,}36 = 5700 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в начале периода $t_1$:

$$F_1' = F_{s1}' + ma_1 = 3990 + 5000 \quad 0{,}92 = 8590 \text{ кг}.$$

Статическое усилие в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$, равное движущему усилию в начале последнего периода:

$$F''_{s1} = F'_{s2} = F_2' = kQ + p[H - 2(h_0 + h_1)] =$$

$$= 1{,}2 \quad 2000 + 5{,}5[300 - 2(5{,}5 + 24{,}43)];$$

$$F''_{s1} = F_{s2}' = F_2' = 3720 \text{ кг}.$$

Движущее усилие в конце периода $t_1$:

$$F''_1 = F'' \quad + ma_1 = 3720 + 5000 \quad 0{,}92 = 8320 \text{ кг}.$$

Статическое усилие в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$, равное движущему усилию в конце первого периода:

$$F''_{s2} = F_{s3}' = F_2'' = F'_{s2} - 2ph_2 = 3720 - 2 \quad 5{,}5 \quad 225{,}89;$$

$$F''_{s2} = F_{s3}' = F_2'' = 1236 \text{ кг},$$

то есть получилось то же значение, что и в предыдущем примере.

Равным образом, из предыдущего примера имеем соответственные статические и движущие усилия:

$$F''_{s3} = F'_{s4} = 810 \text{ кг}.$$

$$F''_{s4} = -4890 \text{ кг}.$$

$$F_4' = 100 \text{ кг}.$$

$$F_4'' = F''_{b4} = -5600 \text{ кг}.$$

Постоянное тормозное усилие в период $t_3$

$$F_{b3} = -1750 \text{ кг}.$$

Соответственные мощности по отдельным периодам представляются следующим образом (см. нижнюю диаграмму на фиг. 34):

$$P_{s0}'' = P'_{s1} = F''_{s0} \cdot v_1 = F_{s1}' \cdot v_1 = 3990 \cdot 2 = 7980 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 78 \text{ kW};$$

$$P''_0 = F''_0 \cdot v_1 = 5700 \cdot 2 = 11400 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 112 \text{ kW};$$

$$P_1' = F_1' \cdot v_1 = 8590 \cdot 2 = 17180 \frac{\text{кг. м}}{\text{сек}} = 168 \text{ kW};$$

$$P''_{s1} = P'_{s2} = P_2' = F''_{s1} \cdot V = F'_{s2} \cdot V = F_2' \cdot V = 3720.7 =$$

$$= 26040 \frac{кг.\ м}{сек} = 255\ kW;$$

$$P''_1 = F''_1\ V = 8320 \cdot 7 = 58240 \frac{кг.\ м}{сек} = 571\ kW;$$

$$P''_{s2} = P''_2 = F''_{s2} \cdot V = F''_2 \cdot V = 1236 \cdot 7 = 8652 \frac{кг.\ м}{сек} = 85\ kW;$$

$$P'_3 = F_{b3} \cdot V = -1750 \cdot 7 = -12250 \frac{кг.\ м}{сек} = -120\ kW;$$

$$P''_{s4} = P'_{s4} = F_{s4}'' \cdot v_3 = F'_{s4} \cdot v_3 = 810 \cdot 1{,}25 = 1012{,}5 \frac{кг.\ м}{сек} = 10\ kW;$$

$$P''_3 = F_{b3} \cdot v_3 = -1750 \cdot 1{,}25 = -2187 \frac{кг.\ м}{сек} = -21\ kW;$$

$$P_4' = F_4' \cdot v_3 = 100 \cdot 1{,}25 = 125 \frac{кг.\ м}{сек} = 1{,}2\ kW.$$

*Раздел второй*

# ДИНАМИКА СПУСКА

Режим спуска обусловлен отрицательной статической нагрузкой, имеющей место в том случае, когда вес опускаемого груза больше веса одновременно поднимаемого груза.

Поскольку на практике операции спуска обычно осуществляются обыкновенными клетевыми подъемами, то в данном случае рассмотрению подлежат лишь режимы, имеющие место при выполнении трехпериодных тахограмм.

В настоящем разделе рассмотрена „Динамика спуска" лишь для систем статически уравновешенной и неуравновешенной. Что касается системы с тяжелым хвостовым канатом, то для нее динамика спуска здесь не рассматривается по тем соображениям, что тяжелый хвостовой канат на практике нашел применение главным образом при системе Кепе, у которой натяжения со стороны поднимающейся и опускающейся клети должны иметь определенное соотношение, обусловливающее отсутствие скольжения каната.*

## I. УРАВНОВЕШЕННАЯ СИСТЕМА С РАВНОВЕСНЫМИ КАНАТАМИ

В период *пуска* отрицательная статическая нагрузка при условии предоставления системы самой себе сообщила бы последней некоторое ускорение $a_1' = \operatorname{tg} \alpha' = \frac{kQ}{m}$ где $\alpha'$ — угол наклона получаемой при этом линии скорости к оси времен, $k < 1$ — коэфициент, учитывающий вредные

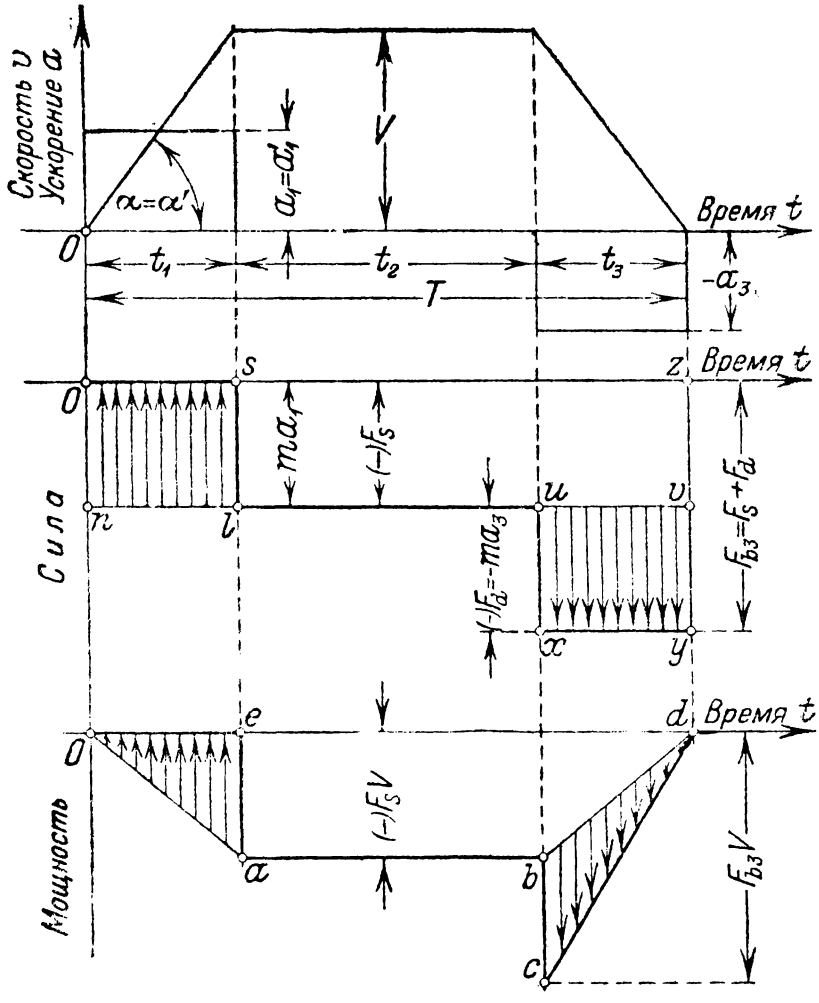
* Динамика спуска для системы с тяжелым хвостовым канатом рассмотрена автором в труде „Горная электромеханика," Том II, Рудничный электрический подъем, часть 2-я. Физико-механические основы. Стр. 60-68. 1937.

сопротивления, $Q$ — полезный за раз спускаемый груз,* $m$ — приведенная масса всех движущихся частей подъемного устройства. Если обозначим ускорение, которое является необходимым для осуществления в период пуска *заданной* тахограммы, через $a_1 = \operatorname{tg}\alpha$, то при этом возможно существование следующих соотношений между упомянутыми величинами ускорений:

1) $a_1 = \operatorname{tg}\alpha = a_1' = \operatorname{tg}\alpha'$ (фиг. 35);

2) $(a_1 = \operatorname{tg}\alpha) > (a_1' = \operatorname{tg}\alpha')$ (фиг 36);

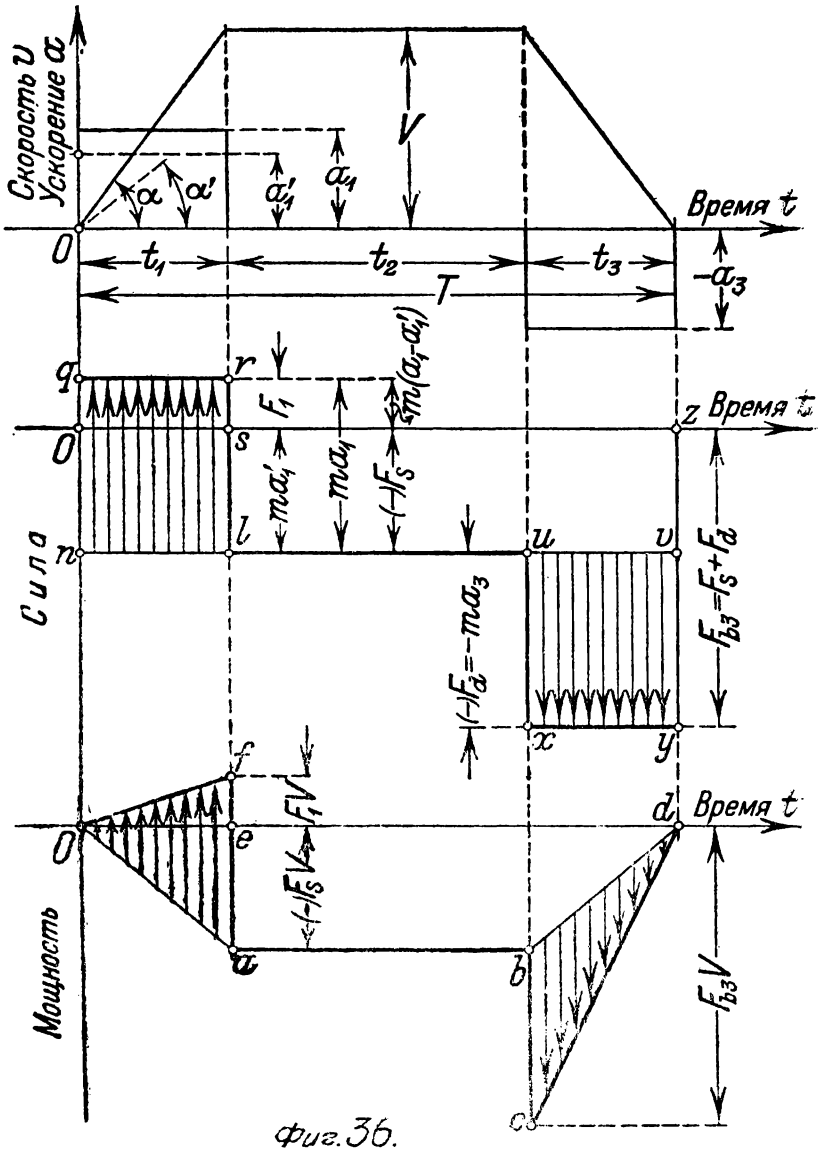
3) $(a_1 = \operatorname{tg}\alpha) < (a_1' = \operatorname{tg}\alpha')$ (фиг. 37).




Фиг. 35. Трехпериодная тахограмма и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой, при статически уравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении равенства в период $t_1$ заданного пускового и собственного (свободного) ускорения системы.

* В предположении, что поднимающаяся клеть не загружена; в противном случае $Q$ представляет разность весов опускаемого и поднимаемого грузов.

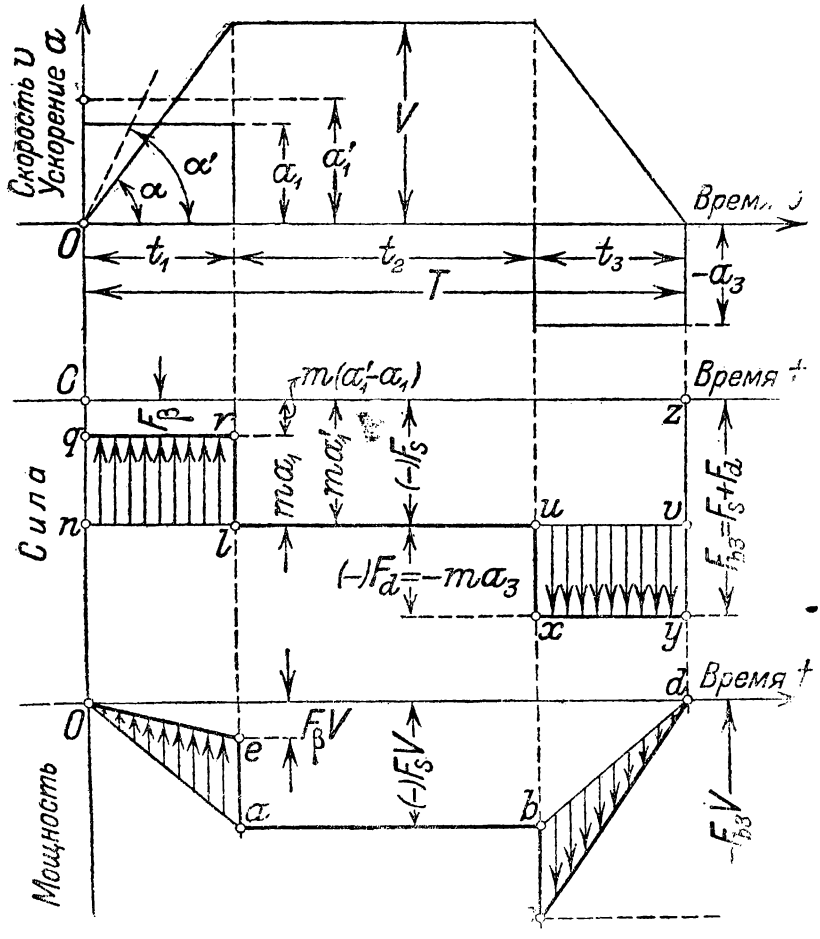
1. В первом случае (фиг. 35) в продолжение периода пуска $t_1$ ни двигатель, ни тормоз не действуют. Постоянная отрицательная статическая на-




Фиг. 36 Трехпериодная тахограмма и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой, при статически уравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении, что заданное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы.

грузка $F_s$ сообщает системе в указанный период живую силу, величина которой определяется на диаграмме мощностей площадью треугольника *Oва*; эта живая сила в период замедления $t_3$ увеличивает отрицательную нагрузку на величину $F_d$, обусловленную действием инерционных масс, проявляющих себя в последний период. Таким образом, в период $t_3$ тормоз должен развивать силу, равную по величине и противоположную по знаку

отрицательной нагрузке $F_{b1}=F_s+F_d$. В рассматриваемом случае, при равнобокой трапецоидальной тахограмме, динамическая нагрузка $F_d=F_s$; в случае же неравнобокой трапеции величина силы $F_d$ определяется из условий равенства площадей *OnlsO* и *ихуии*.




Фиг 37 Трехпериодная тахограмма и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой при статически уравновешанной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении, что заданное пусковое ускорение меньше собственного (свободного) ускорения системы.

Что касается периода $t_2$, то для поддержания в указанный период скорости $V$ спуска необходимо, чтобы сила торможения была равна и направлена противоположно отрицательной статической нагрузке $F_s$.

На диаграмме мощностей площади треугольников *Oae* и *bcd* должны быть равны между собой.

2 Во втором случае (фиг. 36) в продолжение периода пуска $t_1$ должен быть включен двигатель, развивающий постоянную силу $F_1=m(a_1-a_1')$, достаточную для того, чтобы собственное ускорение $a'_1=\operatorname{tg}\alpha'$ системы увеличить до необходимого значения $a_1=\operatorname{tg}\alpha$. Запасаемая в период пуска живая сила определяется на диаграмме мощностей площадью *OfeaO*, равною сумме площадей *OeaO* и *OefO*, из которых первая обусловлена действием от-

рицательной статической нагрузки $F_s$, вторая—действием включенного двигателя, развивающего постоянную силу $F_1$ того же направления, что и сила $F_s$.

При равнобокой трапецоидальной тахограмме, в период $t_3$ отрицательная динамическая нагрузка $F_d = F_s + F_1$; при неравнобокой трапеции величина силы $F_d$ определяется из условия равенства площадей *qnlrq* и *uxyvu*. На диаграмме мощностей должны быть равны между собою площади *OfeaO* и *bcdb*.

На фиг. 35 и 36 кривая *sluxyvz* представляет закон изменения тормозных усилий, которые должны действовать в течение времени $(t_2 + t_3)$.

3. В третьем случае (фиг. 37) в период пуска $t_1$, с целью уменьшения собственного ускорения $a_1' = \operatorname{tg}\alpha'$ системы до требуемого значения $a_1 = \operatorname{tg}\alpha$, необходимо применить тормоз, развивающий постоянную силу $F_\beta$, действующую в направлении противоположном отрицательной силе $F_s$. Запасенная в период $t_1$ живая сила определяется на диаграмме мощностей площадью *OeaO*.

При равнобокой трапецоидальной тахограмме в период $t_3$ динамическая нагрузка $F_d = F_s - F_\beta$, где $F_\beta = m(a_1' - a_1)$; при неравнобокой трапеции величина $F_d$ определяется из условия равенства площадей *qnlrq* и *uxyvu*.

Кривая *Oqrluxyvz* выражает закон изменения тормозных усилий, которые должны действовать в течение времени $(t_1 + t_2 + t_3)$.

На диаграмме мощностей площадь *OeaO* равна площади *bcdb*.

На диаграмме сил и мощностей (фиг. 35, 36 и 37) области действия сил инерции в периоды пуска и замедления заштрихованы соответственно направленными стрелками.

## II. НЕУРАВНОВЕШЕННАЯ СИСТЕМА

### А. ТАХОГРАММА С ВОГНУТЫМИ БОКАМИ

Ниже приводятся лишь главнейшие выражения, дающие возможность производства соответственных кинематических и динамических расчетов для случаев спуска, при которых изменение скорости в периоды пуска и замедления происходит по закону гиперболического синуса.

Некоторые из интересующих нас параметров могут быть получены на основании соответственных выражений „Динамики подъема“ путем производства в них соответственных изменений.

Так, например, собственное ускорение системы получим из выражения (164),* в котором примем $F_1 = 0$ и изменим знак у члена $kQ$:

$$a_0 = \frac{kQ - pH}{m} \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t\right) = var. \tag{219}$$

Начальное (минимальное) собственное ускорение системы получается из последнего выражения при $t = 0$:

$$a_0' = a_{0(\min)} = \frac{kQ - pH}{m} \tag{220}$$

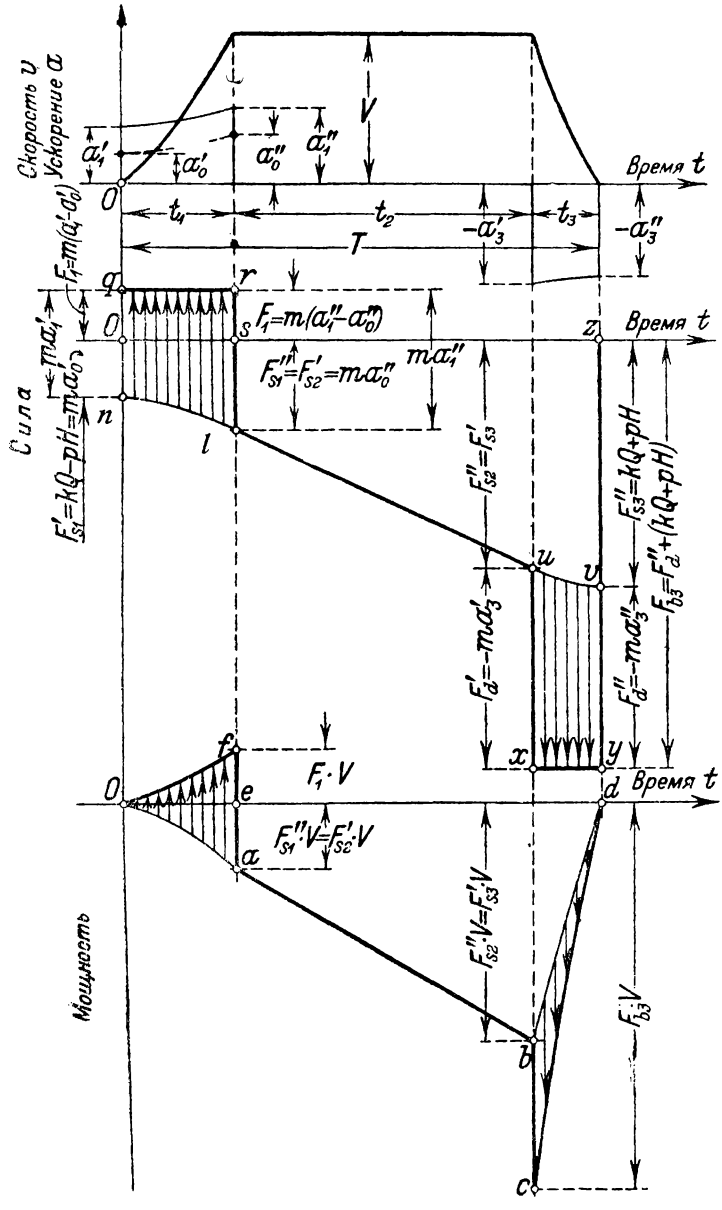
Входящие в выражения (219) и (220) величины имеют значения, принятые в „Динамике подъема“ неуравновешенной системы; разница состоит лишь в том, что коэфициент $k$ при отрицательной статической нагрузке меньше единицы, т. е. $k < 1$.

---

* Стр. 99.

Для периода *пуска* рассмотрим три случая.

1. *Начальное ускорение* $a_{1(\min)} = a_1' = \frac{F_1 + (kQ - pH)}{m}$, *обусловленное за-*




Фиг. 38. Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой, при неуравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении, что начальное заданное ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы.

*данной тахограммой, больше начального собственного ускорения системы* $a_0'$, т. е. $a_{1(\min)} = a_1' > a_0'$ (фиг 38). Тогда постоянная сила $F_1$, которую

должен развивать двигатель в период пуска, определится из выражения:

$$F_1 = m(a_1' - a_0'). \tag{221}$$

Или

$$F_1 = m(a_1'' - a_0''), \tag{221а}$$

где $a_1''$ и $a_0''$ — соответственные значения заданного и собственного (свободного) ускорения системы в конце периода пуска.*

Скорость $V$, имеющая место в конце периода $t_1$, получится на основании выражения (161а),** в котором изменен знак у члена $kQ$:

$$V = \frac{F_1 + (kQ - pH)}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) \tag{222}$$

Так как скоростью $V$ обыкновенно задаются, исходя из определенных соображений, то, зная ее, на основании последнего выражения можно определить период пуска $t_1$:

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\, \mathrm{Ar\,sin\,h}\, \frac{V\sqrt{2pm}}{F_1 + (kQ - pH)} \tag{223}$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, определяется применительно к выражению (159а).***

$$h_1 = \frac{F_1 + (kQ - pH)}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) - 1\right] \tag{224}$$

2. *Ускорение $a_1$, обусловленное заданной тахограммой, в течение всего периода пуска равно собственному ускорению системы $a_0$,* т. е. $a_1 = a_0$. (Для начала периода пуска $a_1' = a_0'$, для конца этого периода $a_1'' = a_0''$). Тогда двигатель в период пуска не работает, следовательно, $F_1 = 0$ (фиг. 39).

Период $t_1$ получаем на основании выражения (223), полагая в нем $F_1 = 0$.

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\, \mathrm{Arsinh}\, \frac{V\sqrt{2pm}}{kQ - pH} \tag{225}$$

Пройденный в период пуска путь $h_1$ получаем применительно к выражению (224):

$$h_1 = \frac{kQ - pH}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_1\right) - 1\right] \tag{226}$$

3. *Начальное ускорение $a_1'$, обусловленное заданной тахограммой, меньше начального собственного ускорения системы $a_0'$* т. е. $a_1' < a_0'$ (фиг. 40).

Для рассматриваемого режима получим необходимые параметры, если в соответственных выражениях пункта 2 вместо величины $kQ$ подставим $kQ - F_\beta$, где $F_\beta$ — постоянная сила, развиваемая тормозом в период пуска, определяется из выражения:

$$F_\beta = m(a_0' - a_1'). \tag{227}$$

Или

$$F_\beta = m(a_0'' - a_1''), \tag{227а}$$

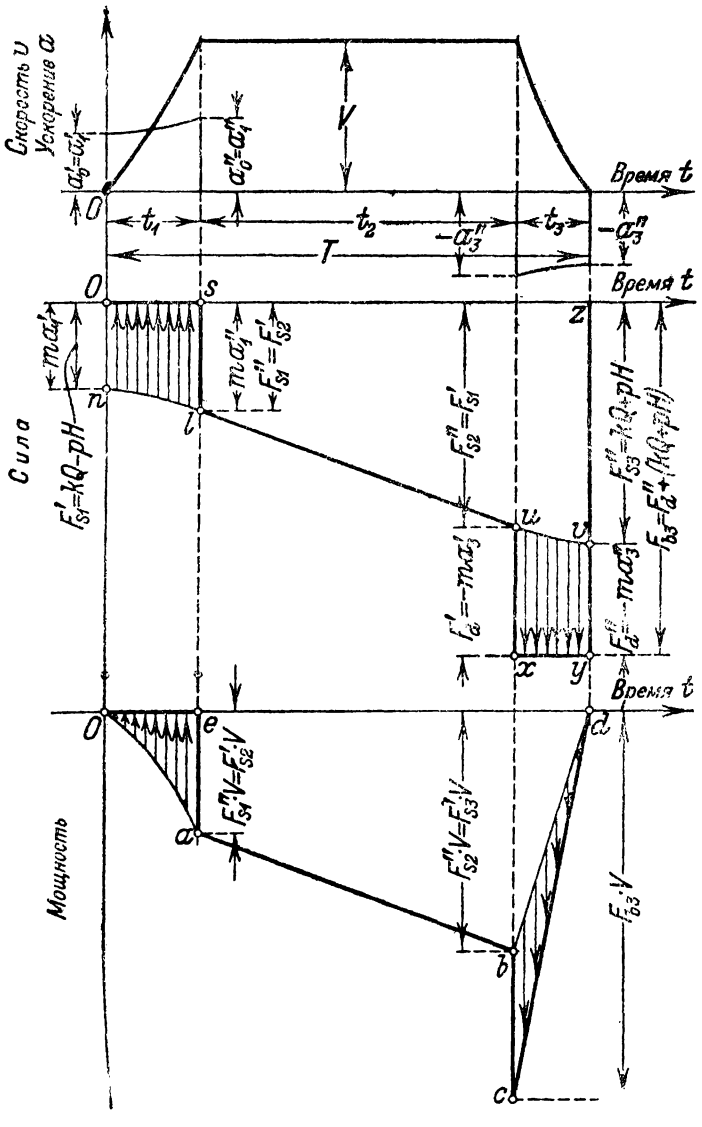
---

* Здесь следует отметить, что в случае подгона системы, обусловливающего увеличение значений пусковых ускорений, период пуска $t_1$ получается меньше, чем это соответствует режиму собственного (свободного) ускорения системы.

** Стр 98 и 114.

*** Стр. 98.

где $a_0''$ и $a_1''$ — соответственные значения собственного (свободного) и заданного ускорения системы в конце периода пуска.*




Фиг. 39. Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой, при неуравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении равенства в период $t_1$ заданного пускового и (собственного) свободного ускорений системы.

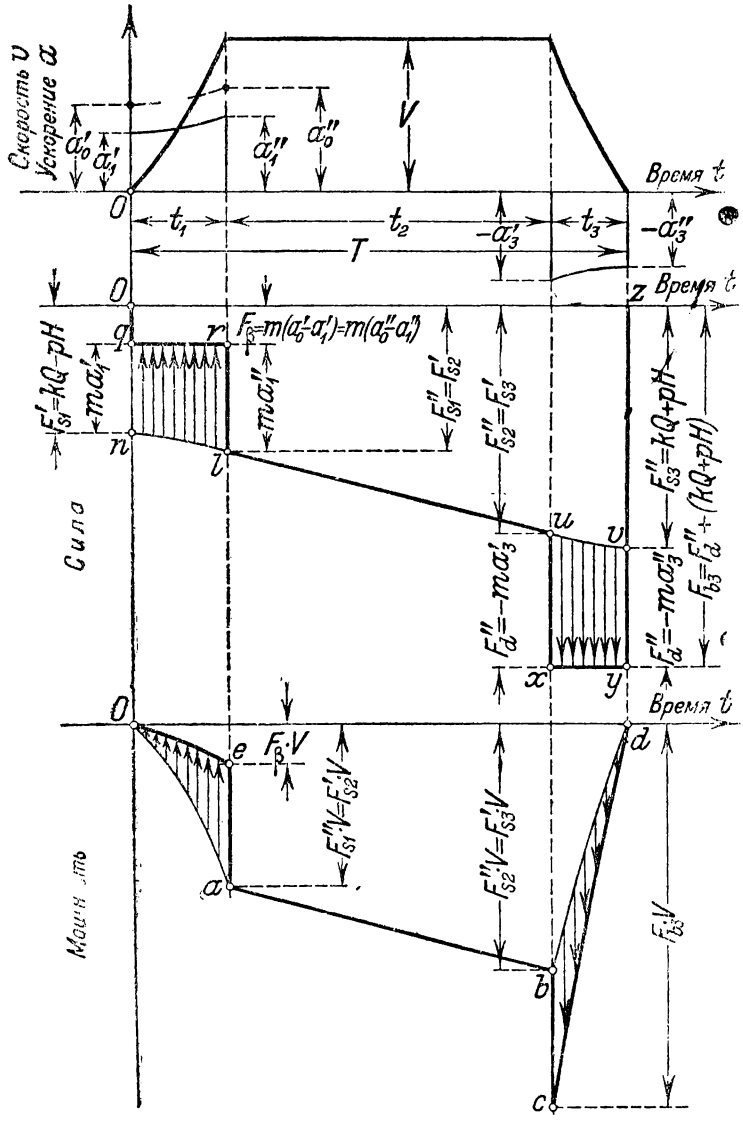
Тогда применительно к выражению (225) получим период $t_1$:

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{2p}}\ \mathrm{Arsinh}\ \frac{V\sqrt{2pm}}{kQ - F_\beta - pH}\ . \qquad (228)$$

* Здесь следует отметить, что в случае подторможивания машины, обусловливающего уменьшение значений пусковых ускорений, период пуска $t_1$ получается больше, чем это соответствует режиму собственного (свободного) ускорения системы.

На основании выражения (226) получим путь $h_1$ проходимый в период $t_1$:

$$h_1 = \frac{kQ - F_\beta - pH}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right) - 1\right] \qquad (229)$$




Фиг. 40, Трехпериодная тахограмма с вогнутыми боками и диаграммы ускорений, усилий и мощностей для режима спуска, обусловленного отрицательной статической нагрузкой, при неуравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении, что начальное заданное ускорение меньше собственного (свободного) ускорения системы.

Отрицательная статическая нагрузка $F_{s1}'$, имеющая место в начале периода $t_1$, по абсолютному значению равна:

$$F_{s1}' = kQ - pH.$$

Отрицательная статическая нагрузка в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$, равная по величине и противоположная по знаку соответственной силе торможения, определяется из выражения:

$$F_{s2}' = kQ - p(H - 2h_1). \tag{230}$$

В продолжение периода $t_1$ отрицательная статическая нагрузка изменяется по соответственному закону гиперболического косинуса.

Период $t_2$ полного хода должен удовлетворять выражению:

$$t_2 > \frac{2H}{V} - T. \tag{183}$$

Путь $h_2$, проходимый в период полного хода, определяется из выражения:

$$h_2 = Vt_2. \tag{17}$$

Период замедления $t_3$ равен:

$$t_3 = T - (t_1 + t_2). \tag{18}$$

Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$:

$$h_3 = H - (h_1 + h_2). \tag{21a}$$

Ввиду того, что входящая в последнее выражение величина $h_2$ зависит от значения периода $t_2$, выбор которого на основании выражения (183) может быть произведен не вполне удачно, величину $h_3$ необходимо проверить, исходя из нижеследующего выражения для абсолютного значения $h_3$, получаемого применительно выражению (171a):

$$h_3 = \frac{F_d''}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3\right) - 1\right] \tag{231}$$

Входящая в последнее выражение величина $F_d''$ представляет динамическую нагрузку, имеющую место в конце периода $t_3$. Она может быть определена из выражения для скорости $V$, имеющей место в начале периода $t_3$ и определяемой применительно к выражению (172a):

$$V = \frac{F_d''}{\sqrt{2pm}} \sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_3\right) \tag{232}$$

Отсюда

$$F \quad \frac{V\sqrt{2pm}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\right)} \tag{233}$$

Отрицательная статическая нагрузка в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ (по абсолютному значению):

$$F_{s2}'' = kQ + p(H - 2h_3). \tag{234}$$

Отрицательная статическая нагрузка в конце подъема:

$$F_{s3}'' = kQ + pH.$$

В продолжение периода $t_3$ отрицательная статическая и динамическая нагрузки изменяются по соответственному закону гиперболического косинуса.

Постоянная сила торможения в период замедления равна:

$$F_{b3} = F_d'' + (kQ + pH), \tag{235}$$

где $F_d''$ определяется из выражения (233).

Величина замедления в продолжение периода $t_3$ получается применительно к выражению (176):

$$a_3 = -\frac{F_d''}{m} \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}t\right). \tag{236}$$

Наименьшее значение замедления, имеющее место в конце периода $t_3'$ получается из последнего выражения при $t = 0$:

$$a_{3(\min)} = a_3'' = -\frac{F_d''}{m}. \tag{237}$$

Мощности на валу барабана определяются в виде произведения из соответственных усилий и скоростей.

На фиг. 38, 39 и 40 представлены диаграммы, характеризующие для неуравновешенной системы подъема следующие режимы спуска, обусловленные характером работы подъема в период пуска $t_1$: a) двигатель развивает постоянную силу $F_1$ (фиг. 38), b) работа двигателя и тормоза отсутствует (фиг. 39), c) тормоз развивает постоянную силу $F_\beta$ (фиг. 40); что касается периода замедления $t_3$, то в этот период всегда действует тормоз, развивающий постоянное усилие $F_{b3}$.*

На фиг. 38 и 39 кривая *sluxyvz* представляет закон изменения тормозных усилий, которые должны действовать в течение времени $(t_2 + t_3)$. На фиг. 40 тормозные усилия за весь период $T$ изменяются по линии *Oqrlux yvz*.

Обозначения на указанных фигурах соответствуют таковым в приведенных выше выражениях. Области действия сил инерции в периоды пуска и замедления заштрихованы соответственно направленными стрелками.

На диаграмме мощностей фиг. 38 запасенная в период $t_1$ живая сила определяется площадью *OfeaO*, равной сумме площадей *OeaO* и *Oe O*; на указанной диаграмме площади *OfeaO* и *bcdb* должны быть равны между собою. На диаграмме мощностей фиг. 39 площади *OeaO* и *bcdb* равны между собою. Равным образом равны между собою площади *OeaO* и *bcdb* на диаграмме мощностей фиг 40 **

Пример 23.

$Q = 3\,500$ *кг*; $k = 0{,}85$; $H = 330$ *м*; $p = 7\,\frac{кг}{м}$ $m = 3\,000$ *кг*. $сек^2$;

$T = 51$ *сек*; $V = 8\ \frac{м}{сек}$

Начальное собственное ускорение системы получаем согласно выражению (220):

$$a_0' = \frac{0{,}85 \cdot 3500 - 7 \cdot 330}{3000}$$

$$a_0' = 0{,}22\ \frac{м}{сек^2}$$

---

* Величина усилия $F_{b3}$ для отдельных режимов, характеризуемых диаграммами на фиг. (38), (39) и (40), имеет различные значения.

** Динамическое усилие $F_d''$, определяемое выражением (233), может также получено из условий соответственного равенства на диаграммах усилий площадей *uxyvu* и *qnlrq* (фиг. 38 и 40), *uxyvu* и *OnlsO* (фиг. 39).

Принимая $a_{1(\min)}=a_1'=0{,}6\frac{м}{сек^2}$, на основании выражения (221) получим постоянную силу двигателя $F_1$,* которую он должен развивать в продолжение периода $t_1$:

$$F_1=3000\cdot(0{,}6-0{,}22)=1140\ кг.$$

Согласно выражению (223) период пуска $t_1$ равен:

$$t_1=\sqrt{\frac{3000}{2\cdot7}}\operatorname{Arsinh}\frac{8\sqrt{2\cdot7\cdot3000}}{1140+0{,}85\cdot3500-7\cdot330};$$

$$t_1=11{,}9\ сек.$$

Ускорение в конце периода $t_1$:

$$a_1''=a_1'\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\,t_1\right)=0{,}6\cosh\left(\sqrt{\frac{2\cdot7}{3000}}\ \ 11{,}9\right);$$

$$a_1''=0{,}8\frac{м}{сек^2}.$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$, определяется из выражения (224):

$$h_1=\frac{1140+2975-2310}{14}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{14}{3000}}\ \ 11{,}9\ \right)-1\right]$$

$$h_1=47{,}4\ м.$$

Отрицательная статическая нагрузка в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$ получается на основании выражения (230):

$$F_{s2}'=0{,}85\cdot3500-7\,.\,(330-2\cdot47{,}4);$$

$$F_{s2}'=1329\ кг.$$

Период $t_2$ полного хода согласно выражению (183);

$$t_2>2\cdot\frac{330}{8}-51;$$

$$t_2>31{,}5\ сек.$$

Примем $t_2=31{,}8$ *сек.*
Тогда согласно выражению (17) путь, проходимый в период полного хода:

$$h_2=8\cdot31{,}8=254{,}4\ м.$$

Период замедления $t_3$ согласно выраженю (18):

$$t_3=51-(11{,}9+31{,}8)=7{,}3\ сек.$$

На основании выражения (21а) путь $h_3$, проходимый в период замедления:

$$h_3=330-(47{,}4+254{,}4)=28{,}2\ м.$$

---

* Случай применительно к фиг. 38

С целью проверки величины $h_3$ необходимо предварительно определить из выражения (233) величину динамической нагрузки $F_d''$, имеющей место в конце периода замедления:

$$F_d'' = \frac{8\sqrt{2\cdot 7\cdot 3000}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 7}{3000}}\cdot 7{,}3\right)}$$

$$F_d'' = 3135 \text{ кг}.$$

Проверка пути $h_3$ согласно выражению (231) дает для него следующее значение:

$$h_3 = \frac{3135}{14}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{14}{3000}}\cdot 7{,}3\right) - 1\right]$$

$$h_3 = 28{,}21 \text{ м} \cong 28{,}2 \text{ м}.$$

Последнее значение $h_3$ практически совпадает с полученным выше $_3 = 28{,}2$ м, согласно выражению (21а).

Отрицательная статическая нагрузка в конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$ на основании выражения (234) составляет:

$$F_{s2}'' = 0{,}85\cdot 3500 + 7\cdot(330 - 2\cdot 28{,}2);$$

$$F_{s2}'' = 4890 \text{ кг}.$$

Замедление в конце периода $t_3$ согласно выражению (237):

$$a_3'' = \frac{3135}{3000} = 1{,}045 \frac{м}{сек^2}$$

Замедление в начале периода $t_3$ согласно выражениям (236) и (237):

$$a_3' = a_3'' \cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_3\right) = 1{,}045 \cosh\left(\sqrt{\frac{2\cdot 7}{3000}}\cdot 7{,}3\right);$$

$$a_3' = 1{,}178 \frac{м}{сек^2}$$

Постоянная сила торможения в период $t_3$ согласно выражению (235) составляет:

$$F_{b3} = 3135 + (0{,}85 \quad 3500 + 7\cdot 330) = 8420 \text{ кг}.$$

Мощности на валу барабана имеют следующие значения:

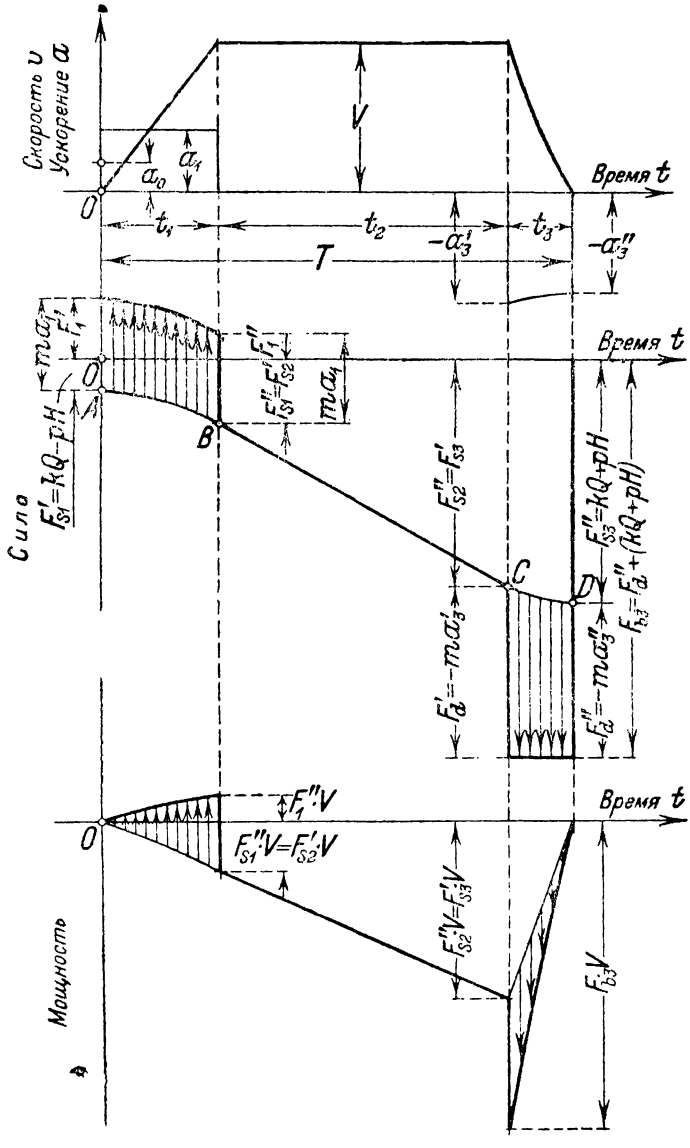
$$P_1 = F_1 V = 1140 \quad 8 = 9120 \frac{кг.м}{сек} = 90 \text{ kW};$$

отрицательные мощности, обусловленные тормозными усилиями

$$\begin{cases} P'_2 = F_{s2}' V = 1329\cdot 8 = 10632 \frac{кг.м}{сек} = 104 \text{ kW}; \\ P''_2 = F_{s2}'' V = 4890 \quad 8 = 39120 \frac{кг.м}{сек} = 384 \text{ kW}; \\ P_{b3} = F_{b3} V = 8420 \quad 8 = 67360 \frac{кг.м}{сек} = 622 \text{ kW}. \end{cases}$$

## в. ТАХОГРАММА С ОДНИМ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМ И ДРУГИМ ВОГНУТЫМ БОКОМ

На практике может иметь место тахограмма, при которой скорость, в случае подгона в период пуска, изменяется по закону прямой линии,* в период же замедления по закону гиперболического синуса (фиг. 41).




Фиг. 41. Трехпериодная тахограмма с прямолинейным боком в период $t_1$ и вогнутым боком в период $t_3$; соответственные диаграммы ускорений, усилий и мощностей характеризуют режим спуска, обусловленный отрицательной статической нагрузкой, при неуравновешенной системе подъема с обыкновенными клетями в предположении, что заданное постоянное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы.

В связи с этим изменение отрицательной статической нагрузки в период $t_1$

* При автоматизации пусковых операций при помощи реле времени (см. 2-ю часть).

происходит по закону параболы $AB$, в период же $t_з$ — по гиперболической косинусоиде $CD$.

В рассматриваемом случае определение параметров тахограммы может быть произведено двумя методами.

1) При *точном* определении означенных параметров необходимо задаться одним из элементов периода замедления, а именно, периодом $t_з$, или динамическим усилием $F_d''$ в конце указанного периода.

2) При определении параметров тахограммы путем подбора периода $t_з$ согласно неравенству (183) можно пользоваться методом, примененным при решении примера 17.

Ниже приводится способ *точного* определения параметров рассматриваемой тахограммы.

При заданном периоде $t_з$ динамическое усилие $F''_d$ в конце этого периода определяется из выражения:

$$F_d'' = \frac{V\sqrt{2pm}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_з\right)} \tag{233}$$

При заданном усилии $F_d''$ период $t_з$ получается из выражения (233):

$$t_з = \sqrt{\frac{m}{2p}}\ \mathrm{Arsinh}\ \frac{V\sqrt{2pm}}{F_d''}. \tag{233а}$$

Постоянная сила торможения $F_{bз}$ в период замедления:

$$F_{bз} = F_d'' + (kQ + pH). \tag{235}$$

Путь $h_з$, проходимый в период $t_з$, определяется из выражения:

$$h_з = \frac{F_d''}{2p}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_з\right) - 1\right] \tag{231}$$

Замедление $a_з''$ в конце периода $t_з$:

$$a_з'' = -\frac{F_d''}{m} \tag{237}$$

Замедление $a_з'$ в начале периода $t_з$:

$$a_з' = a_з''\cosh\left(\sqrt{\frac{2p}{m}}\, t_з\right) \tag{236а}$$

Период $t_1$ определяется из выражения:

$$t_1 = 2\left(T - t_з - \frac{H - h_з}{V}\right) \tag{127а}$$

Путь $h_1$, проходимый в период $t_1$:

$$h_1 = \frac{1}{2} V t_1. \tag{15}$$

Постоянное пусковое ускорение

$$a_1 = \frac{V}{t_1}. \tag{32а}$$

Начальное пусковое движущее усилие $F_1'$ определяется из выражения:

$$F_1' = ma_1 - (kQ - pH). \tag{238}$$

Пусковое движущее усилие $F_1''$ в конце периода $t_1$ определяется из выражения:

$$F_1'' = ma_1 - [kQ - p(H - 2h_1)]. \tag{239}$$

Период $t_2$ получается из выражения:

$$t_2 = T - t_1 - t_3. \tag{125}$$

Путь $h_2$, проходимый в период $t_2$:

$$h_2 = Vt_2. \tag{17}$$

Пример 24.

В применении к данным примера 23 определить элементы подъема, работающего при режиме спуска согласно диаграммам на фиг. 41.

С целью точного определения параметров тахограммы, задаемся периодом $t_3 = 7$ *сек.* *

Динамическое усилие $F_d''$ в конце периода $t_3$ согласно выражению (233):

$$F_d'' = \frac{8\sqrt{2 \quad 7 \quad 3000}}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 7}{3000}} \quad 7\right)}$$

$$F_d'' = 3300 \text{ кг}.$$

Постоянная сила торможения $F_{b3}$, имеющая место в течение периода $t_3$, согласно выражению (235):

$$F_{b3} = 3300 + (0{,}85 \quad 3500 + 7 \quad 330);$$

$$F_{b3} = 8585 \text{ кг}.$$

Путь $h_3$, проходимый в период $t_3$ согласно выражению (231):

$$h_3 = \frac{3300}{2 \quad 7}\left[\cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 7}{3000}} \quad 7\right) - 1\right]$$

$$h_3 = 27{,}49 \text{ м}.$$

Замедление $a_3''$ в конце периода $t_3$ согласно выражению (237):

$$a_3'' = \frac{3300}{3000} = 1{,}1 \ \frac{м}{сек^2}$$

Замедление $a_3'$ в начале периода $t_3$ согласно выражению (236а):

$$a_3' = 1{,}1 \cosh\left(\sqrt{\frac{2 \quad 7}{3000}} \quad 7\right)$$

* Можно было бы задаться значением динамического усилия $F_d''$ в конце периода $t_3$; тогда последний период определился бы из выражения (233а) на стр. 151.

$$a_3' = 1{,}2\ \frac{м}{сек^2}$$

Период $t_1$ согласно выражению (127а):

$$t_1' = 2\left(51 - 7 - \frac{330 - 27{,}49}{8}\right);$$

$$t_1 = 12{,}37\ сек.$$

Путь $h_1 = \frac{1}{2} \cdot 8 \cdot 12{,}37 = 49{,}48\ м.$

Постоянное пусковое ускорение:

$$a_1 = \frac{8}{12{,}37} = 0{,}65\ \frac{м}{сек^2}.$$

Начальное пусковое движущее усилие $F'_1$ согласно выражению (238):

$$F_1' = 3000 \cdot 0{,}65 - (0{,}85 \cdot 3500 - 7 \cdot 330);$$

$$F'_1 = 1285\ кг.$$

Пусковое движущее усилие $F_1''$ в конце периода $t_1$ согласно выражению (239):

$$F''_1 = 3000 \cdot 0{,}65 - [0{,}85 \cdot 3500 - 7(330 - 2 \cdot 49{,}48)];$$

$$F''_1 = 592\ кг.$$

Период $t_2$ согласно выражению (125):

$$t_2 = 51 - 12{,}37 - 7 = 31{,}63\ сек.$$

Путь $h_2 = 8 \cdot 31{,}63 = 253{,}04\ м.$

Проверка:

$$H = 49{,}48 + 253{,}04 + 27{,}49 = 330{,}01 \cong 330\ м.$$

Отрицательная статическая нагрузка по отдельным периодам представляется следующим образом.

В начале периода $t_1$:

$$F_{s1}' = kQ - pH = 0{,}85 \cdot 3500 - 7 \cdot 330 = 665\ кг.$$

В конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$:

$$F_{s1}'' = F_{s2}' = kQ - p(H - 2h_1) = 0{,}85 \cdot 3500 - 7(330 - 2 \cdot 49{,}48) = 1358\ кг.$$

В конце периода $t_2$ и в начале периода $t_3$:

$$F_{s2}'' = F_{s3}' = kQ + p(H - 2h_3) = 0{,}85 \cdot 3500 + 7(330 - 2 \cdot 27{,}49) = 4900\ кг.$$

В конце периода $t_3$:

$$F_{s3}'' = kQ + pH = 0{,}85 \cdot 3500 + . \ . 330 = 5285\ кг.$$

Мощность на валу барабана, обусловленная движущим усилием в конце периода $t_1$:

$$P_1'' = F_1''\ V = 592 \cdot 8 = 4736\ \frac{кг \cdot м}{сек} = 46 kW.$$

Мощности на валу барабана, обусловленные тормозными усилиями, представляются в следующем виде.

В начале периода $t_2$:

$$P_2' = F'_{s2} V = 1358 \cdot 8 = 10864 \frac{кг \cdot м}{сек} = 106 \; kW;$$

В конце периода $t_2$:

$$P_2'' = F_{s2}'' \cdot V = 4900 \cdot 8 = 39200 \frac{кг \cdot м}{сек} = 384 \; kW;$$

В начале периода $t_3$:

$$P_{b3} = F_{b3} \cdot V = 8585 \cdot 8 = 68680 \; \frac{кг \cdot м}{сек} = 673 \; kW.$$

*Часть вторая*

# Электрический привод рудничного подъема

*Раздел первый*

## АСИНХРОННЫЙ ПОДЪЕМНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

### I. ФИЗИКА ПРИВОДА

#### А. ПОДЪЕМНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ МОТОРНОМ РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ. РАСХОД ЭНЕРГИИ

Так как при осуществлении рудничного подъема скорость, развиваемая подъемным двигателем, должна изменяться по определенному закону, что в свою очередь может быть достигнуто лишь изменением сопротивления цепи ротора упомянутого двигателя, то очевидно, что для обслуживания подъема должны применяться асинхронные двигатели с контактными кольцами, дающими возможность вводить в цепь ротора добавочное сопротивление (реостат) и тем самым осуществлять заданную тахограмму. Кроме того включение реостата в период пуска обусловлено необходимостью получения большого начального момента вращения и ограничения пусковой силы тока, что при малом сопротивлении вторичной цепи двигателя явилось бы невыполнимым.

Рассмотрим работу асинхронного двигателя в отдельные периоды подъема, для чего воспользуемся фиг. 42,* на которой совмещены диаграммы моментов двигателя для двух взаимно-противоположных направлений вращения его магнитного поля, при общей оси скоростей (*об/мин*). Для системы кривых, соответствующей направлению вращения поля, при котором область генераторного режима расположена под осью скоростей, а области двух остальных режимов (двигательного и противотока) — над указанной осью, значения скольжений $s$ отложены на верхней шкале, для системы же кривых с областью генераторного режима, расположенной над осью скоростей, и областью двух остальных режимов — под этой осью, величины скольжений ($s$) отложены на нижней шкале.

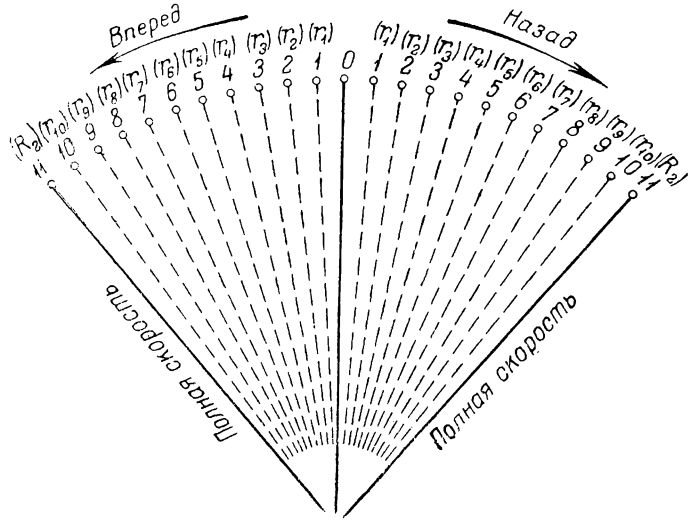
В период пуска двигатель должен развивать *постоянный* момент вращения $M_1 > M_s$, где $M_s$ — наибольшее значение статического момента сопротивления, имеющее место в продолжение периода пуска (см. верхнюю часть фиг. 42). Постоянство указанного момента при ручном управлении удобно осуществлять, пользуясь показаниями амперметра, стрелка которого должна указывать при этом приблизительно одну и ту же силу тока.

Для того чтобы в начале пуска, т. е. при скольжении $s = 1$, двигатель был в состоянии развить момент вращения $M_1$, необходимо в цепь его ротора ввести соответственной величины сопротивление реостат. Рассматривая применение *металлического* реостата, состоящего из отдельных ступеней, необходимо иметь в виду, что строгого постоянства мо-

* См. в конце книги.

мента вращения достигнуть невозможно и приходится довольствоваться лишь тем, чтобы момент, развиваемый двигателем, не выходил из определенных, a priori заданных пределов. Максимальное предельное пусковое значение момента вращения пусть будет $M'_1 > M_1$, минимальное же—$M''_1 < M_1$. Между этими пределами должен колебаться моменг вращения двигателя, давая среднее значение, близкое к $M_1$. От разности предельных значений моментов $M'_1$ и $M''_1$ зависит число ступеней реостата; с увеличением этой разности число ступеней уменьшается, и наоборот; при бесконечно большом количестве ступеней реостата предельные значения моментов $M'_1 = M''_1 = M_1$; последнее условие на практике может быть осуществлено лишь при помощи *жидкостного* реостата, при котором вводимое в цепь ротора сопротивление меняется не скачками, как в металлическом реостате, а непрерывно.

На фиг 43 представлена схема отдельных положений рычага управления подъемной машины применительно к диаграмме моментов двигателя, представленной на фиг. 42. При среднем (нулевом) положении рычага управления подъемный двигатель отключен от сети, при наличии максимального сопротивления цепи ротора. При выведении указанного рычага из нулевого положения по направлению „вперед" или „назад" статор двигателя включается на работу в соответственном направлении, причем в положении *1* в цепь ротора оказывается включенным максимальное сопротивление реостата, составляющее с собственным сопротивлением обмотки ротора величину $r_1$. При положении *2* рычага управления получается сопротивление цепи ротора $r_2 \quad r_1$; при положении *3* — сопротивление $r_3 < r_2$, и т. д.; вообще, по мере перевода указанного рычага от нулевого положения одному из крайних, сопротивление роторной цепи соответственно уменьшается, так что при крайнем положении рычага управления получается полное выведение реостата из цепи ротора, сопротивление которой при этом обусловлено лишь величиной собственного сопротивления обмотки ротора $R_2$.




43. Схема отдельных положений рычага управления подъемной машины применительно к диаграмме моментов, представленной на фиг. 42.

Возвращаясь к рассмотрению условий пуска, нетрудно видеть, что для пуска в ход двигателя в цепь его ротора необходимо включить такое сопротивление, которое вместе с собственным сопротивлением обмотки ротора $R_2$ составило бы некоторую величину $r_6$ (фиг. 42), при которой в начале движения, т. е. при скольжении s = 1, момент вращения получил бы значение $M'_1$ * Так как последний момент согласно принятому нами

*) Так как в рассматриваемом случае полное сопротивление реостата (10 ступеней) больше, чем это требуется для достижения начального момента вращения $M'_1$, последний получится в действительности не при скольжении s = 1, а при несколько меньшем его

условию больше приложенного к двигателю статического момента сопротивления $M_s$, то двигатель придет во вращение, постепенно увеличивая свою скорость (уменьшая скольжение). Момент вращения при этом будет падать, изменяясь по кривой $BC\alpha$, соответствующей сопротивлению $r_6$ вторичной цепи. Если оставить двигатель работать с упомянутым сопротивлением в цепи ротора, то развиваемый им момент вращения при возрастающей скорости (уменьшающемся скольжении) падал бы, изменяясь по кривой $BC\alpha$ до тех пор, пока не сравнялся бы с статическим моментом сопротивления, приложенным к двигателю, что наступило бы при некотором скольжении,* большем против нормального. По достижении равенства моментов вращения и статического сопротивления двигатель при дальнейшей работе продолжал бы развивать момент вращения, неуклонно следующий за всеми изменениями момента сопротивления, т. е. постоянный момент при неизменном скольжении для статически уравновешенной системы, возрастающий момент при увеличивающемся скольжении для системы с тяжелым хвостовым канатом и убывающий момент при уменьшающемся скольжении для неуравновешенной системы подъема. Подобным образом двигатель продолжал бы работать до тех пор, пока или не был бы выключен, или не было бы введено в цепь его ротора сопротивление, составляющее с обмоткой ротора величину, отличную от $r_6$. Однако подобная работа двигателя включенным в цепь его ротора постоянным сопротивлением при нормальных условиях является нерациональной по следующим причинам: 1) в реостате, включенном в цепь ротора, происходит непроизводительная трата энергии на нагревание, тем бо́льшая, чем больше включенное сопротивление реостата и чем дольше время работы двигателя под реостатом; 2) скорость вращения двигателя при включенном реостате меньше (скольжение больше), чем без него, а потому, если бы заставить двигатель работать с постоянным, включенным в цепь его ротора сопротивлением, то подъем не мог бы быть произведен в требуемый промежуток времени; 3) при работе асинхронного двигателя под реостатом теряется его свойство почти не изменять число оборотов с изменением нагрузки, что имеет особое значение для неуравновешенной системы подъема и системы с тяжелым хвостовым канатом.

Принимая это во внимание, управление двигателем необходимо производить следующим образом.

По достижении моментом вращения двигателя, изменяющимся по кривой $BC\alpha$, минимального предельного значения $M''_1$ при некотором скольжения $s_1$, каковой режим работы двигателя характеризуется точкой $C$, *выключают* часть введенного в цепь ротора сопротивления с таким расчетом, чтобы момент вращения двигателя, упавший до величины $M''_1$, поднялся при том же скольжении $s_1$ до значения $M'_1$; на фиг. 42 этот режим характеризуется точкой $D$; величина сопротивления цепи ротора, предположим, при этом будет равна $r_7 < r_6$. Теперь момент вращения, развиваемый двигателем, будет изменяться по кривой $DE$, соответствующей сопротивлению цепи ротора $r_7$, с каковым сопротивлением двигатель будет работать до тех пор, пока его момент вращения не упадет до значения

---

значении, характеризуемом точкой $B$. В связи с этим момент вращения достигнет значения $M'_1$ не сразу после включения двигателя, а спустя некоторое, правда, очень непродолжительное время, в течение которого упомянутый момент будет изменяться по некоторой ступенчатой кривой $AXYB$. При этом необходимо иметь в виду, что до тех пор, пока величина сопротивления вторичной цепи двигателя будет соответствовать пусковым значениям момента вращения, меньшим по сравнению со значениями момента сопротивления, двигатель будет оставаться в покое, и лишь по достижении указанным моментом примерно значения $AX$, превышающего момент сопротивления, двигатель придет в движение; указанным обстоятельством и объясняется характер кривой $AXYB$.

* На фиг. 42 при моменте сопротивления $M_s$ получается скольжение $s_2$, определяемое точкой $\alpha$ кривой $BC\alpha$.

$M_1''$, каковой режим будет характеризоваться точкой $E$ кривой $DE$. При дальнейшей работе двигателя необходимо момент вращения опять поднять до значения $M_1'$, для чего следует выключить еще часть сопротивления, введенного в цепь ротора, доведя сопротивление вторичной цепи двигателя до некоторой величины $r_8 < r_7 < r_6$. Поступая подобным образом, уменьшают постепенно сопротивление цепи ротора до тех пор, пока не будет выключен весь реостат.

Время окончательного выключения реостата будет характеризоваться точкой $T$ кривой $TN$, представляющей изменение момента вращения, развиваемого двигателем при работе лишь с собственным сопротивлением ротора $R_2$, без добавочного сопротивления в его цепи. Таким образом в период работы двигателя под реостатом (период пуска) момент вращения его будет изменяться по кривой $BCDEFGHJKLT$, варьируя около среднего значения $M_1$.

После выключения реостата момент вращения, развиваемый двигателем, будет падать от значения, определяемого точкой $T$, изменяясь по кривой $TWN$, до тех пор, пока не сравняется со статическим моментом сопротивления $M_s$, определяемым, предположим, точкой $N$, при некотором скольжении $s$. С этого времени, если предоставить двигатель самому себе, он будет развивать момент вращения, неуклонно следующий за всеми изменениями статического момента сопротивления, а именно: при уравновешенной системе — линейно равновесными канатами момент вращения будет оставаться неизменным при неизменном же скольжении; для системы с [illegible]елым хвостовым канатом, если принять, что точка $N$ соответствует начал[illegible] равномерного хода, момент вращения двигателя, следуя за изменением статического момента сопротивления, будет возрастать, двигаясь по кривой $NT$ от точки $N$ вверх; изменение скольжения при этом, а следовательно, и скорости двигателя, будет незначительно, в чем нетрудно убедиться, рассматривая кривую моментов $NT$ для двигателя, работающего без реостата, согласно этой кривой, даже значительным изменениям мо[illegible] соответствуют столь небольшие изменения скольжения, а следовательно скорости двигателя, что практически можно с ними не считаться [illegible] орс[illegible] почти не зависящей от изменения момента со[illegible]

Для неуравновешенной системы, если предоставить двига[illegible]отать без реостата, развиваемый им момент вращения будет уменьсоответственно уменьшению момента сопротивления; скорость [illegible] буд[illegible] несколько увеличиваться (скольжение уменьшаться), о[illegible] незначительной степени, что и в данном случае ее можно [illegible]ять почти неизменной.

По окончании равномерного хода в период *замедления* возможны [illegible]же следующие режимы работы подъемного двигателя.

[illegible]) Двигатель продолжает работать, развивая постоянный момент вращения $M_3$, который должен быть меньше наименьшего значения статического момента сопротивления, имеющего место в указанный период. Для [illegible]уществления рассматриваемого режима необходимо, чтобы при скольжении, соответствующем началу периода замедления, двигатель был в состоянии развить некоторый момент $M_3'' < M_3$, для чего в цепь его ротора должно быть *включено* сопротивление, которое с собственным сопротивлением обмотки ротора составило бы некоторую величину $r_8$,*** со-

---

[illegible]) В случае производства подъема по двухпериодной тахограмме без периода равномерного хода двигатель по окончании периода пуска обыкновенно выключается совершенно.

[illegible]) Колебания скорости при изменении нагрузки асинхронного двигателя от холостой до нормальной составляют 2,5 — 5%.

**) Величина включаемого сопротивления при определенном скольжении зависит от величины предельного наименьшего значения момента $M_3''$; в данном случае включаемое сопротивление с сопротивлением обмотки ротора составляет величину $r_8$; вообще же оно может иметь значение, отличное от $r_8$.

ответствующую моменту $M_з''$. Этот режим работы двигателя на фиг. 42 характеризуется точкой $a$, которой будет соответствовать некоторое скольжение $s'_з > s_з$. Указанное изменение скольжения при переходе от периода равномерного хода к периоду замедления в рассматриваемом случае объясняется тем обстоятельством, что при переходе от собственного сопротивления ротора $R_2$ к сопротивлению вторичной цепи $r_8$ рукоятку реостата (рычаг управления) необходимо быстро перевести через две ступени, за каковой промежуток времени скольжение успеет измениться от величины $s_з$ до $s_з'$. Так как момент вращения $M''_з$, развиваемый в данном случае двигателем, меньше статического момента сопротивления $M_s$, то скорость вращения будет уменьшаться (скольжение увеличиваться), в связи с чем момент вращения станет увеличиваться, поднимаясь по кривой *abGF* от точки *a* вверх до тех пор, пока не достигнет некоторого крайнего максимального значения $M'_з$, характеризуемого точкой *b*, в каковое мгновение необходимо *включить* в цепь ротора добавочное сопротивление такой величины, чтобы оно вместе с обмоткой ротора составило некоторую величину $r_7 > r_8$; это включение сразу уменьшит момент вращения до величины $M''_з$, чему соответствует точка *c* кривой *cdED*. Продолжая дальнейшее увеличение сопротивления вторичной цепи до значений $r_7 < r_6 <$ $< r_2 < r_1$, мы достигнем точки *u*, соответствующей моменту $M'_з$, при скольжении $s = 1$, т. е. при остановке двигателя. Таким образом момент вращения, развиваемый двигателем, в период останова будет изменяться по кривой *abcdefghiklmnpqu*, варьируя около среднего значения момента $M_з$ в пределах $M'_з$ и $M''_з$. Точное получение постоянной величины момента вращения $M_з$ в течение всего периода останова возможно осуществить, лишь применяя жидкостный реостат.

Из вышеизложенного видно, что при завершении подъема с включенным в период останова двигателем увеличиваются размеры реостата и усложняется самое управление подъемным двигателем.

b) Двигатель оказывается выключенным в течение всего периода замедления, в результате чего получается режим свободного выбега, обусловливающий изменение скорости подъема согласно определенному закону, в зависимости от системы подъема. Если предположить, что на фиг. 42 точка $N$ на характеристике $R_2$ соответствует концу равномерного хода, для которого имеет место скорость $n_з$, то при выключении двигателя, с целью осуществления периода замедления, момент вращения сразу упадет от величины $M_2$ до нуля, каковой режим будет характеризоваться на фиг. 42 линией $(N - n_з)$ После этого при нулевом моменте вращения скорость двигателя будет падать от значения $n_з$ в начале периода замедления до нуля в конце его, при каковом значении и произойдет останов двигателя.

c) Период замедления осуществляется при наличии торможения. В случае применения механического тормоза режим работы двигателя является аналогичным режиму, рассмотренному в п. b. Что касается характера работы двигателя при осуществлении электрического торможения, то происходящие при этом процессы рассмотрены ниже (см. стр.

Реверсия подъемного двигателя (перемена направления его вращения), как известно, осуществляется посредством переключения двух фаз статора при помощи перевода рычага управления через нуль (фиг. 43).

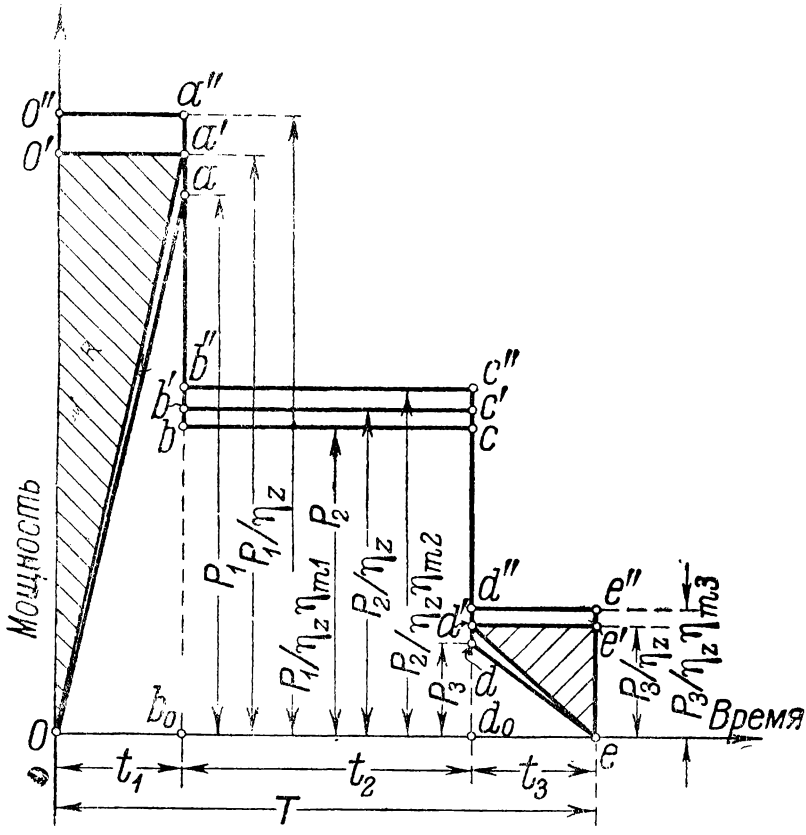
Для лучшего уяснения работы асинхронного двигателя в качестве подъемного рассмотрим некоторые случаи его применения, пользуясь при

---

*) В результате необходимости перевода при этом рычага управления через все промежуточные положения (10...1), с целью быстрой установки его в нулевое положение, обусловливающее выключенное состояние двигателя, скорость последнего может несколько уменьшиться по сравнению с величиной $n_з$, что, однако, практического значения не имеет; ввиду этого на фиг. 42 указанное возможное уменьшение скорости по сравнению с значением $n_з$ не изображено.

этом как диаграммой моментов, представленной на фиг. 42, так и соответственными диаграммами, характеризующими кинематический и динамический режимы подъема.

1. На фиг. 44 представлена диаграмма мощностей для статически уравновешенной системы подъема, в предположении трехпериодной тахо-




Фиг. 44. Трехпериодная диаграмма мощностей для статически уравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъемного двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 2.

граммы с моторным режимом в период замедления. Силы (моменты), развиваемые двигателем в продолжение отдельных периодов движения, являются соответственно постоянными. (См. также фиг. 2).

Здесь следует отметить, что более или менее строгое постоянство сил (моментов), развиваемых двигателем в периоды $t_1$ и $t_3$ его работы под реостатом, как указывалось выше, может быть достигнуто лишь при жидкостном реостате. При металлическом реостате в указанные периоды получаются колебания развиваемых двигателем усилий около некоторых средних значений, принимаемых за расчетные.

Соответственные мощности представляются следующим образом.

$P_1 = F_1 \cdot V$ — отнесенная к валу барабана подъемной машины максимальная мощность, имеющая место в конце периода $t_1$; $\frac{P_1}{\eta_z}$, где $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи, соединяющей вал барабана с валом двигателя, пред-

ставляет максимальную мощность, развиваемую двигателем; $\frac{P_1}{\eta_{lz}\cdot\eta_{m1}}$ постоянная мощность, потребляемая двигателем из сети в период пуска $t_1$.

$P_2 = F_2 \cdot V$ — постоянная мощность, отнесенная к валу барабана, $\frac{P_2}{\eta_{lz}}$ мощность, развиваемая двигателем, $\frac{P_2}{\eta_{lz}\cdot\eta_{m2}}$ — мощность, потребляемая двигателем в течение периода равномерного хода $t_2$.

$P_3 = F_3 V$ — мощность на валу барабана, $\frac{P_3}{\eta_{lz}}$ — мощность, развиваемая двигателем в начале периода замедления $t_3$; $\frac{P_3}{\eta_{lz}\cdot\eta_{m3}}$ постоянная мощность, потребляемая двигателем в продолжение периода $t_3$.

$F_1, F_2, F_3$ — усилия на окружности барабана, имеющие место соответственно в периоды $t_1, t_2, t_3$; $V$ — максимальная скорость подъема; $\eta_{m1}, \eta_{m2}, \eta_{m3}$ — значения к. п. д. подъемного двигателя, имеющие место соответственно в периоды $t_1, t_2, t_3$; ориентировочно можно принимать $\eta_{m1} \cong \eta_{m2} \cong \eta_{m3} \cong \eta_{m(сред)}$, где $\eta_{m(сред)}$ — среднее значение к. п. д. за весь период $T$ работы подъемного двигателя.

Площадь $Oab_0O$ представляет энергию, затрачиваемую двигателем на валу барабана подъемной машины в течение периода пуска $t_1$; площадь $Oaa'O$ — энергия, теряемая в зубчатой передаче, заштрихованная площадь $Oa'O'O$ энергия, теряемая в реостате,* площадь $O'O''a''a'O'$ — потеря энергии в самом двигателе, площадь $OO''a''b_0O$ — полная энергия, потребляемая двигателем из сети, за время $t_1$.

Площадь $b_0bcd_0b_0$ — энергия, затрачиваемая двигателем на валу барабана в течение периода $t_2$; площадь $bb'c'cb$ — потеря энергии в зубчатой передаче, площадь $b'b''c''c'b'$ — потеря энергии в самом двигателе, площадь $b_0b''c''d_0b_0$ — полная энергия, потребляемая двигателем из сети, за время $t_2$.

Площадь $d_0ded_0$ представляет энергию, затрачиваемую на валу барабана в течение перида $t_3$; площадь $dd'ed$ — энергия, теряемая в зубчатой передаче, площадь $ed'e'e$ — энергия, теряемая в реостате, площадь $d'd''e''e'd'$ — потеря энергии в самом двигателе, площадь $d_0d''e''ed_0$ — полная энергия потребляемая двигателем, за время $t_3$.

Энергия, потребляемая двигателем из сети за время полного подъема $T$, представится площадь $OO''a''b''c''d''e''eO$**.

Здесь считаем уместным обратить внимание на принципиальную разницу, существующую между применением реостата, включаемого в цепь ротора асинхронного двигателя, и пускового реостата, включаемого в цепь якоря двигателя постоянного тока. В первом случае роторный реостат, увеличивая сопротивление вторичной цепи двигателя, тем самым увеличивает потери как бы в самом двигателе и понижает его к. п. д.*** Удвига-

---

* При определении энергии, теряемой в реостате, необходимо иметь в виду свойство асинхронного двигателя, согласно которому мощность, потребляемая двигателем в период работы его под реостатом (без потерь в самом двигателе), равна произведению из момента вращения, развиваемого двигателем в соответственный период на полную скорость, присущую двигателю, работающему без реостата. *Полная* мощность, потребляемая двигателем из сети, равна произведению из момента вращения на *полную* скорость с добавлением потерь в самом *двигателе*, или на *синхронную* скорость с добавлением потерь в *статоре* двигателя.

** На фиг. 44 не учтены отдельно потери в соединительных проводах между ротором и реостатом, каковые потери могут быть отнесены к потерям двигателя, характеризуемым к. п. д. $\eta_m$. Равным образом не указано потребление двигателем энергии на прозводство маневров.

*** Следует иметь в виду, что действительный мгновенный к. п. д. асинхронного двигателя, работающего под реостатом, представляет отношение полезной мощности, развиваемой двигателем на его валу, к мощности на зажимах, т. е. потребляемой из сети. Что

телей же постоянного тока реостат, включаемый в цепь якоря, служит для понижения подводимого к двигателю напряжения, поглощая часть последнего и составляя по отношению к двигателю внешнюю цепь. Ввиду этого на диаграмме мощностей (фиг.44) в периоды $t_1$ и $t_3$ за потерями собственно в двигателе, получающем энергию непосредственно из сети, следуют потери в реостате. В двигателях постоянного тока, наоборот, порядок учета потерь энергии в двигателе и реостате необходимо производить в обратном порядке. В конечном результате на полную величину энергии, потребляемой двигателем из сети, порядок учета упомянутых потерь влияния не имеет, существует лишь указанное выше физическое различие явлений.

Энергия $L_n$, потребляемая из сети за полный период $T$ подъема, применительно к диаграмме мощностей на фиг. 44, может быть определена также из выражения:

$$L_n = \lambda \cdot \frac{1}{\eta_{lz}} \left( P_1 \frac{1}{\eta_{m1}} \cdot t_1 + P_2 \cdot \frac{1}{\eta_{m2}} \cdot t_2 + P_3 \cdot \frac{1}{\eta_{m3}} \cdot t_3 \right), \qquad (240)$$

где $\lambda > 1$—коэфициент, учитывающий расход на маневры, а также на получение сжатого воздуха для пневматического тормоза.

Здесь следует отметить, что, хотя расход энергии на маневры не зависит, вообще говоря, от величины расхода энергии на производство подъема, а зависит главным образом от характера маневровых операций и от величины полезного груза, тем не менее расход энергии на маневры и на получение сжатого воздуха для простоты будем выражать в функции расхода энергии на подъем. Ориентировочно можно принимать $\lambda = 1{,}05$—1,1 при наличии маневров и $\lambda = 1{,}01$—1,02 при отсутствии таковых (меньшие значения имеют место при больших расходах энергии на подъем и наоборот). Более или менее точное определение расхода энергии, затрачиваемой на маневры, может быть получено путем умножения имеющего место при производстве маневров момента вращения на полную скорость подъемного двигателя и на время, в течение которого последний при этом окажется включенным; кроме того должны быть учтены также потери в самом двигателе за указанное время. Графическая интерпретация этого способа учета энергии, расходуемой на маневры представлена на фиг. 45, где $F_{ман}$ — маневровое усилие, развиваемое двигателем в период $\tau_{дв}$ работы, $v_{ма}$ максимальная скорость, имеющая место в конце периода $\tau_{дв}$; $V$ — максимальная скорость подъема при работе двигателя без реостата; $\eta_m$ — соответственное значение к. п. д. двигателя, $\tau_{ман}$ — полный период одного маневрового цикла. Заштрихованная площадь, выражающая потери в реостате, показывает, насколько маневровые операции являются неэкономичными.

Если обозначим через $Q$ *кг* вес полезного груза, за раз поднимаемого на высоту $H$ *м*, то полезную работу $L_u$, производимую за один подъем, независимо от системы подъемной машины и способа управления ею, получим из выражения:

$$L_u = Q \cdot H \text{ кг.м} = 0{,}001\, Q \cdot H \text{ т.м}, \qquad (241)$$

---

касается величины к. п. д., принятой нами как при построении диаграммы на фиг. 44, так и в дальнейшем, то для удобства расчета потребляемой *энергии* указанный коэфициент условно отнесен к мощности двигателя, соответствующей полной скорости; потери в реостате при этом учитываются особо. Подобный метод учета к. п. д. практически не оказывает влияния на результаты определения действительной энергии, расходуемой на производство подъема, удобство же этого метода имеет особенное значение при малых мощностях на валу барабана подъемной машины, когда величина собственного к. п. д. двигателя трудно поддается более или менее точному определению.

или

$$L_u = \frac{Q \cdot H}{75 \cdot 3600} \text{ л.с-ч}, \tag{242}$$

или

$$L_u = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot 3600} \; kWh. \tag{243}$$

Коэфициент полезного действия подъемной установки

$$\eta_h = \frac{L_u}{L_n} \tag{244}$$

Расход энергии, приходящийся на полезный тонно-гектометр поднимаемого груза. *

$$l = 100 \; \frac{L_n}{L_u} \; kWh/m.м, \tag{245}$$

где $L_n$—энергия в kWh, потребляемая из сети; $L_u = 0{,}001 \; Q. \; H \; m.м$, [см. выражение (241)].

Расход энергии на шахтную лошадиную силу равен:

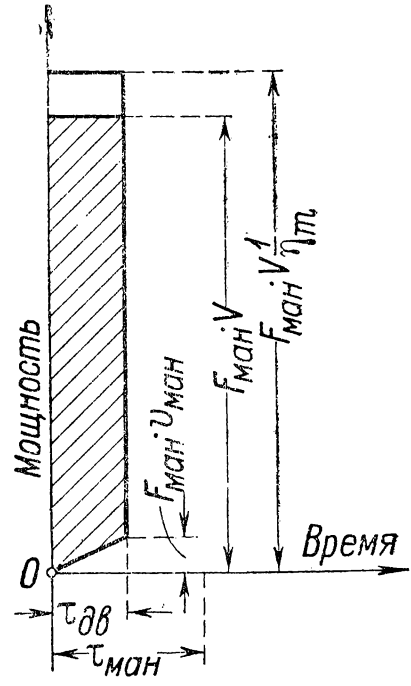
$$l_1 = \frac{L_{n(\text{kwh})}}{L_{u(\text{лс})}} \tag{246}$$

Расход энергии, теряемой в реостате за время $t_1$:

$$L_{r1} = \frac{1}{2} \; \frac{P_1}{\eta_z} \; t_1. \tag{247}$$

Расход энергии, теряемой в реостате за время $t_3$:

$$L_{r3} = \frac{1}{2} \; \frac{P_3}{\eta_z} \; t_3. \tag{248}$$




Фиг. 45. Диаграмма мощностей для маневрового режима, осуществляемого асинхронным подъемным двигателем.

Пример 25.

Пусть мощности, отнесенные к валу барабана подъемной машины, применительно к фиг. 44 имеют следующие значения:

$$P_1 = 714 \text{ л. с}, \; P_2 = 430 \text{ л. с}, \; P_3 = 0.$$

Соответственные периоды:

$$t_1 = 9 \; сек, \; t_2 = 30 \; сек, \; t_3 = 6 \; сек, \; T = 45 \; сек.$$

Коэфициент полезного действия зубчатой передачи (ординарной) примем $\eta_z = 0{,}95$. Коэфициент полезного действия двигателя для периода $t$

* Расход энергии, отнесенный к 1 $m. \; м$, получается слишком незначите

примем $\eta_{m1} = 0{,}89$, для периода $t_2$ — $\eta_{m2} = 0{,}92$ Коэфициент $\lambda$ в предположении наличия маневров примем равным 1,1.

Тогда полный расход энергии, потребляемой из сети за один подъем, на основании выражения (240) получится равным:

$$L_n = 1{,}1 \cdot \frac{1}{0{,}95}\left(714 \cdot \frac{1}{0{,}89} \cdot 9 + 430 \cdot \frac{1}{0{,}92} \cdot 30\right);$$

$$L_n = 1{,}1 \cdot 21560 \text{ л. с.-}сек = 1{,}1 \cdot 5{,}99 \text{ л. с.-}ч = 6{,}59 \text{ л. с.-}ч = 4{,}85 \text{ kWh}.$$

При грузе $Q = 3500$ *кг*, поднимаемом на высоту $H = 300$ *м*, получим полезную работу, производимую за один подъем, на основании выражения (242) равной:

$$L_u = \frac{3500 \cdot 300}{75 \cdot 3600} = 3{,}89 \text{ л.с-}ч,$$

или

$$L_u = \frac{3500 \cdot 300}{102 \cdot 3600} = 2{,}86 \text{ kWh}.$$

Та же работа на основании выражения (241) получается равной:

$$L_u = 0{,}001 \cdot 3500 \cdot 300 = 1050 \text{ } m.м.$$

Коэфициент полезного действия подъемной установки:

$$\eta_{lh} = \frac{3{,}89}{6{,}59} = \frac{2{,}86}{4{,}85} = 0{,}58.$$

Расход энергии на полезный тонно-гектометр поднимаемого груза:

$$l = 100 \cdot \frac{4{,}35}{1050} = 0{,}46 \text{ } kWh/m.\ гм.$$

Расход энергии на шахтную лошадиную силу составляет:

$$l_1 = \frac{4{,}85}{3{,}89} = 1{,}25 \text{ } kWh/\text{л.с.-}ч.$$

Расход энергии, теряемой в реостате за время $t_1$, согласно выражению (247) составляет:

$$L_{r1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{714}{0{,}95} \cdot 9 \cdot \frac{1}{3600}$$

$$L_{r1} = 0{,}90 \text{ л. с.-}ч = 0{,}67 \text{ } kWh.$$

Отношение энергии, теряемой в реостате, к полной энергии, потребляемой из сети (без учета энергии, расходуемой на маневры):

$$\eta_r = \frac{0{,}90}{5{,}99} = 0{,}15,$$

---

* Коэфициент полезного действия отнесен к мощности двигателя, включающей потери в реостате.

** Ориентировочная мощность подъемного двигателя в условиях примера 25, составляет 450 — 500 л. с. Значение к. п. д. при нормальной нагрузке двигателя указанной мощности (при скорости 375 — 500 *об/мин* и напряжении 3000 — 6000 *V*) может быть принято равным $\sim 0{,}93$.

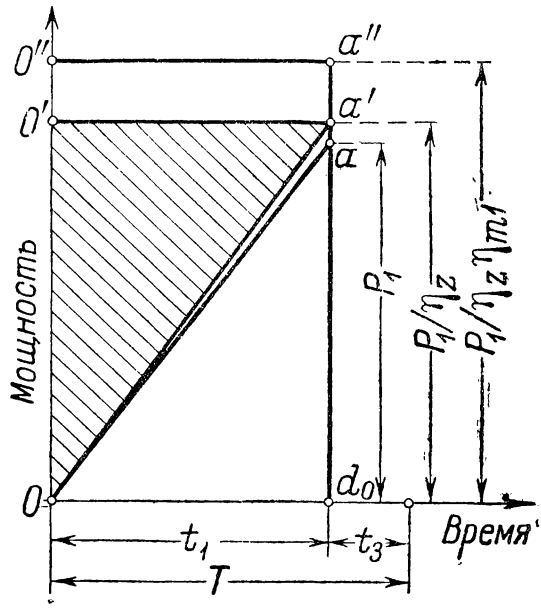
или

$$\eta_r = 15\%.$$

2. На фиг. 46 представлена диаграмма мощностей, характеризующая режим статически уравновешенной системы подъема, для случая треугольной тахограммы со свободным выбегом, т. е. при $t_2 = 0$ и $F_3 = 0$. (См. также фиг. 5). Обозначения на фиг. 46 соответствуют таковым на фиг. 44. Заштрихованная площадь выражает потери в реостате.

Расход энергии, потребляемой из сети за один подъем, получается из выражения (240), в котором необходимо принять $P_2 = 0$ и $P_3 = 0$. Таким образом имеем:

$$L_n = \lambda \quad P_1 \quad \frac{1}{\eta_{lz}} \quad \frac{1}{\eta_{m1}} \cdot t_1. \quad (249)$$




Фиг. 46. Двухпериодная диаграмма мощностей для статически уравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъемного двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 5.

Пример 26.

Основные данные те же, что и в примере 25, а именно: высота подъема $H = 300$ *м*; полный период подъема $T = 45$ *сек*; полезный за раз поднимаемый груз $Q = 3500$ *кг*.

Кроме того, дано: мощность на валу барабана $P_1 = 918$ л. с., $P_2 = 0$,

$P = 0$; $\eta_{m1} = 0{,}89$;

$t_1 = 35$ *сек*, $\lambda = 1{,}1$.

Тогда расход энергии на производство одного подъема согласно выражению (249) составляет:

$$L_n = 1{,}1 \quad 918 \quad \frac{1}{0{,}95} \quad \frac{1}{0{,}89} \cdot 35 \quad \frac{1}{3600}$$

$$L_n = 1{,}1 \quad 10{,}29 = 11{,}32 \text{ л. с.-}ч = 8{,}33 \ kWh.$$

Полезная работа одного подъема, согласно полученному в примере 25, равна:

$$L_u = 3{,}89 \text{ л. с.-}ч = 2{,}86 \ kWh = 1050 \ m.\ м.$$

Коэфициент полезного действия подъемной установки:

$$\eta_h = \frac{3{,}89}{11{,}32} = \frac{2{,}86}{8{,}33} = 0{,}34.$$

Расход энергии на полезный тонно-гектометр поднимаемого груза:

$$l = 100 \quad \frac{8{,}33}{1050} = 0{,}80 \ kWh/m.\ гм.$$

Расход энергии на шахтную лошадиную силу составляет:

$$l_1 = \frac{8{,}33}{3{,}89} = 2{,}14 \ kWh/\text{л. с.-}ч.$$

Расход энергии, теряемой в реостате за время $t_1$, согласно выражению (247) составляет:

$$L_{r1} = \frac{1}{2} \quad \frac{918}{0{,}95} \quad 35 \cdot \quad \frac{1}{3600} \cdot$$

$$L_{r1} = 4{,}5 \text{ л. с - } ч = 3{,}32 \ kWh.$$

Отношение энергии, теряемой в реостате, к полной энергии, потребляемой из сети (без учета энергии, расходуемой на маневры):

$$\eta_r = \frac{4{,}5}{10{,}29} = 0{,}44,$$

или

$$\eta_r = 44\%.$$

Сравнение результатов, полученных в примерах 25 и 26, как в отношении к. п. д. подъемной установки, так и потерь энергии в реостате, показывает, что управление подъемной машиной по трапецоидальной тахограмме является более экономичным, чем по треугольной тахограмме, при соблюдении, конечно, одинаковыми в обоих случаях остальных условий, как-то: высоты подъема, полезного груза, полного периода.

Таким образом, на основании приведенного сравнения, можно заключить, что *экономичность работы подъема* определенной системы *зависит от рационального выбора тахограммы* .

Несмотря на меньшую экономичность работы подъема при треугольной тахограмме, чем при трапецоидальной, на практике треугольную тахограмму приходится иногда применять при шахтах небольшой глубины, так как работа по трапецоидальной тахограмме потребовала бы большей продолжительности полного периода подъема, что послужило бы к сокращению производительности шахты. Обыкновенно в таких случаях применяется неуравновешенная система подъема, в связи с чем работа машины происходит согласно присущим этой системе диаграммам.

В период замедления, в случае надобности, может быть также применено торможение.

3. На фиг 47 цредставлена диаграмма мощностей для неуравновешенной системы подъема. (См. также фиг. 29).

В период замедления применено механическое торможение. Заштрихованная площадь $OO'aO$ выражает потери в реостате.

Полный расход энергии, потребляемой из сети за один подъем, применительно к фиг. 47 может быть определен из выражения:

$$L_n = \lambda \quad \frac{1}{\eta_{lz}} \left[ P_1 \quad \frac{1}{\eta_{m1}} \quad t_1 + \frac{1}{2} \ (P_2' + P_2'') \quad \frac{1}{\eta_{m2}} \cdot t_2 \right], \qquad (250)$$

где $\eta_{m1}$ и $\eta_{m2}$—значения к. п. д. двигателя соответственно в периоды $t_1$ и $t_2$.

---

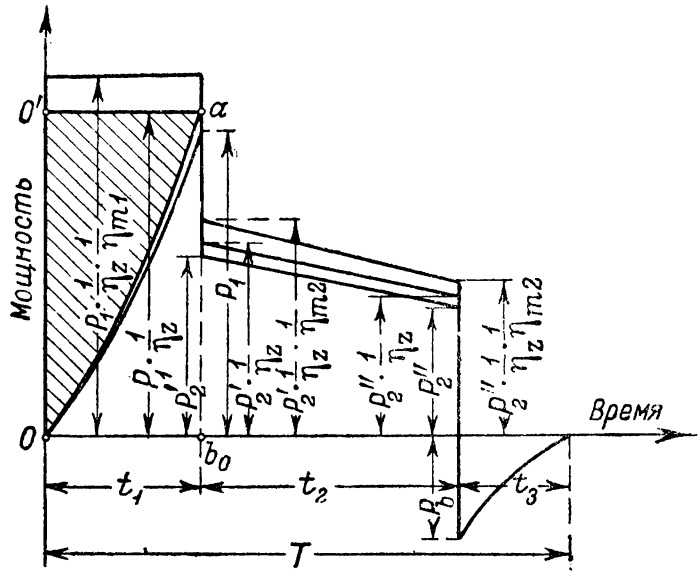
Вопрос о влиянии характера тахограммы на расход энергии при подъеме впервые в литературе рассмотрен автором в статье „О применении трехфазных асинхронных двигателей к рудничному подъему". (Вестник инженеров, № 2, 1925 г.).

Пример 27.

Неуравновешеннея система подъема. Основные данные те же, что в примерах 25 и 26, а именно: полезный за раз поднимаемый груз $Q=3500$ *кг*; высота подъема $H=300$ *м*; полный период подъема $T=45$ *сек*.

Мощности, отнесенные к валу барабана подъемной машины, применительно к фиг. 47 имеют следующие значения:

$$P_1=960 \text{ л с},\ P_2'=610 \text{ л.с},\ P_3''=248 \text{ л.с},\ P_b=-130 \text{ л.с},$$




Фиг. 47. Трехпериодная диаграмма мощностей для неуравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъемного двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 29, в предположении наличия механического торможения в период замедления $t_3$.

Соответственно периоды движения: $t_1=7{,}5$ *сек*, $t_2=30{,}25$ *сек*, $t_3=7{,}25$ *сек*; к.п.д. зубчатой передачи $\eta_{lz}=0{,}95$; к.п.д. двигателя: для периода $t_1$ примем $\eta_{m1}=0{,}86$; для периода $t_2-\eta_{m2}=0{,}91$;* коэфициент $\lambda=1{,}1$ (в предположении наличия маневров).

Полный расход энергии, потребляемой из сети за один подъем, на основании выражения (250) равен:

$$L_n=1{,}1\cdot\frac{1}{0{,}95}\left[960\ \frac{1}{0{,}86}\ 7{,}5+\frac{1}{2}(610+248)\ \frac{1}{0{,}91}\ 30{,}25\right];$$

$$L_n=1{,}1\cdot 22866 \text{ л.с-}сек=1{,}1\cdot 6{,}35 \text{ л.с-}ч=6{,}98 \text{ л.с-}ч=5{,}14 \text{ kWh}.$$

При грузе $Q=3500$ *кг* и высоте подъема $H=300$ *м* полезная работа, производимая за один подъем,

$$L_u=3{,}89 \text{ л.с-}ч=2{,}86\ kWh=1050\ т.м.$$

* При нормальной нагрузке двигателя и в предположении синхронного числа оборотов 375—500 в минуту $\eta_m\cong 0{,}93$.

Коэфициент полезного действия подъемной установки

$$\eta_k = \frac{3{,}89}{6{,}98} = \frac{2{,}86}{5{,}14} = 0{,}54.$$

Расход энергии на полезный тонно-гектометр поднимаемого груза

$$l = 100 \cdot \frac{5{,}14}{1050} = 0{,}5\ kWh/m.гм.$$

Расход энергии на шахтную лошадиную силу

$$l_1 = \frac{5{,}14}{3{,}89} = 1{,}32\ kWh/л.с\text{-}ч.$$

На основании результатов, полученных в примерах 25 и 27 относительно величины расхода энергии на производство подъема и к.п.д. подъ- установки при одних и тех же полезном грузе и высоте подъема, можно заключить, что подъем при уравновешенной системе оказывается экономичнее по сравнению с таковым при неуравновешенной системе. Объясняется это в данном случае, между прочим, тем обстоятельством, что уравновешенной системе (пример 25) подъем завершается в период медления без применения тормоза, тогда как при неуравновешенной системе (пример 27) таковой применяется. В связи с этим является необходимым соответственное увеличение потребляемой энергии в период ска на величину запасенной в движущихся частях подъемного устройства той части живой силы, которая поглощается тормозом в период замедления. Отсутствие торможения при неуравновешенной системе подъема, при наличии данных примера 27, повело бы как к недопустимому увеличению пускового ускорения и связанного с этим начального момента вращения двигателя, так и к соответственному возрастанию пиковой нагрузки в период пуска.

4. На фиг. 48 представлена диаграмма мощностей для подъема неуравновешенной системы применительно к режиму, характеризуемому изменением в период пуска $t_1$ скорости по закону прямой линии. Этот случай может иметь место при контакторном управлении, которое в сочетании с соответственно отрегулированными реле *времени* обусловливает автоматическое выполнение в течение периода $t_1$ прямолинейного закона изменения скорости; в период замедления $t_3$ предположен свободный выбег (см. также фиг. 32).

Мощность, потребляемая подъемным двигателем из сети, изменяется по тому же закону, что и развиваемое им усилие; в данном случае указанная мощность изменяется по кривой $ABCDD_0$, где часть $AB$ представляет *параболу*. Заштрихованная площадь выражает потери энергии в роторном реостате.

Расход энергии, потребляемой из сети за один подъем, применительно диаграмме мощностей на фиг. 48 определяется из выражения:

$$L_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\eta_z} \left[ \left( P_1' + P_1'' \right) \cdot \frac{1}{\eta_{m1}} \cdot t_1 + (P_2' + P_2'') \cdot \frac{1}{\eta_{m2}} \cdot t_2 \right] \qquad (251)$$

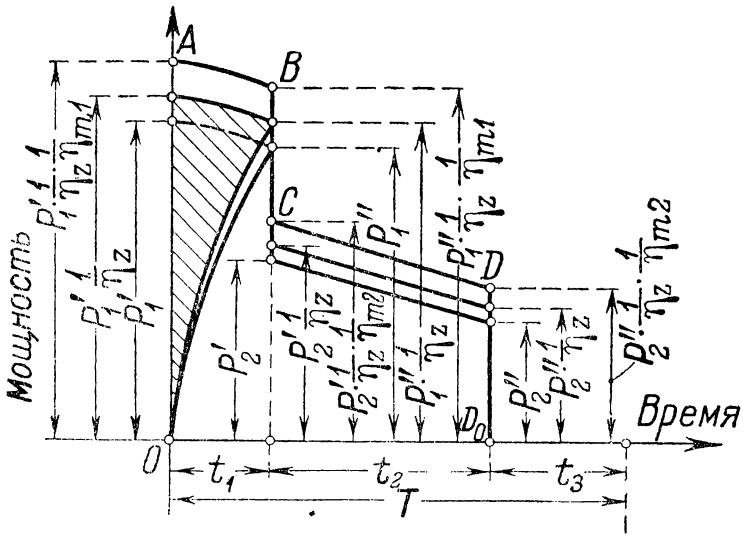
где $P_1'$ и $P_1''$ — условно отнесенные к полной скорости подъема мощности на валу барабана соответственно в начале и конце периода $t_1$, $\eta_{m1}$ — среднее значение к.п.д. двигателя в продолжение этого периода, $P_2'$ и $P_2''$ —

Теоретически.

указанные мощности соответственно в начале и конце периода $t_2$, $\eta_{m2}$—среднее значение к.п.д. двигателя в продолжение последнего периода; $\eta_z$—к.п.д. зубчатой передачи; $\lambda$—коэфициент, учитывающий расход энергии на маневры.

5. На фиг. 49 представлена диаграмма мощностей для режима, характеризуемого диаграммами на фиг. 33 применительно к неуравновешенной системе подъема, оборудованного *опрокидными сосудами.*

Предполагая на фиг. 33 усилие $F_4' \cong 0$ и наличие механического торможения в периоды $t_3$ и $t_4$, выражение для энергии, потребляемой из сети




Фиг. 48. Трехпериодная диаграмма мощностей для неуравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъемного двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 32.

за один подъем, применительно к диаграмме мощностей на фиг. 49 получим в следующем виде:

$$L_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\eta_z} \left[ (F_0' + F_0'') \cdot \frac{1}{\eta_{m0}} \cdot t_0 + (F_0'' + F_1'') \cdot \frac{1}{\eta_{m1}} \cdot (t_1 - t_0) + \right.$$

$$\left. + (F_2' + F_2'') \cdot \frac{1}{\eta_{m2}} \cdot t_2 \right] \qquad (252)$$

где $\eta_{m0}$, $\eta_{m1}$, $\eta_{m2}$—средние значения к.п.д. подъемного двигателя соответственно в течение периодов $t_0$, $(t_1 - t_0)$, $t_2$;* $\eta_z$—к.п.д. зубчатой передачи; $\lambda$—коэфициент, учитывающий расход энергии на производство сжатого воздуха для торможения.

6. На фиг. 50 представлена диаграмма потребляемых из сети мощностей для режима, характеризуемого диаграммами на фиг. 34, применительно к неуравновешенной системе подъема, оборудованного *опрокидными* сосудами.

Предполагая на фиг. 34 усилие $F_4' \cong 0$ и наличие механического торможения в периоды $t_3$ и $t_4$, выражение для энергии, потребляемой из сети

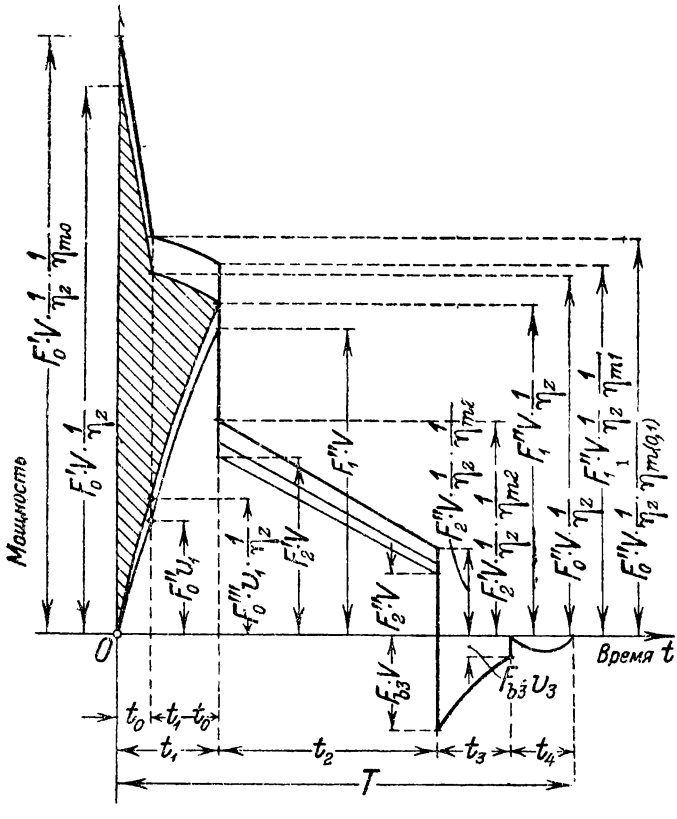
* На фиг. 49 знак $\eta_{m\,(0,1)}$ имеет в виду равенство к.п.д. двигателя $\eta_{m0} = \eta_{m1}$ соответственно в конце периода $t_0$ и в начале периода $(t_1 - t_0)$.

за один подъем, применительно к диаграмме мощностей на фиг. 50 получим в следующем виде:

$$L_n = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{V}{\eta_{lz}} \left[ (F_0' + F_0'') \cdot \frac{1}{\eta_{m0}} \cdot t_0 + (F_1' + F_1'') \cdot \frac{1}{\eta_{m1}} \cdot t_1 + \right.$$

$$\left. + (F_2' + F_2'') \cdot \frac{1}{\eta_{m2}} \cdot t_2 \right], \qquad (253)$$

где $\eta_{m0}$, $\eta_{m1}$, $\eta_{m2}$ — средние значения к.п.д. подъемного двигателя соответственно в течение периодов $t_0$, $t_1$, $t_2$. *)




Фиг. 49. Диаграмма мощностей для неуравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъема двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 33.

Следует отметить, что при режимах, характеризуемых диаграммами на фиг. 33 и 49, а также на фиг. 34 и 50, предположено автоматическое выполнение тахограмм в течение пусковых периодов $t_0$ и $t_1$ при помощи соответственно настроенных реле *времени*, в связи с чем получается соответственное изменение в указанные периоды движущих усилий (см. фиг. 33 и 34).

На диаграммах мощностей, изображенных на фиг. 49 и 50, заштрихованные площади определяют потери энергии в роторном реостате.

7. На фиг. 51 представлены диаграммы для следующих условий работы неуравновешенной системы подъема.

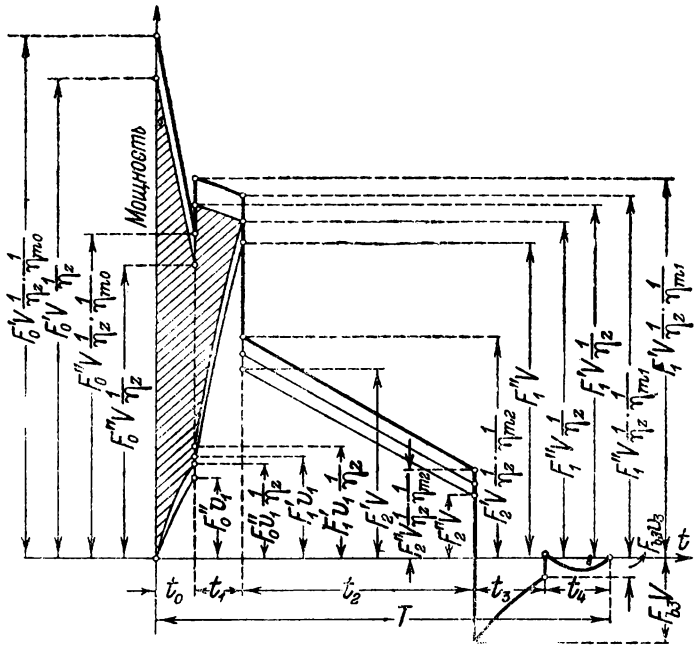
В период пуска $t_1$ усилие двигателя $F_1$ постоянно, в период замедления $t_3$ предположен свободный выбег, вследствие чего в указанные периоды изменение скорости происходит по закону *гиперболического синуса*.

Предположим, что необходимо произвести подъем со скоростью $V_m$ меньшей, чем нормальная скорость $V$. Так как скорость подъема должна быть меньше нормальной при достаточно большой статической нагрузке,

*) Ориентировочные подсчеты расхода энергии на производство подъема при различных системах подъемных установок и подъемных сосудов можно производить, пользуясь номограммами и соответственными формулами, предложенными проф. Г. М. Еланчиком в его труде „Рудничные подъемные установки", 1941 г.

осуществление подъема в данных условиях может быть достигнуто включением реостата в цепь ротора не только в период пуска $t_1$, но и в период полного хода $t_2$. Мощность, теряемая в реостате в конце периода пуска и измеряемая на диаграмме мощностей (фиг. 51) отрезком $B''B'$, будет равна $F_1(V - V_m)$, где $F_1$ — постоянная в период пуска сила двигателя.

Энергия, теряемая в реостате в период пуска $t_1$, изображена в виде заштрихованной площади $OA'B'B''O$; энергия, потребляемая за тот же период двигателем из сети, представится площадью $OABb_0O$.




Фиг. 50. Пятипериодная диаграмма мощностей для неуравновешенной системы подъема, характеризующая режим работы асинхронного подъемного двигателя применительно к диаграммам, представленным на фиг. 34.

Мощность, теряемая в реостате в начале периода полного хода $t_2$ и измеряемая отрезком $b''b'$, равна $F'_2(V - V_m)$, гда $F'_2$ — сила двигателя в указанный момент времени.

Мощность, поглощаемая реостатом в конце периода $t_2$ и измеряемая отрезком $d''d'$, равна $F''_2(V - V_m)$, где $F''_2$ — сила двигателя в последний момент времени.

Энергия, теряемая в реостате в течение периода $t_2$, представляется заштрихованной площадью $b''b'd'd''b''$ Энергия, погребляемая двигателем из сети за время $t_2$, выразится в виде площади $b_0bdd_0b_0$.

$\eta_m$ — среднее значение к. п. д. подъемного двигателя.

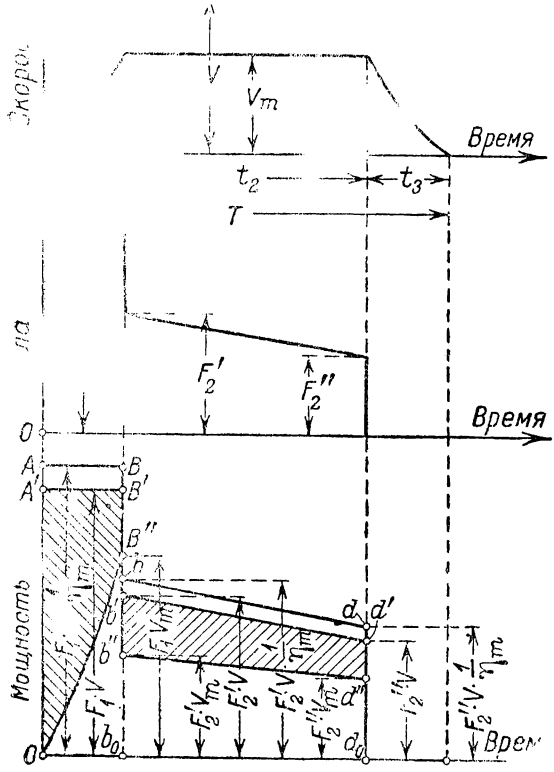
Завершение подъема в период замедления происходит при выключенном двигателе, без применения тормоза.

Режим, характеризуемый диаграммами, изображенными на фиг. 51, может иметь место, например, в случае подъема людей в одной клети в то время, когда другая, опускающаяся клеть, не нагружена.

По окончании периода $t_1$, с целью перехода к периоду $t_2$, необходимо сопротивление включенного реостата соответственным образом увеличить по сравнению с сопротивлением, имеющем место в конце периода $t_1$;

оизводство указанной операции обусловлено необходимостью снижения развиваемого двигателем усилия от значения $F_1$ до величины $F_2'$ при скольжении, соответствующем уменьшенной скорости $V_m$.

Что касается управления реостатом в период $t_2$, то для соблюдения ства скорости $V_m$ представилось бы необходимым при уменьшаюемся статическом моменте увеличивать сопротивление, введенное в цепь ротора, т. е. вводить реостат. В данном случае меняющиеся показания амперметра представляли бы менее удобный критерий для получения необходимого изменения момента, развиваемого двигателем, чем при сохранении постоянства указанного момента. Правда, взамен этого может оказать услугу тахограф, стрелка которого должна показывать в течение времени $t_2$ приблизительно постоянную скорость $V_m$. Если бы реостат оставить в продолжение всего периода $t_2$ в том же положении, в каком он находился в начале этого периода, то скорость непрерывно возрастала бы, и таким образом не было бы соблюдено условие равномерного хода.




Фиг. 51. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема при пониженной ости, развиваемой асинхронным подъемным двигателем в период $t_2$.

Вообще в рассматриваемом случае управление подъемной машиной оказалось бы более сложным, чем для случая статически уравновешенной системы подъема.

Здесь следует отметить, что, несмотря на увеличение сопротивления роторной цепи в период полного хода, потери в последней при этом уменьшаются. Объясняется это тем обстоятельством, что потери (на джоулево тепло) обусловлены величиной $J^2r$, где роторного тока, зависящая от нагрузки, —сопротивление роторни. Так как в случае уменьшение силы тока происходит в ой степени, сопротивление $r$ возрастает в первой степени, конечном результате получается уменьшение потерь в цепи ротора.

Аналогичный случай, только лишь с возрастающей статической нагрузкой, имел бы место для системы с тяжелым хвостовым канатом. Для соблюдения постоянства уменьшенной скорости $V_m$ пришлось бы при этом течение периода $t_2$ уменьшать сопротивление реостата, включенного в цепь ротора.

Предположим, что при статически *уравновешенной* системе подъема необходимо произвести *одновременный* подъем и спуск людей при *одинаковой* нагрузке обеих клетей со скоростью $V_m < V$, где $V$ — нормальная (максимальная) скорость подъема (фиг. 52).

В рассматриваемом случае двигателю пришлось бы преодолевать положительную статическую нагрузку $F_s$, обусловленную лишь вредными сопротивлениями;* требуемый при этом от двигателя момент вращения оказался бы значительно меньше развиваемого им нормального момента. При наличии указанных условий, как известно, не представляется возможным достигнуть необходимого уменьшения скорости двигателя путем применения реостата обычных размеров **

Для того, чтобы в рассматриваемом случае оказалось возможным при помощи реостата снизить скорость подъема до значения $V_m$, необходимо произвести соответственное *увеличение статической нагрузки* путем применения *механического тормоза*, развивающего силу $F_b$, *** дающую в совокупности с нагрузкой $F_s$, величину статической нагрузки $(F+F_b)$, при которой применение реостата произвело бы необходимое уменьшение скорости. Включение при этом в цепь ротора реостата является необходимым, так как последний придает в данном случае характеристике двигателя определенную мягкость, обусловливающую необходимое уменьшение его скорости при увеличении статической нагрузки до указанного значения $(F_s+F_b)$; увеличение же нагрузки двигателя путем применения механического тормоза без включения реостата не произвело бы заметного уменьшения скорости подъема, так как двигатель при этом работал бы на шунтовой характеристике. ****

Согласно представленному на фиг. 52, применение механического тормоза, развивающего постоянную силу $F_b$, имеет место в продолжение времени $T=t_1+t_2+t_3$; что касается периода замедления $t_3$, то в указанный период двигатель предполагается выключенным, тормоз же продолжает развивать усилие $F_b$, так как при отсутствии действия тормоза и при наличии малой статической нагрузки $F_s$, получилась бы незначительная величина замедления, обусловливающая соответственное увеличение периода $t_3$; ***** последнее обстоятельство, в свою очередь, при определенном значении полного периода подъема $T$, послужило бы к соответственному увеличению или пускового ускорения, а следовательно, и усилия двигателя $F_1$, что не всегда является допустимым, или к увеличе

---

* Нагрузка $F_s$ предполагается постоянной. В действительности вредные сопротивления в продолжение одного цикла подъема не остаются постоянными, ввиду переменных значений сопротивлений воздуха, являющихся составной частью указанных вредных сопротивлений, имеющих место при производстве подъема.

** При наличии незначительного момента $M_0$ (фиг. 42) включение *пусковой* части роторного реостата, обусловливающей величину $r_6$ общего сопротивления вторичной цепи двигателя, не произведет заметного изменения его скорости; только при включении всего реостата, при котором общее сопротивление цепи ротора оказалось бы равным $r_1$, получилось бы уменьшение скорости двигателя на $\sim 30\%$.

*** На фиг. 52 в отличие от принятой обычно системы графической интерпретации силы $F_b$, развиваемая тормозом, отложена от оси абсцисс не вниз, а в том же направлении, как и положительная статическая нагрузка $F_s$, т. е. вверх. Отступление от указанной системы в данном случае обусловлено желанием придать большую наглядность графическому изображению способа увеличения статической нагрузки при помощи действия механического тормоза. Что касается периода $t_3$, то для него тормозное усилие $F_b$ следовало бы отложить от оси абсцисс вниз, потому что применение тормоза при этом не имеет целью необходимое увеличение недостающей статической нагрузки, обусловливающее возможность работы двигателя с уменьшенной скоростью, так как двигатель в указанный период не работает; в последнем случае тормоз играет роль поглотителя избытка живой силы, запасенной в период пуска; для простоты в период $t_3$ тормозное усилие на фиг. 52 отложено в том же направлении, как и для периодов $t_1$ и $t_2$.

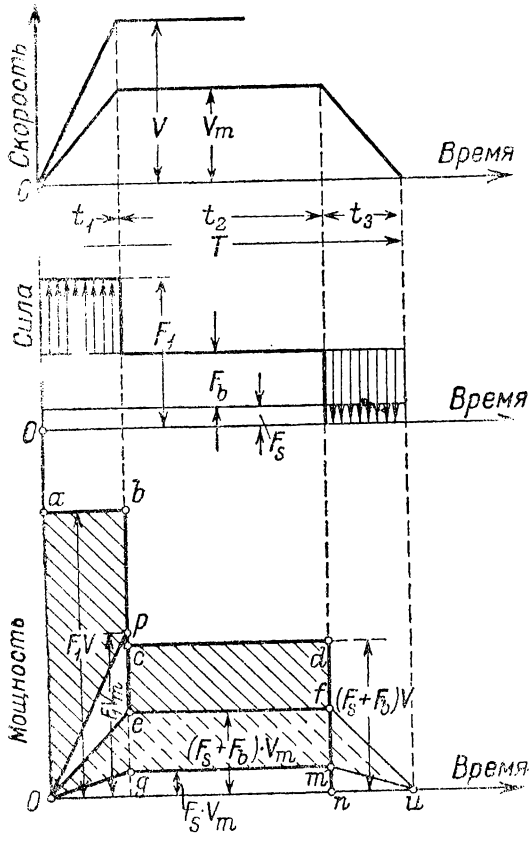
Увеличение силы нажатия тормоза повлекло бы за собой лишь соответственное увеличение момента вращения двигателя без заметного уменьшения его скорости; при этом, в случае достижения тормозным усилием величины большей, чем это соответствует опрокидному (максимальному) моменту двигателя, последний остановится.

***** Конечно, в период $t_3$ тормозное усилие, обусловливающее величину замедления, может быть и отличным от значения $F_b$; в данном случае при поддержании тормозного усилия постоянным в течение всего периода подъема $T$ упрощается управление подъемной машиной.

нию скорости полного хода, что тоже не всегда возможно осуществить, имея в виду определенные нормы людской скорости.

Управление подъемной машиной применительно к диаграммам на фиг. 52 пришлось бы производить следующим образом.

Перед началом пуска в ход машины необходимо было бы привести в действие механический тормоз, который развивал бы силу $F_b$; затем включается на работу в определенном направлении подъемный двигатель с включенным реостатом, сопротивление которого необходимо уменьшать (реостат выводить) с таким расчетом, чтобы в продолжение периода $t_1$ развиваемое двигателем усилие $F_1$ оставалось постоянным; критерием этого могут служить соответственные показания амперметра. С целью получения в конце периода $t_1$ уменьшенной скорости $V_m < V$, соответственную часть реостата необходимо оставить при этом включенной.




Фиг. 52. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема режима одновременного подъема и спуска людей при пониженной скорости, развиваемой асинхронным подъемным двигателем в период $t_2$.

Затем при переходе к периоду $t_2$ сопротивление включенного реостата должно быть соответственным образом увеличено по сравнению с сопротивлением, которое имеет место в конце периода $t_1$; производство указанной операции обусловленно необходимостью снижения развиваемого двигателем усилия от значения $F_1$ до величины $(F_s + F_b)$ при скольжении, соответствующем уменьшенной скорости $V_m$. В последнем положении реостат должен оставаться в продолжение всего периода $t_2$, после чего согласно диаграммам на фиг. 52 двигатель выключается.

На диаграмме усилий области действия сил инерции заштрихованы соответственно направленными стрелками.

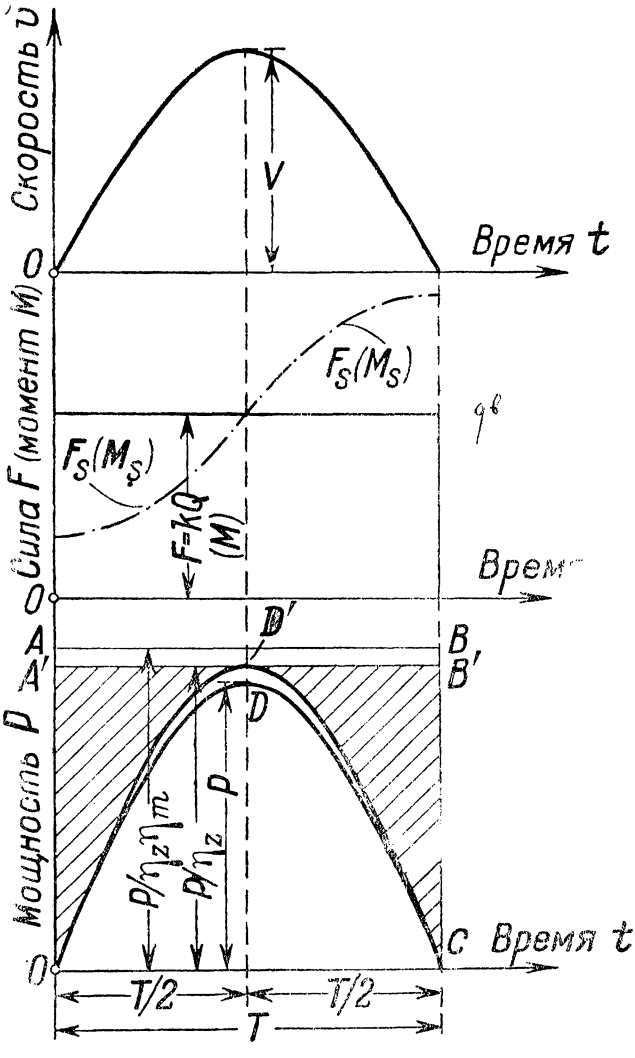
На диаграмме мощностей площадь *OabcdnO* представляет энергию, потребляемую двигателем, без учета потерь, характеризуемых его к. п. д. Для получения полной энергии, потребляемой двигателем из сети, необходимо ординаты ука анной кривой умножить на величину $\frac{1}{\eta_m}$, где $\eta_m$ п. д. двигателя. Площади *OabpO* и *cdfec*, заштрихованные сплошными линиями, выражают потери энергии в реостате; площадь *OefumgO*, заштрихованная прерывистыми линиями, представляет потери энергии, обусловленные применением механического тормоза.

Площадь *OpeO*, равная площади *funf*, определяет живую силу, запасенную в период пуска в движущихся частях подъемного устройства.

Значения отдельных мощностей, выраженных в зависимости от соответственных усилий и скоростей, представлены на нижней диаграмме фиг. 52.

В случае, если бы машинист, не будучи осведомлен о предстоящем одновременном подъеме и спуске людей, обусловливающем наличие незначительной статической нагрузки $F_s$, не включил предварительно механического тормоза, развивающего усилия $F_b$, то последнюю операцию он должен будет произвести, по крайней мере, по достижении скоростью подъема значения $V_m$, указываемого стрелкой тахометра; в противном случае скорость могла бы возрасти примерно до полной величины $V$, в результате чего требуемый режим не был бы соблюден.

9. Рассмотрим применение асинхронного двигателя к *гармоническому* подъему *) последний может быть рассматриваем, как частный случай подъема с тяжелым хвостовым канатом, у которого разность погонных весов хвостового и головного канатов обусловливает отсутствие периода полного хода $t_2$ при наличии периодов $t_1 = t_3 = \frac{T}{2}$, где $T$ — полный период подъема.




Фиг. 53. Диаграммы, характеризующие гармонический подъем, обслуживаемый асинхронным подъемным двигателем.

Принимая во внимание диаграмму моментов асинхронного двигателя (фиг. 42) и диаграммы, характеризующие гармонический подъем (фиг. 53), нетрудно видеть, что управление двигателем необходимо производить следующим образом.

В начале пуска в цепь ротора необходимо включить сопротивление, достаточное для получения необходимого момента вращения, кото-

*) О гармоническом подъеме см. акад. М. М. Федоров. — „Теория и расчет гармонического рудничного подъема" 1914, а также труды акад. А. П. Германа, относящиеся к шахтному подъему.

рый в течение всего периода подъема $T$ должен оставаться постоянным и равным $M$. При *металлическом* реостате момент вращения, развиваемый двигателем в начале пуска, т. е. при скольжении $s=1$, очевидно, должен иметь некоторое значение $M_1'>M_1$, для чего сопротивление цепи ротора необходимо увеличить путем введения в нее реостата до значения $r_6$ (фиг. 42); пусть этот режим работы двигателя характеризуется точкой $B$ кривой $BC\alpha$. Так как в первую половину периода подъема $\frac{T}{2}$ момент вращения, развиваемый двигателем, больше статического момента сопротивления $M_s$ (фиг. 53), то скорость будет возрастать. По мере увеличения скорости сопротивления цепи ротора необходимо уменьшать, постоянно выводя реостат. Предположим, что в точке $T$, лежащей на естественной характеристике, соответствующей собственному сопротивлению ротора $R_2$ (фиг. 42), реостат выключается совершенно. Если затем предоставить двигатель самому себе, то его момент вращения будет падать при увеличивающейся скорости (уменьшающемся скольжении) до тех пор, пока в точке $W$ не сравняется с статическим моментом сопротивления $M_s=M_1$ при наибольшей скорости $V$. Этот режим работы двигателя, характеризующийся равенством моментов вращения и статического сопротивления, наступает по истечении времени $\frac{T}{2}$ от начала подъема, после чего статический момент начинает возрастать, получая во вторую половину подъема значения, превышающие постоянный момент $M$. Ввиду этого момент, развиваемый двигателем, следуя за изменениями статического момента, тоже будет увеличиваться, двигаясь по кривой $NWT$ от точки $W$ вверх до тех пор, пока не достигнет значения $M_1'$, определяемого точкой $T$ (фиг. 42); после этого сопротивление цепи ротора должно быть увеличено введением реостата до величины $r_{10}$, каковой режим работы двигателя будет характеризоваться точкой $L$; так как момент вращения $M_1''$ при этом будет меньше статического момента сопротивления, то скорость станет уменьшаться (скольжение увеличиваться), а момент, изменяясь по кривой $LK$, будет возрастать, пока не достигнет величины $M_1'$, каковой режим характеризуется точкой $K$ кривой $LK$. Вводя постепенно реостат в цепь ротора, т. е. увеличивая ее сопротивление по мере увеличения скольжения таким образом, чтобы момент вращения изменялся лишь между значениями $M_1'$ и $M_1''$, мы дойдем до сопротивления $r_6$, при котором получим значение момента $M_1'$, соответствующее скольжению $s=1$, т. е. остановке двигателя. Таким образом, в первую половину подъема момент вращения двигателя, при уменьшающемся скольжении (увеличивающейся скорости), будет изменяться по кривой $BCDEFGHJKLTW$, во вторую же половину, при увеличивающемся скольжении (уменьшающейся скорости),— по кривой $WTLKJHGFEDCB$, варьируя между значениями $M_1'$ и $M_1''$ около величины $M=M_1$.

Ввиду невозможности при металлическом реостате осуществить в точности постоянство момента вращения, изменение скорости подъема не будет строго синусоидальным, а будет варьировать около кривой скорости, изображенной на фиг. 53, как около некоторого среднего значения. Строгое постоянство момента вращения, обусловливающее точное соблюдение синусоидальной тахограммы, может быть достигнуто применением *жидкостного* реостата, который можно рассматривать как бы содержащим бесконечно большое число ступеней сопротивления.

---

* На фиг. 42 момент $M=M_1$. На фиг. 53—$M$ означает постоянный, развиваемый двигателем момент, отнесенный к валу барабана; постоянная сила $F=kQ$, приложена к окружности барабана; ($k$—коэфициент, учитывающий вредные сопротивления; $Q$—полезный за раз поднимаемый груз).

Из вышеизложенного видно, что *для осуществления гармонического подъема двигатель должен в течение всего периода подъема* работать под реостатом,* который должен быть введен полностью в начале и конце подъема при *постепенном* выключении его в первую и включении во вторую половины подъема.

На нижней диаграмме фиг. 53 величина $P$ представляет максимальную мощность, а кривая $ODC$ выражает закон изменения мощности на валу барабана подъемной машины; $\frac{P}{\eta_z}$, где $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи, определяет максимальную мощность, а кривая $OD'C$ выражает закон изменения мощности на валу двигателя; $\frac{P}{\eta_z \eta_m}$, где $\eta_m$ — к. п. д. двигателя, представляет постоянную мощность, потребляемую двигателем из сети в продолжение полного периода подъема $T$.

Площадь $ODCO$ представляет энергию, расходуемую на валу барабана, площадь $OD'CO$ — энергию, развиваемую двигателем на его валу; заштрихованные площади $OD'A'O$ и $CD'B'C$ — потери энергии в реостате. Площадь $OABCO$ выражает энергию, потребляемую из сети на период $T$.

Аналитически последняя энергия может быть выражена следующим образом:

$$L = P \cdot \frac{1}{\eta_z} \cdot \frac{1}{\eta_m} \cdot T;$$

или, принимая во внимание, что $P = kQ \cdot V$, окончательно получаем энергию, потребляемую из сети:

$$L_n = kQ \cdot V \cdot T \cdot \frac{1}{\eta_z} \cdot \frac{1}{\eta_m}. \qquad (254)$$

Энергия $L_r$, теряемая в реостате, может быть определена как разность площадей $OA'B'CO$ и $OD'CO$; первая из этих площадей представляет работу $L_1 = P \frac{1}{\eta_z} T = kQ \cdot V \, T \cdot \frac{1}{\eta_z}$ (фиг. 53); вторая площадь представляет работу $L_2$, затрачиваемую на производство подъема груза $Q$ на высоту $H$, с учетом потерь, характеризуемых коэфициентом $k$, и в зубчатой передаче, т. е. $L_2 = kQ \cdot H \cdot \frac{1}{\eta_z}$.

Таким образом окончательно получаем:

$$L_r = kQ(VT - H) \cdot \frac{1}{\eta_z}. \qquad (255)$$

## В. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ

### 1. Торможение противотоком***

Рассмотрим спуск груза при уравновешенной системе подъема с нейно-равновесными канатами.

В период пуска $t_1$ предположим для простоты, что двигатель выключен и торможение отсутствует (фиг. 54).

Для выяснения сущности торможения противотоком в период $t_2$ будем рассуждать следующим образом.

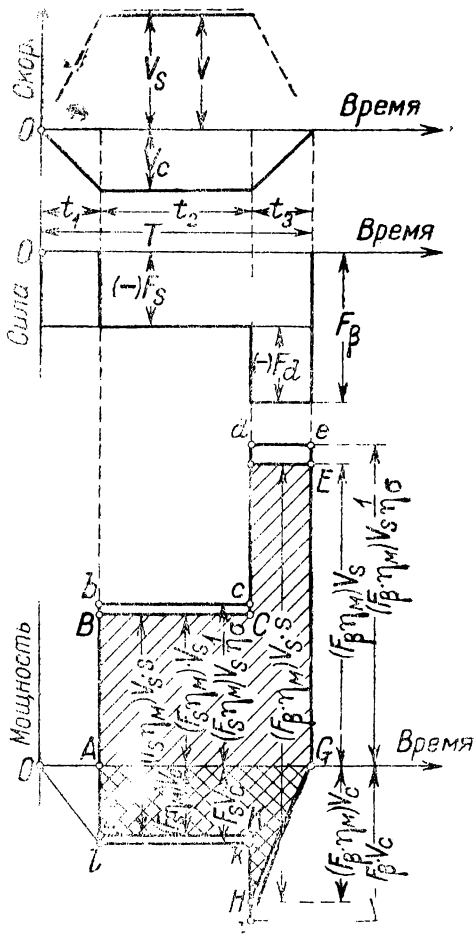
---

* За исключением незначительного промежутка времени, соответствующего значениям скоростей, граничащим с максимальной скоростью $V$, при металлическом реостате.

** Правильный характер работы асинхронного двигателя в применении к гармоническому подъему впервые в литературе установлен автором в статье „О применении трехфазных асинхронных двигателей к рудничному подъему". (Вестник инженеров, 1925, № 2).

*** По терминологии проф. В. К. Попова — торможение „противовключением".

Предположим, что производится *подъем* груза, обусловливающего постоянную положительную статическую нагрузку $F_s$. Если бы мы пожелали уменьшить скорость подъема по сравнению с полной скоростью, как известно, следовало бы ввести в цепь ротора двигателя реостат, сопротивление которого должно быть тем больше, чем меньшую скорость подъема мы желаем получить. Если предположить, что указанная нагрузка $F_s$ соответствует моменту $M_s$ на фиг. 42, то при сопротивлении реостата, составляющем, например, вместе с собственным сопротивлением $R_2$ обмотки ротора величину $r_6$, получится режим, характеризуемый точкой $a$, которой соответствует некоторое скольжение $s_2$. При дальнейшем увеличении сопротивления реостата, вводимого в цепь ротора, будет получаться соответственное увеличение скольжения, а следовательно, уменьшение скорости подъема, и при некотором сопротивлении реостата, обусловливающем, например, общее сопротивление $r_{4-3}$ вторичной цепи двигателя, получится его скольжение $s=1$, соответствующее нулевой скорости подъема, т. е. состоянию покоя. Теперь посмотрим, что произойдет, если после остановки двигателя будем производить дальнейшее увеличение сопротивления роторного реостата, при сохранении значения статического момента сопротивления равным $M_s$. Предположим, что мы увеличим введенное сопротивление указанного реостата до величины, при которой общее сопротивление вторичной цепи окажется равным $r_3$; последнему значению сопротивления при скольжении $s=1$ будет соответствовать момент вращения двигателя, характеризуемый величиной $AZ$ (фиг. 42), которая меньше значения $M_s$ статического момента сопротивления. Ввиду получения указанной разности моментов, двигатель должен придти в движение в направлении, обусловленном действием большего момента, каковым в данном случае является момент $M_s$, производимый нагрузкой $F_s$, следовательно, двигатель получит вращение в сторону, противоположную той, в какую он вращался до остановки при подъеме груза, результатом чего является *опускание* груза;** при этом ротор двигателя будет вращаться




Фиг. 54. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема для режима спуска груза, осуществляемого асинхронным подъемным двигателем с применением электрического торможения противотоком в периоды $t_2$ и $t_3$.

С учетом вредных сопротивлений, определяемых коэфициентом $k>1$.

Необходимо заметить, что так как при производстве *подъема* статическая нагрузка больше поднимаемого полезного груза на величину вредных сопротивлений, при *спуске* же статическая нагрузка меньше полезного груза на величину указанных сопро-

в направлении, противоположном направлению вращающегося магнитного поля. Скорость вращения двигателя в указанном направлении, а следовательно, и скорость опускания груза будет расти, однако, лишь до тех пор, пока момент вращения двигателя, возрастая по кривой $ImZ$, не сравняется с статическим моментом сопротивления $M_s$, каковой режим характеризуется точкой $\gamma$ при скольжении $s = 1{,}5$,* соответствующем скорости опускания груза, равной приблизительно половине полной скорости подъема. Если желательно было бы получить скорость опускающегося груза, равную полной скорости подъема, то необходимо было бы увеличить вводимое в цепь ротора сопротивление реостата до значения, при котором общее сопротивление вторичной цепи получится достаточным для создания момента вращения двигателя, равного статическому моменту сопротивления $M_s$ при скольжении $s \cong 2$. **

Таким образом, на основании вышеизложенного, можем заключить, что увеличение вводимого в цепь ротора двигателя сопротивления реостата выше того значения, при котором получается останов двигателя, меняет направление его вращения, в связи с чем подъем груза переходит в спуск, причем скорость опускания увеличивается с увеличением указанного сопротивления реостата, и наоборот. Необходимо при этом заметить, что так как при рассмотренном выше переходе от подъема груза к его спуску направление вращающегося магнитного поля не изменилось, ротор же двигателя под влиянием опускающегося груза изменил направление своего вращения, то вследствие задерживающего действия указанного поля, стремящегося увлекать ротор в своем направлении, будет иметь место явление *электрического* торможения, известного под названием торможения *противотоком*.

Следует отметить, что осуществление режима противотока в данном случае достигнуто без воздействия на вращающееся магнитное поле двигателя, а лишь путем увеличения сопротивления роторной цепи, обусловливающего соответственное уменьшение момента вращения двигателя. Как известно, режим противотока может быть получен также посредством изменения направления вращения магнитного поля двигателя, осуществляемого переключением двух фаз статора, при неизменном направлении вращения ротора.

При этом необходимо помнить, что осуществление режима противотока, независимо от способа его получения, обусловлено соблюдением основного принципа, согласно которому магнитное поле двигателя и его ротор должны вращаться в противоположных направлениях.

Полная мощность, теряемая во вторичной цепи двигателя (в цепи ротора) на нагревание, так называемая мощность скольжения, в продолжение периода $t_2$ определяется из выражения:

$$P_{\text{п}(2)} = (F_s \eta_м)\ V_s \cdot s, \qquad (256)$$

где $F_s$ — сила, равная отрицательной статической нагрузке; $\eta_м = \eta_{мех} \cdot \eta_z$ — к. п. д. учитывающий механические потери в двигателе, *** а также потери в зубчатой передаче; $V_s$ — скорость подъема, соответствующая синхронной скорости двигателя (фиг. 54); $s > 1$ — скольжение.

---

тивлений, в действительности статический момент сопротивления при подъеме некоторого полезного груза окажется несколько больше такового при спуске того же груза; в данном случае мы для простоты предположили статические моменты при спуске и при подъеме одинаковыми, равными $M_s$, что собственно не меняет сущности рассматриваемого явления.

* См. верхнюю шкалу на фиг. 42.

$s < 2$; при скольжении $s = 2$ скорость спуска будет равна скорости ма, соответствующей синхронной скорости двигателя.

*** Механические потери в двигателе составляют $\sim 11\frac{1}{2}\%$ мощности последнего.

Передаваемая ротору мощность вращающегося магнитного поля, равмощности, подводимой из сети к статору, за исключением потерь последнем:

$$P_{1(2)} = (F_s \eta_м) \cdot V_s. \tag{257}$$

Так как при $s > 1$ мощность $P_{II(2)}$ $P_{1(2)}$ разность указанных мощтей

$$P_{s(2)} = P_{II(2)} - P_{1(2)} = (F_s \eta_м) \cdot V_s \cdot (s - 1), \tag{258}$$

ставляющая часть мощности, идущей на нагревание цепи ротора, очедно, не может получаться из сети, питающей статор. Принимая во внимание, что скорость опускающегося груза

$$V_c = V_s \quad (s - 1), \tag{259}$$

ражение (258) можем представить в следующем виде:

$$P_{s(2)} = (F_s \eta_м) \cdot V_c. \tag{260}$$

Имея в виду, что последнее выражение представляет собой ни что как *механическую* мощность, обусловленную величиной $F_s$ статичеснагрузки, приведенной к ротору мотора, можем заключить, что избымощности, идущей на нагревание цепи ротора, сверх мощности, теряв указанной цепи при скольжении $s = 1$, покрывается за счет опусющегося груза.

Мощность $P_{м(2)}$, сообщаемая системе опускающимся грузом, больше ощности $P_{s(2)}$, идущей на нагревание цепи ротора, на величину потерь, тываемых коэфициентом $\eta_м$, т. е.

$$P_{м(2)} = P_{s(2)} \cdot \frac{1}{\eta_м} = F_s \quad V_c. \tag{261}$$

мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_{с} \quad = P_{1(2)} \quad \frac{1}{} \tag{262}$$

$\eta_з$ п. д. статора

На 54 мощности, потребляемые из сети, отложены от оси цисерх, мощности же, сообщаемые системе опускающимся грузом, ложены от указанной оси вниз.

Перейдем к периоду замедления $t_3$. В указанный период, кроме отрильной статической нагрузки $F_s$, двигателю приходится компенсироще динамическую нагрузку $F_d$ (фиг. 54), обусловленную инерцией движущихся частей подъемного устройства; таким образом двигадолжен развивать некоторый момент $M_\beta > M_s$ (фиг. 42). Для того бы, например, при скольжении двигателя $s = 1{,}5$, соответствующем *началу* периода замедления, получить требуемое увеличение момента щения до значения $M_\beta$, необходимо произвести *уменьшение* сопротивлевторичной цепи до некоторого значения $r_5$, при котором получается казанный момент; последний режим характеризуется точкой $\delta$. Затем, лью уменьшения скольжения двигателя, обусловливающего уменьше-

---

Коэфициент $\eta_\sigma$ может ыть определен на основании предположения, что потери статоре вигателя составля мерно половину всех потерь последнего.

ние скорости спуска, необходимо производить дальнейшее уменьшение сопротивления цепи ротора путем выведения реостата таким образом, чтобы момент, развиваемый двигателем, оставался все время равным $M_\beta$ *; указанную операцию необходимо производить до тех пор, пока при некотором сопротивлении $r_{6-5}$ вторичной цепи не получится скольжение $s=1$, соответствующее остановке двигателя, каковой режим характеризуется точкой $r_i$; после этого двигатель должен быть выключен, ибо в противном случае при развиваемом им моменте $M_\beta > M_s$ он начал бы вращаться в противоположном направлении, производя подъем груза.

Определим значения соответственных мощностей, имеющих место в *начале* периода $t_\beta$.

Полная мощность, теряемая во вторичной цепи двигателя на нагревание, определяется из выражения:

$$P_{\text{II}(3)} = (F_\beta \eta_м) \quad V_s \quad s, \tag{263}$$

где $F_\beta = F_s + F_d$ (фиг. 54).

Передаваемая ротору мощность вращающегося магнитного поля

$$P_{\text{I}(3)} = (F_\beta \eta_м) \quad V_s. \tag{264}$$

Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_{\sigma(3)} = P_{\text{I}(3)} \quad \frac{1}{} \tag{265}$$

где $\eta_\sigma$ — к. п. д. статора.

Мощность, теряемая в цепи ротора на нагревание за счет ущегося груза,

$$P_{s(3)} = (F_\beta \eta_м) \cdot V_c. \tag{266}$$

Мощность, сообщаемая системе опускающимся грузом:

$$P_{м(3)} = P_{s(3)} \quad \frac{1}{\eta_\beta} = F_\beta \quad V_c, \tag{267}$$

где $\eta_м$ — к. п. д., учитывающий механические потери двигателя, а также потери в зубчатой передаче. Так как $F_\beta \quad F_s$, то

$$P_{\text{II}(3)} \quad P_{\text{II}(2)}, \quad P_{\text{I}(3)} \quad P_{\text{I}(2)}, \quad P_{s(3)} \quad P_{s(2)}, \quad P_{м(3)} \quad P_{м(2)}.$$

В *конце* периода $t_3$ двигатель достигает скольжения $s=1$; следовательно, мощность, теряемая во вторичной цепи, согласно выражению (263):

$$P'_{\text{II}(3)} = (F_\beta \eta_м) \quad V_s = P_{\text{I}(3)}. \tag{264}$$

Мощность, потребляемая из сети в указанный момент времени,

$$P_{\sigma(3)} = P_{\text{I}(3)} \quad \frac{1}{\eta_\sigma} \tag{265}$$

Что касается мощности, теряемой на нагревание в цепи ротора за счет опускающегося груза, то таковая в конце периода $t_3$ при нулевой

* Критерием соблюдения постоянства момента $M_\beta$ могут служить соответственные показания амперметра.

скорости получается равной нулю. Равным образом равна нулю мощность, сообщаемая системе опускающимся грузом.

На фиг. 54 указанные мощности для периода $t_3$ отложены соответственно вверх и вниз от оси времен.

Площадь *ABCDEGHKLA* выражает энергию, теряемую на нагревание вторичной цепи двигателя, т. е. собственно обмотки ротора и реостата, время $t_2+t_3$; часть этой энергии, измеряемая площадью *ABCDEGA*, расположенной над осью абсцисс, потребляется из сети, часть же указанной энергии, определяемая площадью *AGHKLA*, расположенной под осью абсцисс, получается за счет работы опускающегося груза. Полная энергия, потребляемая из сети за время $t_2+t_3$, определяется площадью *AbcdeGA*, причем площади *BCcbB* и *DEedD* выражают энергию, теряемую в цепи статора. Полная энергия, сообщаемая системе опускающимся грузом за указанное время, характеризуется площадью *AlkhGA*, причем площади *LKklL* и *HhGH* представляют механические потери в двигателе, а также в зубчатой передаче.

На основании вышесказанного, в связи с рассмотрением диаграммы мощностей на фиг. 54, можно заключить, что *мощность*, потребляемая из сети, при данной синхронной скорости определяется лишь величиной отрицательной статической нагрузки и совершенно не зависит от скорости спуска; последняя, однако, влияет на величину расходуемой за счет сети *энергии*, которая окажется тем больше, чем больше продолжительность спуска, т. е. чем меньше его скорость, и наоборот. Таким образом с точки зрения потребления энергии из сети более выгодной является большая скорость спуска. Необходимо, однако, иметь в виду, что увеличение скорости спуска увеличивает тепловые потери в цепи ротора, что влечет за собой необходимость увеличения размеров реостата, которые при этом получаются тем большими, чем больше скорость спуска. На практике скорость спуска при торможении противотоком принимается равной 0,5—0,75 от полной скорости подъема.

В заключение рассмотрения торможения противотоком укажем на получаемую при этом расчетную *мощность двигателя*. Указанная мощность зависит лишь от момента вращения и синхронной скорости, но отнюдь не зависит от действительной скорости вращения двигателя, обусловленной сопротивлением его вторичной цепи. В самом деле, с изменением указанного сопротивления изменяется скольжение, а следовательно, и скорость двигателя, в связи с чем меняется электродвижущая сила ротора, а именно, с увеличением скольжения эта электродвижущая сила растет, и наоборот. Изменение указанной электродвижущей силы служит лишь причиной соответственного изменения падения напряжения в переменном сопротивлении роторной цепи — в реостате, но отнюдь не меняет при определенном моменте вращения силы тока в собственно роторной обмотке, ввиду чего сечение последней не должно меняться. Здесь только необходимо иметь в виду, что при значениях скольжении $s>1$ бует иметь место увеличение напряжения на роторных кольцах, * что может потребовать соответственного усиления изоляции роторной обмотки.

Отсутствие зависимости между электрической мощностью двигателя и его действительной скоростью может быть объяснено еще следующим образом. Мощность, подводимая к статору двигателя, на которую последний должен быть расчитан, обусловлена величиной произведения из

* Так, например, при скольжении $s\cong 2$, соответствующем скорости спуска, равной нормальной скорости подъема, напряжение на кольцах ротора увеличилось бы примерно вдвое по сравнению с таковым при неподвижном роторе включенного двигателя.

приложенного напряжения на силу тока, а так как указанное напряжение является практически величиной постоянной, то, следовательно, размеры статорной обмотки при данном напряжении зависят главным образом от силы тока, обусловленной величиной момента вращения. Равным образом сила роторного тока, как связанная определенной зависимостью с силой статорного тока, тоже обусловлена величиной данного момента вращения.

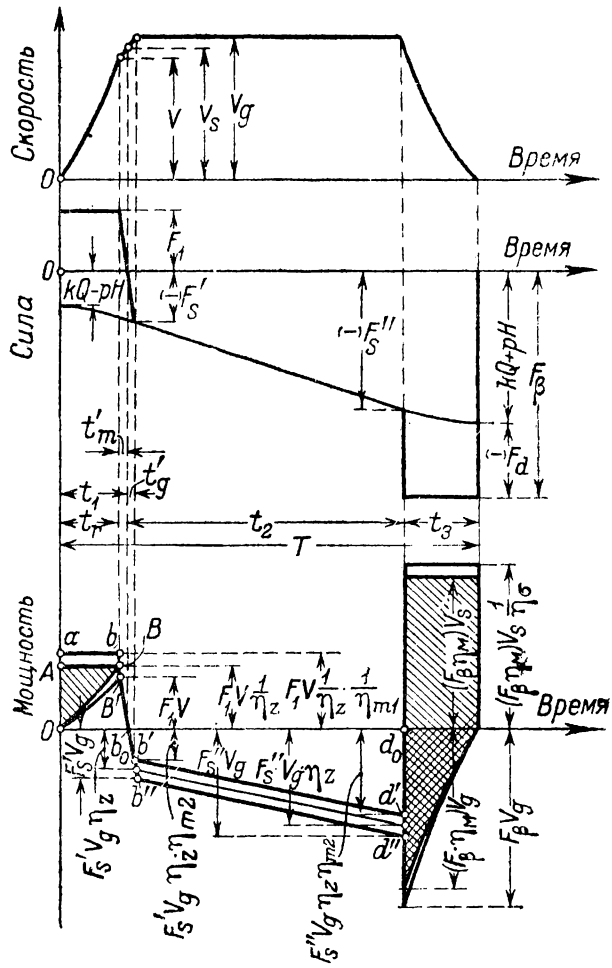
## 2. Генераторное торможение

Диаграммы на фиг. 55 (см. также фиг. 38), характеризуют случай *спуска* груза при неуравновешенной системе подъема.

В период пуска $t_r$ предположим, что двигатель развивает силу $F_1$, увеличивающую собственное ускорение системы до необходимого значения.

На диаграмме мощностей (фиг. 55) заштрихованная площадь $OABO$ представляет потерю энергии в реостате в течение периода $t_r$; площадь $OabBB'b_0O$ —энергия потребляемая двигателем из сети за период $t_1=t_r+t_m'$; * $\eta_{m1}$—к. п. д. двигателя в течение периода $t_r$.

По окончании периода $t_r$ роторный реостат оказывается выключенным полностью, после чего двигатель предоставляется самому себе. Под влиянием увеличивающейся отрицательной статической нагрузки скорость подъемного двигателя будет продолжать расти, в связи с чем по истечении времени $t_m'$ с момента выключения реостата двигатель достигает синхронной скорости, которой соответствует скорость опускающегося груза $V_s$, а затем перейдет через нее. Лишь только будет превзойдена синхронная скорость, результатом чего явится отрицательное скольжение (фиг. 42), асинхронная машина станет работать *генератором*, возвращающим энергию обратно в сеть; а так как всякое генерирование тока




Фиг. 55. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема для случая спуска груза, осуществляемого асинхронным подъемным двигателем при наличии всех режимов его работы: моторного в период $t_1$, генераторного в период $t_2$ и противотока период $t_3$.

---

* На фиг. 55 мощности, обусловленные работой двигателя, потребляющего в период $t_1$ энергию из сети, отложены от оси абсцисс вверх.

сопровождается явлением торможения, то в данном случае будет иметь место наличие *электрического* торможения, ограничивающего скорость опускающегося груза величиной $V_g$, которая будет достигнута по истечении времени $t_g'$ с момента достижения синхронизма.

Указанный характер работы асинхронной машины с гиперсинхронной скоростью, соответствующей скорости спуска $V_g$, будет иметь место в течение периода полного хода $t_2—t_g'$. *

Разность между скоростью спуска $V_g$ и нормальной скоростью подъема $V$ будет примерно равна удвоенной величине скольжения, умноженной на скорость $V_s$, соответствующую синхронной скорости двигателя.

Из самой сущности рассматриваемого способа электрического торможения следует, что, применяя его, не только остановить машину, но даже уменьшить скорость спуска ниже значения $V_g$ не представилось бы возможным; ввиду этого после окончания периода полного хода, с целью замедления скорости спуска в период $t_3$ пришлось бы применить или механическое торможение, или электрическое торможение противотоком, каковое фиг. 5 и изображено. На диаграмме мощностей (фиг. 55) ют место следующие обозначения: $F_s'V_g$ и $F_s''V_g$—мощности на валу сообщаемые системе опускающимся грузом соответственно в ле конце периода полного хода; $F_s'V_g\eta_{lz}$ и $F_s''V_g\eta_z$ — соответственные ощности на валу асинхронной машины, $F'_sV_g\eta_{lz}\eta_{m2}$ и $F_s''V_g\eta_{lz}\eta_{m2}$— мощнос возвращаемые асинхронной машиной в сеть; $\eta_{l.n2}$—среднее значение п. д. асинхронной машины, работающей генератором в период лного хода; $\eta_{lz}$—к. п. д. зубчатой передачи. Площадь $b_0b''d''d_0b_0$ представляет энергию, получаемую системой за счет опускающегося груза в ечение периода $t_2$: площадь $b_0b'd''d_0b_0$ выражает энергию, возвращаемую обратно в сеть.

Применяя генераторное торможение, необходимо иметь в виду, что при этом никоим образом не следует включать реостат, так как увеличение сопротивления вторичной цепи при рассматриваемом режиме асинхронной машины послужило бы причиной увеличения скорости спуска по сравнению со скоростью $V_g$, как это нетрудно усмотреть из фиг. 42. Указанное увеличение скорости в известных случаях могло бы даже оказаться опасным для самой машины. Что же касается мощности, возвращаемой в сеть, то с увеличением скорости она не увеличивалась бы против которая имеет место при скорости $V_g$, избыток же мощности аемый за счет увеличения скорости, поглощался бы в рео-

Баланс энергии весь период спуска $T$ применительно к диаграмме мощности на фиг. 55 представляется ориентировочно ** следующим образом, предположении, что энергия, потребляемая из сети, принимается за положительную, энергия же, возвращаемая в сеть, считается отрицательной:

$$L=F_1V\left[\frac{1}{\eta_{lz}}\cdot\frac{1}{\eta_{lm1}}t_1-\frac{1}{2}(F_s'+F_s'')V_g\eta_{lz}\eta_{m2}t_2+(F_\beta\eta_{lм})V_s\frac{1}{\eta_{l\sigma}}t_3\right], \qquad (268)$$

где $\eta_{lм}$— к. п. д., учитывающий механические потери в двигателе, а также потери в зубчатой передаче, в период работы на противотоке; $\eta_3$— к. п. д. статора

Скорость $V_g$ не будет оставаться строго постоянной в продолжение периода полного хода, а в результате действия увеличивающейся отрицательной статической нагрузки будет несколько возрастать. Однако, так как подобное возрастание скорости при работе асинхронной машины на автоматической характеристике $R_2$ (фиг. 42) будет весьма незначительно (порядка 1—2%), указанное явление в рассматриваемом случае не принято во внимание.

** Явления, происходящие в периоды $t'_m$ и $t'_g$ здесь для простоты не учтены.

Пример 28.

$$F_1 = 1140\,кг,\ F_s' = -1329\,кг,\ F_s'' = -4890\,кг,\ F_g =$$

$$= -8420\ кг;\ V = 7{,}6\frac{м}{сек},\ V_s = 7{,}8\frac{м}{сек},\ V_g = 8\frac{м}{сек}\ \eta_{\eta 1} = 0{,}9,\ \eta_{\eta m} = 0{,}92,$$

$$\eta_{\eta s} = 0{,}96;\ \eta_{\eta_2} = 0{,}95,\ \eta_{\eta_M} = 0{,}93;\ t_1 = 11{,}9\,сек,\ t_2 = 31{,}8\,сек,\ t_3 = 7{,}3\,сек.$$

Подставляя указанные данные в выражение (268), получаем:

$$L = 1140 \cdot 7{,}6 \cdot \frac{1}{0{,}95} \cdot \frac{1}{0{,}9} \cdot 11{,}9 - \frac{1}{2}(1329 + 4890) \cdot 8 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}92 \cdot 31{,}8 +$$

$$+ (8420 \cdot 0{,}93) \cdot 7{,}8 \cdot \frac{1}{0{,}96} \cdot 7{,}3;$$

$$L = -107\,617\ кг \cdot м = -1055\ kW \cdot сек = -0{,}29\ kWh.$$

Таким образом количество энергии, возвращаемой обр[illegible] в сеть за период спуска $T$, составляет 0,29 $kWh$.

### 3. Область применения и способы осуществления электрического торможения

В случае производства операций *подъема*, т. е. при наличии положительной статической нагрузки, электрическое торможение в период *замедления* может быть осуществлено лишь в виде торможения *противотоком*, с каковой целью по окончании периода полного хода переключаются две фазы статора подъемного двигателя. Для выполнения последней операции рычаг управления переводится через нуль и устанавливается в определенном положении, соответствующем сопротивлению реостата, необходимому для создания тормозного момента, величина которого, при определенном значении периода замедления, обусловлена избытком запасенной в период пуска живой силы.

В применении к диаграммам на фиг. 42 предположим, что точка $N$ на характеристике $R_2$ соответствует концу периода полного хода, осуществляемого со скоростью $n_3$, которой соответствует скольжение $s_3$ (см. верхнюю шкалу); в результате переключения двух фаз статора, каковая операция обусловливает переход двигателя с моторного режима на режим противотока, при той же скорости $n_3$ скольжение изменится от величины $s_3$ до значения $(2 - s_3)$, отмеченного на нижней шкале фиг. 42. В предположении наличия металлического реостата, при заданном тормозном моменте $M_b$, величина момента, который должен развивать двигатель при скольжении $(2 - s_3)$, определяется значением $M'_b > M_b$, каковой режим характеризуется точкой $\mu$, получаемой на нижней части фиг. 42 пересечением характеристики $r_1$ в линией $Nn_3\mu$.

В применении к схеме управления, представленной на фиг. 43, при работе двигателя с полной скоростью в направлении „вперед", рычаг управления, находящийся в положении *11*, необходимо *быстро* перевести через *все* положения указанного направления с дальнейшим переводом этого рычага через нуль и установкой его в положение *1* направления „назад"

---

Знач[illegible]ия усилий, периодов движения и максимальной скорости $V_g$ заимствованы из примера

Так как в период замедления скольжение должно уменьшаться, приближаясь к значению $(s)=1$, то при заданном постоянном тормозном моменте $M_b$ сопротивление роторного реостата должно соответственным образом уменьшаться до тех пор, пока подъемная машина не остановится. На фиг 42 момент вращения двигателя, являющийся в данном случае тормозным моментом, в период замедления будет изменяться по кривой $abcdefghiklmnpqrtuvwy$, варьируя около заданной величины момента $M_b$, как около среднего значения, в пределах $M'_b > M_b$ и $M''_b < M_b$.

В применении к схеме на фиг. 43 рычаг управления при достижении двигателем скорости $\frac{n_s}{2}$ соответствующей скольжению (1,5), должен быть переведен из положения *1* направления „назад" в положение *2* того же направления, оставаясь в последнем положении до полной остановки двигателя.

Критерием выполнения двигателем необходимого тормозного режима могут служить соответственные показания амперметра. Следует отметить, что работа двигателя при режиме противотока происходит на его мягких характеристиках, являющихся результатом включения в роторную цепь значительных сопротивлений реостата; указанное обстоятельство является одной из отрицательных сторон применения торможения противотоком.

b. Предположим, что необходимо произвести *спуск* груза при наличии отрицательной статической нагрузки. При этом в период пуска, как известно, возможны три нижеследующих режима.

1) Собственное (свободное) ускорение системы меньше заданного ускорения, в результате чего в указанный период необходим подгон системы, осуществляемый путем включения двигателя на работу в качестве мотора; 2) собственное ускорение системы равно заданному ускорению; в таком случае в период пуска не должен действовать ни двигатель, ни тормоз; 3) собственное ускорение системы больше заданного ускорения; в последнем случае в период пуска необходимо применение торможения.

Что касается периода полного хода и замедления, то при наличии отрицательной статической нагрузки в эти периоды, независимо от режима пускового периода, должно быть применено торможение.

Рассмотрим работу подъемного двигателя для случая операции спуска при отрицательной статической нагрузке, на фоне его характеристик, представленных на фиг. 56 (см. в конце книги).

1) В случае необходимости подгона системы в период пуска с постоянным моментом вращения $M_1$ (см. верхнюю часть фиг. 56), необходимо включить двигатель в сторону действия отрицательной статической нагрузки с введенным полностью сопротивлением роторного реостата, которое затем в течение периода пуска $t_1$, в случае необходимости достижения полной скорости спуска, должно постепенно выводиться с таким расчетом, чтобы к концу указанного периода весь реостат оказался выключенным. Момент, развиваемый при этом двигателем, работающим в качестве мотора, в случае наличия металлического реостата, будет изменяться по кривой *abcdefghiklmnpqrtuvwy*, варьирующей около величины $M_1$, как около среднего значения между пределами $M'_1 > M_1$ и $M''_1 < M_1$. Критерием выполнения двигателем необходимого момента вращения могут служить соответственные показания амперметра.

Конец периода пуска определяется точкой *y*, находящейся на характеристике $R_2$, соответствующей собственному сопротивлению обмотки ротора; по окончании указанного периода двигатель, будучи предоставлен самому себе, будет продолжать работать на указанной характеристике, причем под влиянием отрицательной статической нагрузки скорость его будет увеличиваться; в связи с этим двигатель достигнет сначала син-

хронной скорости $n_s$, а затем, перейдя через нее, начнет работать генератором; означенное увеличение скорости будет продолжаться до тех пор, пока не наступит равенство моментов: 1) тормозного, развиваемого двигателем при работе его генератором, и 2) обусловленного отрицательной статической нагрузкой.

Предположим, что указанное равенство моментов наступает при скольжении $-s_4$ в точке $\gamma$, которой соответствует начало периода полного хода со скоростью $n_4 > n_s$. При статически уравновешенной системе подъема в течение всего указанного периода величина отрицательного статического момента $M_s'$ остается постоянной; значение, равное $M'_s$, имеет также и тормозной момент, развиваемый двигателем, работающим в качестве генератора со скольжением $-s_4$.

По окончании периода равномерного хода, с целью перехода к периоду замедления, необходимо применить иной вид торможения, которое может быть осуществлено или при режиме противотока, или механическим путем; в случае применения в период замедления *механического тормоза*, двигатель необходимо выключить; тормозной момент последнего при этом сразу упадет от величины $M'_s$ до нуля, каковой режим на фиг. 56 характеризуется линией $(\gamma - n_4)$; после этого, при нулевом моменте двигателя, скорость его, в результате применения механического тормоза, будет падать от значения $n_4$ в начале периода замедления до нуля в конце его.

Если рассматривать неуравновешенную систему подъема в предположении, что режим, характеризуемый на фиг. 56 точкой $\gamma$, соответствует началу периода полного хода, то в продолжение всего этого периода получим увеличение как отрицательного статического момента, так и тормозного момента, развиваемого двигателем, работающим в качестве генератора, от значения $M'_s$ в начале указанного периода до величины $M_s''$ в конце его, каковой режим определяется точкой $\delta$; скорость за означенный период времени, при изменении момента по линии $\gamma\delta$, возрастет от величины $n_4$ до $n'_4$, скольжение же при этом изменится от значения $-s_4$ до $s'_4$.

По окончании периода полного хода необходимо перейти к периоду замедления.

Желая применить в последний период торможение противотоком, необходимо рассмотреть два возможных при этом случая: а) центробежный выключатель, замыкающий накоротко обмотку ротора подъемного двигателя при достижении им синхронизма, или отсутствует, или, как в системе Броун-Бовери, будучи применен, размыкается при переводе рукоятки управления через нуль, с целью перехода к режиму противотока; b) указанный центробежный выключатель применен, причем он не размыкается при сверхсинхронной скорости в связи с переводом рукоятки управления через нуль.

а) В случае отсутствия упомянутого выключателя, или случае применения системы Броун-Бовери, с целью перехода от генераторного режима к торможению противотоком, необходимо переключить две фазы статора; последняя операция обусловливает изменение направления вращающегося магнитного поля, каковое обстоятельство послужит причиной изменения скольжения при скорости $n'_4$ от величины $s'_4$ до значения $(2+s'_4)$, отмеченного на нижней шкале фиг. 56.

При заданном тормозном моменте $M_\beta$ и в предположении наличия металлического реостата, в связи с указанным переключением фаз статора в цепь ротора двигателя необходимо включить сопротивление реостата, составляющее с собственным сопротивлением обмотки ротора величину $r_4$, каковой режим характеризуется точкой $\phi$. С целью осуществления периода замедления при заданном тормозном моменте $M_\beta$ необходимо сопротивление роторного реостата соответственным образом уменьшать до тех пор, пока машина не остановится; в связи с этим на фиг. 56 тормозной момент,

разбиваемый двигателем, работающим при режиме противотока, в течение периода замедления будет изменяться по кривой $\psi\varphi\varphi$, варьируя около заданной величины момента $M_\beta$, как около среднего значения, в пределах $M_\beta$ $M_\beta$ и $M_\beta'' < M_\beta$. Скорость при этом будет уменьшаться от вели- $n'$ до нуля, скольжение же — от значения $(2+s_4')$ до единицы.

В применении к схеме на фиг. 43 рычаг управления, находящийся в иод работы двигателя на генераторном режиме в положении *II*, предложим, направления „вперед", должен быть, с целью осуществления незамедления, быстро переведен через *все* положения этого направс дальнейшим переводом указанного рычага через нуль и установсначала в положении *4* направления „назад"; затем, при достиже-

двигате скорости $\frac{n_s}{2}$ рычаг управления должен быть переведен

ложение в каковом он должен оставаться до полной остановки дви- ля при скольжении $(s)=1$; после этого рычаг управления должен быть ленно поставлен в нулевое положение.

b) В случае наличия центробежного выключателя, замыкающего нако- обмотку ротора при достижении двигателем синхронной скорости и змыкаемого при переводе рукоятки управления через нуль, с целью рехода от генераторного режима к противотоку, необходимо сначала подтормозить машину механическим тормозом для того, чтобы снизить ско- двигателя, сделав ее ниже синхронной; роль механического тормоза в рассматриваемом лучае состоит в компенсации отрицательной статической нагрузки при скорости выше синхронной и в создании, кроме того, некоторой положительной статической нагрузки при скорости ниже синхронной. Предположим, что в результате применения механического тор- скорость двигателя снизилась от значения $n'_4$ (фиг. 56), которому соответствует точка $\delta$ на генераторной ветви характеристики $R_2$, до величины $n_\eta$ $n_s$, каковой режим характеризуется точкой $\eta$ на моторной ветви характеристики; в процессе указанного уменьшения скорости ателя изменение развиваемого им момента будет происходить по характеристике $R_2$ в пределах отрезка $\delta\gamma n_s\eta$ (между точками $\delta$ и $\eta$). По достижении двигателем скорости $n_\eta$ необходимо переключить две фазы статора при одновременном включении в цепь ротора сопротивления, обусловливающего получение требуемого тормозного момента при осуществлении режима противотока. В результате произведенной операции получим изменение развиваемого двигателем момента при скорости $n_\eta$ от величины, характеризуемой точкой $\eta$, до значения, определяемого точкой соответствующей сопротивлению $r_4$ роторной цепи двигателя при его работе противотоком; в период замедления дальнейшее изменение момендвигателя, в связи с соответственным уменьшением сопротивления роторной цепи, будет происходить по кривой $\lambda\varphi\varphi$, варьирующей около заданной величины тормозного момента $M$ как около среднего значения, в

$M$ $M_\beta$ $M_\beta'' < M_\beta$.

Что касается характера управления подъемной машиной (двигателем) осуществлении рассматриваемого режима применительно к схеме на фиг. 43, то следует указать, что рычаг управления, поставленный в период полного хода при работе двигателя генератором в положение *II* направления „вперед", должен оставаться в этом положении до достижения двигателем значения скорости $n_\eta$, после чего указанный рычаг должен быть быстро перемещен через все положения этого направления, переведен через нуль и поставлен в положение *4* направления „назад"; затем управление осуществляется аналогично случаю, рассмотренному в п. 1, после перевода рычага управления в положение *4*.

Рассмотрим еще случай применения торможения *противотоком* в период полного хода при *уменьшенной скорости спуска*. Предположим, что указанная скорость составляет 75% от скорости подъема, соответствующей синхронной скорости двигателя $n_s$. Тогда в период пуска, предполагая наличие подгона системы, на фиг. 56 получим изменение развиваемого двигателем момента вращения, действующего в направлении отрицательной статической нагрузки, по кривой $Oabcdefgx$; по достижении двигателем в точке $x$ скорости $0{,}75n_s$, с целью перехода к периоду полного хода, необходимо переключить две фазы статора с одновременным включением в цепь ротора сопротивления реостата, которое при режиме противотока составило бы с собственным сопротивлением ротора величину $r_2$. В результате указанной операции скольжение изменится от величины 0,25 моторном режиме до значения (1,75) при противотоке. Момент двигателя при этом изменится от величины, характеризуемой точкой $x$, до значения $M_b$, определяемого точкой . В предположении статически уравновешенной системы подъема режим двигателя, характеризуемый точкой , будет иметь место в продолжение всего периода полного хода. С целью перехода к периоду замедления необходимо получить соответственное увеличение тормозного момента, развиваемого двигателем, каковая операция осуществляется путем уменьшения сопротивления роторного статора и перевода двигателя при скорости $0{,}75n_s$ и скольжении (1 с характеристики $r_2$ на характеристику $r_4$; следствием этого явится изменение момента двигателя от величины $M_b$ до значения, определяемого точкой Ω. В процессе осуществления периода замедления момент, развиваемый двигателем, будет изменяться по кривой $\Omega_{\rho\rho\varphi}$, варьируя от заданной величины тормозного момента $M_\beta$, как около среднего значения.

2) При отсутствии в период пуска работы двигателя и торможения скорость отключенного двигателя под действием отрицательной статической нагрузки будет расти от нуля до синхронной величины $n_s$ (фиг. 56), при нулевом значении момента вращения, развиваемого двигателем. По достижении скорости спуска, соответствующей синхронной скорости двигателя, последний необходимо включить в направлении действия статической нагрузки, под влиянием которой двигатель будет работать на характеристике $R_2$ в качестве генератора, каковой режим осуществляется аналогично рассмотренному выше *

3) В случае необходимости применения в период пуска торможения последнюю операцию нецелесообразно осуществлять посредством противотока, так как при небольших тормозных моментах, которые в рассматриваемом случае могут иметь место на практике, потребовался бы реостат с очень большим сопротивлением, применение которого не является рациональным. Ввиду этого необходимое подторможивание при отключенном двигателе следует производить при помощи механического тормоза, действие которого должно продолжаться в течение всего периода пуска до момента достижения скоростью спуска значения, соответствующего синхронной скорости двигателя $n_s$, после чего тормоз выключается, а двигатель включается на работу генератором, согласно рассмотренному выше (см.

## С. БОЛЕЕ СЛОЖНЫЕ СЛУЧАИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

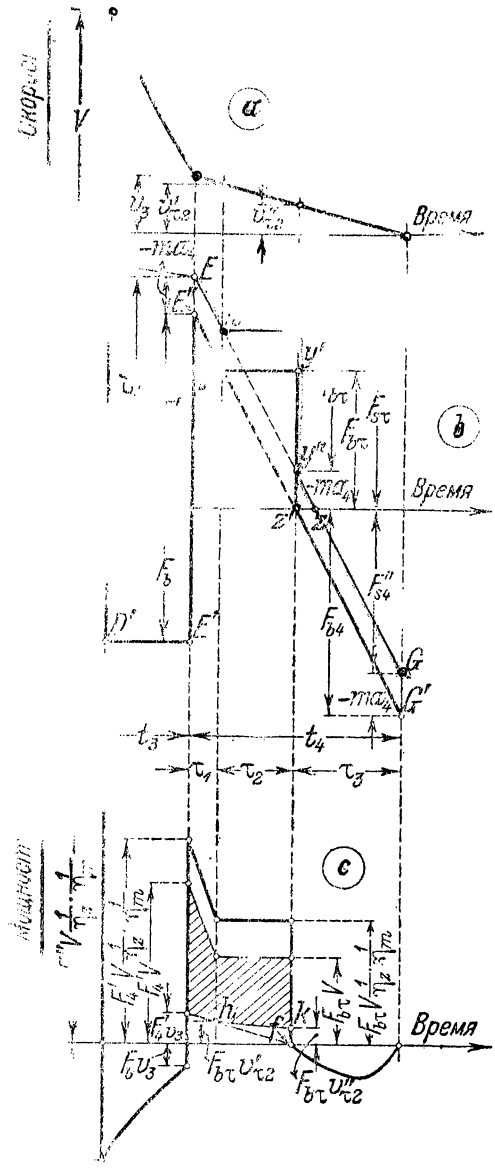
1. На фиг. 57 представлены диаграммы, характеризующие работу подъема для случая *опрокидных* сосудов в период их разгрузки **, при угле наклона 135°, применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 31.

---

* См. стр. 186—188.

** На фиг. 57 период $t_2$ отсутствует.

На диаграмме *b* фиг. 57 собственное статическое усилие системы период $t_4$ изменяется по линии $Exy''zG$ Однако, необходимо иметь в виду, что так как при асинхронном подъемном двигателе требуемого уменьшения скорости в период $t_4$ возможно достигнуть лишь при наличии некоторого определенного момента сопротивления, обусловливающего получение соответственного момента вращения, зависящего, в свою очередь, от величины вводимого в цепь ротора добавочного сопротивления (реостата), то в рассматриваемом случае в продолжение некоторого периода $\tau_2$ представится необходимым произвести соответственное увеличение статической нагрузки при помощи механического тормоза, согласно представленному на диаграмме *b* фиг. 57. Тормозное усилие при этом должно увеличиваться от нулевого значения в начале периода $\tau_2$ (точка *x*) до величины $F_{b\tau}$ в конце его (точка *y''*) с таким расчетом, чтобы в течение периода $\tau_2$ суммарное статическое усилие, то есть собственное усилие системы и развиваемое механическим тормозом, составляло постоянное значение $F_{s\tau}$, при котором в течение всего периода $\tau_2$ движущее усилие оказалось бы постоянным и равным $F_{b\tau} \geqslant \frac{1}{3} F_{ном}$*, где $F_{ном}$—номинальное усилие двигателя. Разность $F_{s\tau} - F_{b\tau} = ma_4$, где $m$—масса движущихся частей, $a_4$—величина замедления в период разгрузки $t_4$. Таким образом суммарное статическое усилие в течение периода $t_4 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ должно изменяться по линии $Exyy''zG$. В соответствии с этим движущее усилие в течение периода $(\tau_1 + \tau_2)$ будет изменяться по линии $E''x'y'z'$. В продолжение периода $\tau_3$ будет действовать механический тормоз, развивающий усилие, изменяющееся по линии $z'G'$ от нулевого значения в начале периода $\tau_3$ до величины $F_{b4}$ в конце его.




Фиг. 57 Диаграммы, характеризующие работу подъема с асинхронным подъемным двигателем в период разгрузки опрокидных сосудов с углом наклона 135° при переменном тормозном усилии, изменяемом в период $\tau_2$ от нуля в начале до значения $F_{b\tau}$ в конце этого периода, применительно к диаграммам на фиг. 31.

* Для подъемных установок, электрическая часть которых выполняется ХЭМЗ-ом, наименьший момент, при котором возможно требуемое уменьшение скорости, составляет одну треть нормального момента.

Диаграмма *c* на фиг. 57 характеризует изменение мощностей в период разгрузки $t_4$, причем отдельные ординаты указанной диаграммы представляют произведения из соответственных усилий и скоростей. Заштрихованная площадь определяет потери энергии в реостате; площадь *hkfh* представляет потери в механическом тормозе за период $\tau_2$.

Что касается управления двигателем, который должен быть включен в период $(\tau_1+\tau_2)$, то таковое необходимо производить следующим образом. В течение времени $\tau_1$ сопротивление включенного в цепь ротора реостата должно увеличиваться таким образом, чтобы при падающем усилии двигателя от величины $F'_4$ до значения $F_{b\tau}$ скорость подъема уменьшилась от величины $v_3$ до $v'_{\tau 2}$ (тахограмма *a* на фиг. 57); поскольку при этом оба параметра — скорость и усилие, являются переменными, то ни показания тахометра, ни показания амперметра не могут служить надежным критерием получения требуемого режима. В течение периода $\tau_2$, при постоянной суммарной нагрузке $F_{b\tau}$, с целью дальнейшего уменьшения скорости подъема от величины $v'_{\tau 2}$ до $v''_{\tau 2}$, необходимо производить дальнейшее увеличение сопротивления роторного реостата, критерием чего может служить определенное постоянное показание амперметра при соответственно уменьшающихся показаниях тахометра* По окончании периода $\tau_2$ как двигатель, так и механический тормоз, должны быть выключены; затем, тормозное усилие должно увеличиваться от нулевого значения в начале периода $\tau_3$ до величины $F_{b4}$ в конце этого периода.

На основании изложенного можно заключить, что ввиду кратковременности отдельных промежутков времени, составляющих разгрузочный период $t_4$,** указанные операции с подъемной машиной, требующие быстрого как отдельного, так и совместного управления двигателем и тормозом, являются на практике трудно осуществимыми в точности, вследствие чего выполнение приведенных на фиг. 57 диаграмм скорости и усилий в продолжение движения опрокидного сосуда по разгрузочной кривой может быть рассматриваемо как теоретическое, к которому на практике желательно приближаться. Более или менее совершенное выполнение указанных диаграмм в значительной мере зависит от опытности и квалификации машиниста.

Из отдельных обозначений на диаграмме мощности укажем на следующие: $V$—полная скорость подъема; $\eta_z$ и $\eta_m$ — к. п. д. соответственно зубчатой передачи и подъемного двигателя. ***

Расход энергии, потребляемой подъемным двигателем из сети за период *разгрузки* применительно к диаграмме мощности *c* на фиг. 57, может быть определен из выражения:

$$L_{n4} = \frac{V}{\eta_z \eta_m}\left[(F'_4 + F_{b\tau})\frac{\tau_1}{2} + F_{b\tau}\ \tau_2\right]. \qquad (269)$$

Следует отметить, что при незначительности периода $\tau_2$ может оказаться затруднительным управление механическим тормозом, который в течение всего этого периода должен увеличивать развиваемое им усилие от нулевого значения в начале периода $\tau_2$ до величины $F_{b\tau}$ в конце

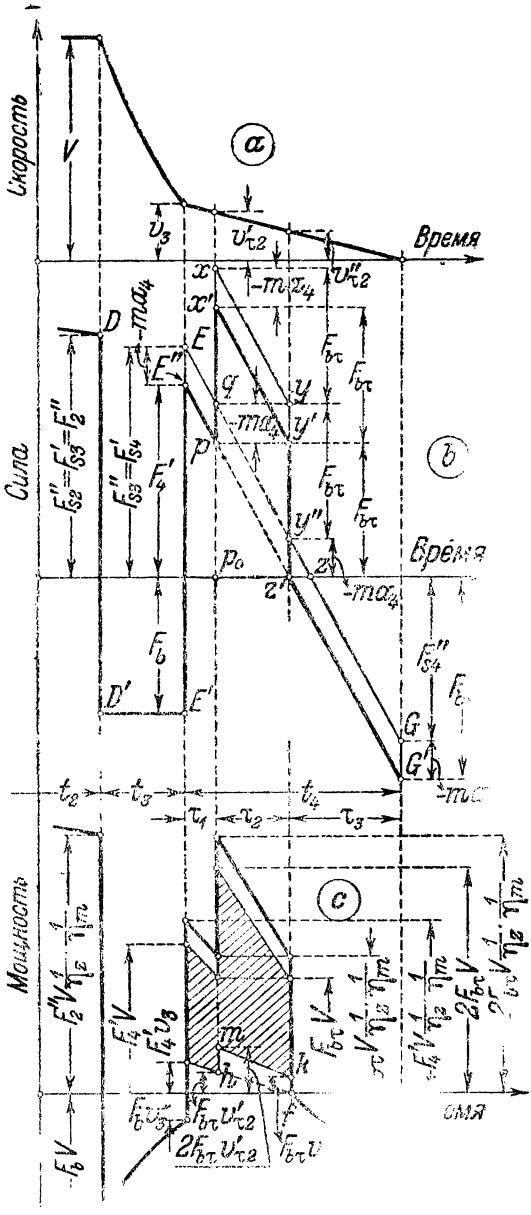
---

* В рудничных подъемных установках тахометр соединен вместе с тахографом.

** $t_4 \cong$ 10—11 *сек.*

*** Ввиду незначительной механической мощности на валу барабана в период $(\tau_1+\tau_2)$ (фиг. 57), потери в зубчатой передаче не отложены отдельно вслед за значениями указанной мощности, как это произведено в рассмотренных выше соответственных диаграммах (см. фиг. 44, 46, 47, 48), а учтены совместно с потерями в двигателе путем умножения мощности $F'_4 V$ на произведение $\frac{1}{\eta_z} \cdot \frac{1}{\eta_m}$. Подобный способ учета потерь практически не влияет на значение полной мощности, потребляемой из сети.

этого периода, согласно диаграмме *b* на фиг. 57. В таком случае может представиться более целесообразным управление механическим тормозом согласно изображенному на диаграммах *b* и *c* фиг. 58, где тормозное усилие $F_b\tau$ остается постоянным в течение всего периода $\tau_2$; однако суммарное статическое сопротивление будет изменяться при этом по линии *xy* от величины, определяемой ординатой $p_0x$ в начале периода $\tau_2$ до значения, характеризуемого ординатой *z'y* в конце его. Таким образом, суммарное статическое усилие в период $t_4$ будет изменяться по линии *Eqxyy"zG* *; движущее усилие за период $(\tau_1 + \tau_2)$ будет изменяться по линии *E"px'yz'* (диаграмма *q* на фиг. 58).




Фиг. Диаграммы, характеризующие работу подъема с асинхронным подъемным двигателем в период разгрузки опрокидных сосудов с углом наклона 135° при постоянном усилии $F_b\tau$, развиваемом механическим тормозом в продолжение периода $\tau_2$, применительно к диаграммам на фиг. 31.

Управление двигателем (реостатом) в последнем случае, при падающем моменте вращения в период $\tau_2$, окажется более сложным, чем при постоянном моменте, имеющем место в течение периода $\tau_2$ в рассмотренном выше случае на диаграмме *b* фиг. 57

Расход энергии, потребляемой подъемным двигателем из сети за период *разгрузки* применительно к диаграмме мощности *c* на фиг. 58, может быть определен из выражения:

$$L_{n1} = \frac{V}{2\eta_z\eta_m}[(F_4' + F_b\tau)\tau_1 + 3F_b\tau\tau_2]. \qquad (270)$$

---

В заключение следует отметить, что осуществление пусковых операций в период $(t_0 + t_1)$ для режима, характеризуемого диаграммами на фиг. 31, при постоянном движущем усилии в течение всего указанного периода, может иметь место как при ручном управлении, так и при автоматизации пуска при помощи контакторов и соответственно настроенных реле *тока*. В последнем случае, с целью осуществления разгрузочных операций в период $t_4$, необходимо иметь воз-

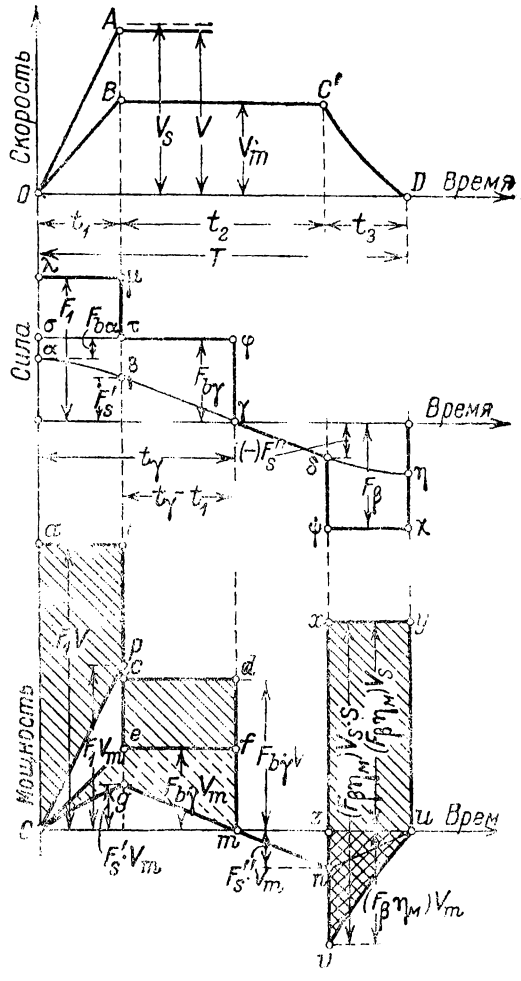
* Собственно татическое усилие системы изменяется по линии *Eqy"zG*.

можность ручного управления роторным реостатом подъемного двигателя в указанный период.

Равным образом, в случае автоматизации пусковых операций при помощи реле *времени* применительно к режимам, характеризуемым диаграммами на фиг. 33 и 34, с целью осуществления разгрузки опрокидных сосудов в период $t_4$ при наличии одновременной работы двигателя и механического тормоза в последний период, также необходимо осуществлять управление подъемной машиной вручную.

2. При неуравновешенной системе подъема производится одновременный подъем и спуск людей со скоростью $V_m < V$, где $V$ — нормальная (максимальная) скорость подъема.

Переменная статическая нагрузка, характеризуемая кривой $\alpha\beta\gamma\delta\eta$ (фиг. 59), в рассматриваемом случае обусловлена вредными сопротивлениями и неуравновешенными частями канатов. До момента перехода указанной нагрузки в точке $\gamma$ через нуль двигатель, преодолевая положительный момент сопротивления, в продолжение времени $t_\gamma$ работает в качестве мотора. При недостаточно большом значении $O\alpha$ статической нагрузки, имеющем место в начале периода пуска, необходимо произвести соответственное увеличение указанной нагрузки до некоторой величины $O\sigma = F_{b\gamma}$, при которой окажется достаточным включение имеющегося реостата, с целью получения требуемого уменьшения пускового ускорения, обусловливающего, в свою очередь, соответственное понижение скорости в конце периода пуска $t_1$ до значения $V_m < V$. Согласно диаграмме усилий на фиг. 59 указанная величина $O\sigma = F_{b\gamma}$ статической нагрузки поддерживается постоянной в продолжение времени $t_\gamma$, с каковой целью сила нажатия тормоза должна при этом увеличиваться, изменяясь по кривой $\alpha\beta\gamma$; * максимального значения $\gamma\varphi = F_{b\gamma}$ сила, развиваемая тормозом, достигает в конце периода $t_\gamma$, когда собственная статическая нагрузка подъемной машины достигает нулевого значения.




Фиг. 59. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема с асинхронным подъемным двигателем, для режима одновременного подъема и спуска людей с уменьшенной скоростью при переменном усилии, развиваемом механическим тормозом в период $t_\gamma$.

* Часть $\alpha\beta$ кривой $\alpha\beta\gamma$ при изменении скорости подъема в период $t_1$ по прямой $OB$ представляет *параболу*.

Управление подъемной машиной при этом в период $t_\gamma$ производилось едующим образом. Перед началом пуска в ход необходимо было бы механический тормоз с силой, равной величине $\alpha\beta = F_{b\alpha}$; после включается в определенном направлении подъемный двигатель введенным полностью реостатом. Для сохранения постоянства суммар-статической нагрузки в течение времени $t_\gamma$ силу нажатия тормоза необходимо было бы непрерывно увеличивать. Что же касается реостата, противление его в период $t_1$ следовало бы соответственным образом ньш с таким расчетом, чтобы в продолжение указанного периода вивае мое двигателем усилие $F_1$ оставалось постоянным; при этом, од- обходимо име в виду, что для получения скорости $V_m < V$ опре- нную часть реостата в конце периода $t_1$ необходимо оставить вклю- нной. При переходе периоду $t_2$ сопротивление включенного реостата необходимо соответственно увеличить, * каковом положении реостат жен оставаться в продолжение времени $(t_\gamma - t_1)$, т. е. до момента пере- кривой $\alpha\beta\gamma\delta\eta$ статической нагрузки через нуль. Критерием соблюде- практического постоянства усилия $F_1$, развиваемого подъемным двига- в течение периода пуска $t_1$ (фиг. 59), могут служить соответственные ания амперметра; необходимо, однако, иметь в виду, что управление мной машиной в указанный период при необходимости *одновремен- изменения* как силы торможения по закону параболы $\alpha\beta$, так и сопро- вления реостата, не является особенно удобным, ввиду чего при практи- еском осуществлении рассматриваемого режима пришлось бы довольство- аться лишь приблизительным его выполнением. Относительно периода $t_1$) необходимо отметить, что при постоянном сопротивлении вклю- енного при этом реостата критерием получения необходимого возраста- лы торможения по прямой $\beta\gamma$ может служить тахограф, стрелка ко- торого должна показывать величину скорости $V_m$.

После перехода статической нагрузки в точке $\gamma$ через нуль она изме- свой знак, перейдя в область отрицательных значений, в связи с чем момента получаются условия работы, аналогичные случаю *спуска* Если бы мы после перехода статической нагрузки через нуль захо- ли приме электрическое торможение *противотоком*, то, рассуждая еоретическ необходимо было бы переключить две фазы статора подъ- много двигателя, после чего получили бы работу последнего в качестве ектрического тормоза. Однако необходимо иметь в виду, что пока имею- при этом место отрицательная статическая нагрузка не возросла бы значений, при которых данного реостата оказалось бы достаточным получения необходимого скольжения $s > 1$, соответствующего умень- ной скорости $V_m$, применение торможения противотоком не могло бы охранить указанной скорости, которая стала бы *убывать*. Ввиду этого, целью сохранения скорости $V_m$, в момент, соответствующий переходу татической нагрузки в точке $\gamma$ через нуль, пришлось бы двигатель выклю- ить и применить механический тормоз, увеличивая постепенно силу его ажатия, начиная с нулевого значения; включение же двигателя с опреде- енным сопротивлением реостата в направлении, противоположном дей- твию отрицательной статической нагрузки, ** можно было бы произвести лишь в случае достижения последней достаточно большого значения; еоста при этом, ввиду необходимости соответственного увеличения мо- вращения двигателя в связи с увеличением отрицательной стати- нагрузки, следовало бы выводить.

---

На основании соображений, высказанных на 174 стр. в применении к диаграммам 52.

Т. е. по сравнению с работой двигателя в продолжение периода $t_\gamma$ пришлось бы ючить две фазы статора.

Для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 59, в продолжение времени $(t_1+t_2-t_\gamma)$ применен механический тормоз.

В течение периода замедления $t_3$ применено электрическое торможение противотоком.

На диаграмме мощностей (фиг. 59) сумма площадей *OabcdfmO* и *zxyuz* выражает энергию, потребляемую подъемным двигателем из сети, без учета потерь в самом двигателе в течение времени $t_\gamma$ и в его статоре за период $t_3$, каковые потери в данном случае не учтены; площади *OabpO*, *ecdfe* и *zxyuz*, заштрихованные сплошными параллельными линиями, представляют потери энергии в реостате, получаемой из сети, питающей двигатель; площадь *zvuz*, заштрихованная сплошными линиями крест-накрест, определяет потери в реостате, * получаемые за счет отрицательной нагрузки; площадь *OefmgO*, заштрихованная прерывистыми линиями, выражает потери, обусловленные применением механического тормоза. Площадь *OpeO*, равная соответственной части площади *zvuz*, а именно, площади *nvun*, определяет живую силу, запасенную в период пуска в движущихся частях подъемного устройства. Площадь *zunz* обусловлена действием статической нагрузки, характеризуемой кривой $\delta\eta$.

Значения отдельных мощностей, выраженных в зависимости от соответственных усилий и скоростей, имеющих место в продолжение времени $t_\gamma$, представлены на нижней диаграмме фиг. 59.

3. На фиг. 60 изображены диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема для случая одновременного подъема и спуска людей с уменьшенной скоростью $V_m < V$, при условии, что начальная статическая нагрузка $O\alpha$ недостаточна для получения необходимого уменьшения пускового ускорения при помощи применения лишь реостата; в этом отношении рассматриваемый случай представляет аналогию со случаем, характеризуемым диаграммами на фиг. 59; разница между указанными двумя случаями состоит, однако, в том, что на фиг. 59 сила, развиваемая механическим тормозом, как уже указывалось, изменяется в течение времени $t_\gamma$ по кривой $\alpha\beta\gamma$ от величины $Fb\alpha$ до значения $Fb\gamma$, тогда как на фиг. 60 сила торможения $Fb\gamma$ остается постоянной в продолжение времени $t_\gamma$. Таким образом в последнем случае управление подъемом значительно упрощается по сравнению со случем, характеризуемым диаграммами на фиг. 59. В самом деле, согласно представленному на фиг. 60, перед пуском двигателя в ход приводится в действие тормоз, который должен развивать усилие $\alpha\sigma = Fb\gamma$, остающееся, как уже указывалось, постоянным в течение периода $t_\gamma$. Затем при помощи соответственного выведения реостата усилие $F_1$ двигателя поддерживается постоянным, критерием чего могут служить показания амперметра. К концу периода $t_1$ определенная часть сопротивления реостата, обусловливающая получение уменьшенной скорости $V_m$, должна оказаться включенной. **

По окончании периода пуска, с целью поддержания скорости $V_m$ постоянной, необходимо сопротивление *** включенного реостата соответственным образом *увеличивать*, **** каковая операция будет иметь место в продолжение времени $(t_\gamma - t_1)$, после чего управление машиной осуществляется согласно способу, указанному при рассмотрении диаграмм на фиг. 59. Критерием поддержания в период $t_2$ скорости $V_m$ могут служить показания тахометра. Обозначения на фиг. 60 соответствуют таковым на фиг. 59.

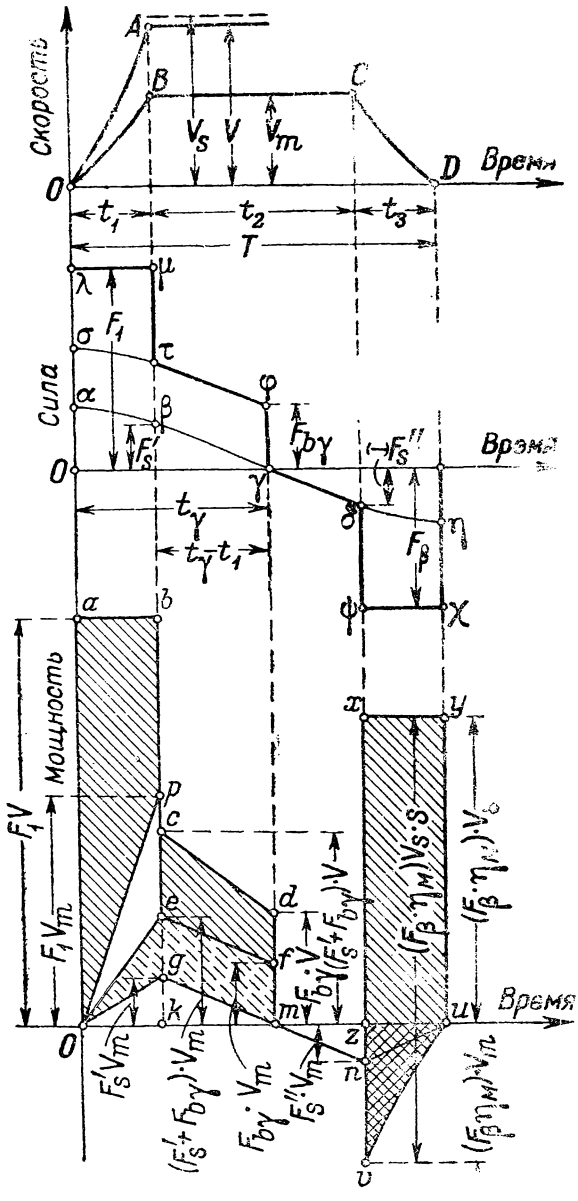
---

* Собственно во вторичной цепи двигателя.

В отношении управления реостатом в период $t_1$ случай, характеризуемый диаграммами на фиг. 60, является аналогичным случаю, иллюстрируемому диаграммами на фиг. 59.

*** Соответственно увеличенное по сравнению с сопротивлением в конце периода $t_1$. Потери в реостате при этом будут уменьшаться.

4. Предположим, что при неуравновешенной системе подъема статическая нагрузка, обусловленная режимом одновременного подъема и спуска людей, в продолжение периода $t_2$ меняет свой знак, переходя в точке $\gamma$ через нуль по истечении времени $t_\gamma$ от начала движения (фиг. 61); пусть при этом нормальная скорость, развиваемая подъемным двигателем в период полного хода $t_2$ без реостата, соответствует максимальной скорости подъема, допускаемой правилами безопасности для перемещения людей.



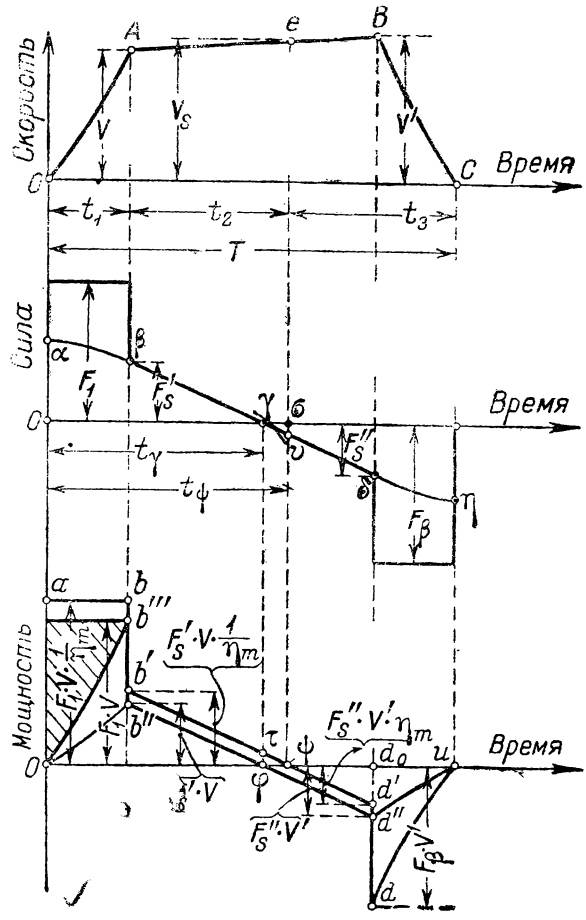

Фиг. 60. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема с асинхронным подъемным двигателем, для режима одновременного подъема и спуска людей с пониженной скоростью при постоянном усилии, развиваемом механическим тормозом в период $t_\gamma$.

Работа подъемного двигателя в указанных условиях будет происходить следующим образом. В продолжение периода $t_\gamma$ двигатель, преодолевая положительную статическую нагрузку, изменяющуюся за указанный период по кривой $\alpha\beta\gamma$, потребляет энергию из сети. При этом в конце периода $t_1$ и в начале периода $t_2$ скорость подъема достигает значения $V$, соответствующего величине статической нагрузки $F_s'$. Далее, в продолжение времени $(t_\gamma - t_1)$, в связи с убыванием нагрузки по прямой $\beta\gamma$ до нуля в точке $\gamma$, скорость подъема будет соответственно возрастать (по прямой $AB$), приближаясь к значению $V_s$, соответствующему синхронной скорости двигателя. Скорости $V_s$, однако, подъем достигнет не по истечении периода $t_\gamma$, когда статическая нагрузка получает нулевое значение, а по окончании периода $t\psi > t_\gamma$. В самом деле, при переходе в точке $\gamma$ указанной нагрузки через нуль в двигателе будут иметь место потери холостого хода, ввиду чего в момент времени, соответствующий точкам $\gamma$—$\tau$— $\varphi$, двигатель будет потреблять из сети мощность, определяемую ориентировочно на нижней диаграмме (фиг. 61) ординатой $\varphi\tau$. Скорость же подъема $V_s$, соответствующая синхронной скорости двигателя, будет до-

стигнута по истечении указанного времени $t\psi$, когда мощность, потребляемая двигателем, превратится в точке $\psi$ в нуль, при достижении статической нагрузкой соответственного отрицательного значения $\sigma v$. На верхней диаграмме момент достижения подъемом скорости $V_s$ характеризуется точкой *e*. После этого двигатель под влиянием возрастания отрицательной статической нагрузки, изменяющейся по кривой $v\delta\eta$, будет продолжать увеличивать свою скорость вращения, в связи с чем, ввиду получения гиперсинхронной скорости, подъемный двигатель превратится в *генератор* каковой режим, как известно, обусловливает наличие *электрического торможения*, сопровождающегося *рекуперацией* энергии. Работа указанного двигателя генератором будет происходить в течение времени $(t_1+t_2-t\psi)$.

В конце периода $t_2$ скорость подъема достигнет значения $V'>V_s>V$,* после чего, с целью завершения подъема, двигатель (генератор) должен быть или совершенно выключен в случае применения механического торможения, что и представлено на фиг. 61, или переключен на работу электрического торможения противотоком.

Что касается способа управления двигателем в период $t_2$, то очевидно, что в этом отношении нет разницы между рассматриваемым здесь случаем подъема и случаем положительной статической нагрузки в продолжение всего указанного периода; необходимо, однако, иметь в виду, что при этом период $t_2$ (фиг. 61) несколько сократится по сравнению с таковым при положительной нагрузке, в связи с чем двигатель при работе его в качестве генератора должен быть выключен соответственно раньше, с целью остановки клетей на соответственных приемных горизонтах.**




Фиг. 61. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема с асинхронным подъемным двигателем для режима одновременного подъема и спуска людей с полной скоростью.

На диаграмме мощностей (фиг. 61) площадь $Oabb'\tau\psi\varphi O$ выражает энергию, потребляемую двигателем из сети (за время $t\psi$); площадь $Ob'''b''\varphi O$ определяет энергию, сообщаемую двигателем подъемной машине за

* Разность между значениями скоростей $V'$ и $V$ составляет $\backsim$ 4—6%.

Случай, характеризуемый диаграммами на фиг. 61 может быть отнесен не столько к сложному случаю управления машиной, сколько к более сложному режиму работы подъемного двигателя.

период $t_\gamma$, в продолжение которого действует положительная статическая нагрузка. Площадь $\varphi\psi d_0 d''\varphi$ представляет энергию, сообщаемую асинхронной машине отрицательной статической нагрузкой; площадь $\varphi\psi d' d''\varphi$ выражает потери энергии в указанной машине, работающей в качестве генератора; площадь $\psi d_0 d'\psi$ определяет энергию, возвращаемую асинхронной машиной (генератором) в сеть * Площадь $Ob''b'''O$ равна площади $d''dud''$

Значения отдельных мощностей, выраженных в зависимости от соответственных усилий и скоростей, представлены на нижней диаграмме фиг. 61.

---

В заключение произведенного выше анализа физико-механических свойств асинхронного подъемного двигателя считаем необходимым высказать нижеследующие соображения.

При *ручном* управлении указанным двигателем мы воздействуем непосредственно на его момент вращения (усилие), в связи с чем изменение скорости, получаемое в соответственные периоды работы двигателя под реостатом, зависит от характера кинематических и динамических соотношений, присущих определенной системе подъема.

*Наиболее удобный способ ручного управления подъемной машиной* при работе двигателя под реостатом в периоды пуска и замедления, независимо от системы подъема, состоит в поддержании *постоянства* развиваемого двигателем *момента вращения* (усилия). ** Означенное положение относится как к моторному режиму, так и к режиму электрического торможения противотоком. Практическое постоянство усилия, развиваемого подъемным двигателем, независимо от величины статического момента сопротивления, получается также при автоматизации пусковых операций посредством реле *тока* для случаев контакторного управления. При этом, *в случае изменения статического момента сопротивления, при постоянстве развиваемого подъемным двигателем момента вращения, будет* соответственно *изменяться пусковое ускорение*, а следовательно, *и период пуска.*

Уместно также отметить наблюдаемое на практике несоответствие между наивыгоднейшим способом управления машиной и методами расчета подъемных установок, состоящее в следующем.

Часто принимают для систем подъема—неуравновешенной и с тяжелым хвостовым канатом—изменение скорости в периоды пуска и замедления происходящим по закону прямой линии, т. е. предполагают строгое соблюдение трапецоидальной тахограммы; в связи с этим движущие усилия в периоды пуска и замедления должны изменяться по закону соответственных парабол. При расчетных диаграммах указанные параболы для простоты обычно заменяют наклонными прямыми линиями, что можно признать вполне допустимым, ввиду сравнительно незначительной кривизны этих парабол. Однако, управлять вручную асинхронным двигателем таким образом, чтобы он развивал переменный момент вращения, *** несравненно труднее, чем поддерживать указанный момент постоянным, для чего удобным критерием могут служить показания амперметра. **** Таким образом, очевидно, что если при расчете подъема исходить из условий переменного момента в период *пуска*, обусловливающего изменение ско-

---

* Характер работы асинхронной машины в продолжение периода $t_2$ на диаграмме мощностей (фиг. 61) представлен ориентировочно.

** См. фиг. 10, 13, 16, 17, 18, 27, 28, 29, 30, 31, 38, 40.

*** Падающий момент при неуравновешенной системе подъема, возрастающий момент при системе с тяжелым хвостовым канатом.

**** При постоянном моменте стрелка амперметра, если и не стоит неподвижно, то во всяком случае должна колебаться около некоторого постоянного среднего значения, тогда как при переменном моменте даже и это среднее показание отсутствует.

рости в указанный период по закону прямой линии, то подобный режим на практике может быть соблюден лишь при контакторном управлении с применением реле *времени*; операции пуска при этом предполагаются автоматизированными. Практическое осуществление указанного режима характеризуется преимущественно диаграммами, представленными на фиг. 19, 20, 32, 33, 34, 41. *

Следует также отметить, что в случае применения кроме реле времени также реле тока, включенного в цепь последней ступени роторного реостата, ** процесс пуска будет происходить по комбинированному принципу, обусловленному действием как реле тока, так и реле времени, причем величина пускового момента так же, как и в схемах только с реле времени (без дополнительного реле тока), будет зависеть исключительно лишь от величины статического момента сопротивления, каковое обстоятельство обусловливает в сущности принцип пуска по времени, а не по моменту (току), среднее значение которого, оставалось бы практически постоянным при различных нагрузках лишь в схемах только с реле тока (без реле времени).

Очевидно, что в случае *автоматизации пуска по времени, с изменением положительного статического момента сопротивления будет изменяться* соответственным образом и *момент вращения подъемного двигателя* таким образом, что как *период пуска*, так и *пусковое ускорение, будут оставаться постоянными*, обусловленными данной настройкой реле времени.

Что касается работы подъемного двигателя в период пуска (подгона) при режиме *отрицательной* статической нагрузки в случае, если собственное ускорение системы меньше заданного ускорения, то необходимо иметь в виду, что величина получаемого при этом пускового ускорения оказывается зависящей не только от действия двигателя, но и от указанной нагрузки, в результате чего это ускорение может оказаться больше, чем при режиме подъема, осуществляемом в случае положительной статической нагрузки, несмотря на одинаковую в обоих случаях регулировку реле времени. Получаемое при этом отклонение действительного ускорения от заданного будет тем больше, чем тяжелее спускаемый груз. При этом скорость спуска достигнет своей полной величины раньше, чем сработают все реле времени; таким образом, полная скорость получится при частично включенном в цепь ротора сопротивлении, причем, если бы отсутствовал центробежный выключатель 100%, замыкающий накоротко обмотку ротора, то скорость по достижении двигателем синхронизма продолжала бы некоторое время расти, а затем, после достижения определенного максимального значения, в связи с выключением соответственных ступеней роторного реостата, стала бы снижаться до тех пор, пока в результате срабатывания последнего реле, обусловливающего полное выключение роторного реостата, не достигла бы нормальной сверхсинхронной величины. ***

## II. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И УСТАВОК РЕЛЕ ВРЕМЕНИ ****

Приводимый ниже метод расчета пусковых сопротивлений предполагает наличие автоматизации пуска при помощи реле ускорения (времени)

* См. также фиг. 14, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 26.

** См. стр. 206 и 211, а также схему на фиг. 63.

*** Графическая интерпретация изменения скорости при осуществлении этого режима ориентировочно представлена на фиг. 182 (стр. 187) книги коллектива авторов. „Горная Электротехника" изд. 1939 г. (Часть I, составленная доц. А. Е. Максимовым).

**** См. Ф. Н. Шклярский. „Расчет пусковых сопротивлений и уставок реле ускорения для асинхронного подъемного двигателя". (Записки Ленинградского Горного Института. Том XIV, 1941 г.)

для трех-и четырехпериодных тахограмм применительно к простым клетям и скипам с донной разгрузкой. Аналогичный способ может быть применен соответственным образом также при четырех-и пятипериодных тахограммах для случая опрокидных подъемных сосудов.

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 $E_{ном}$;* c) номинальный ток ротора $J_{ном}$; d) к. п. д. двигателя; e) синхронное $n_s$ 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 $\theta$, применительно к заданной тахограмме.

Согласно приводимому ниже графическому методу определения пусковых сопротивлений необходимо прежде всего построить механические характеристики двигателя: естественную, соответствующую собственному сопротивлению обмотки ротора, и исскуственные, 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.

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 фиг. 62 для случая *неуравновешенной* системы подъема линией *DFE*.

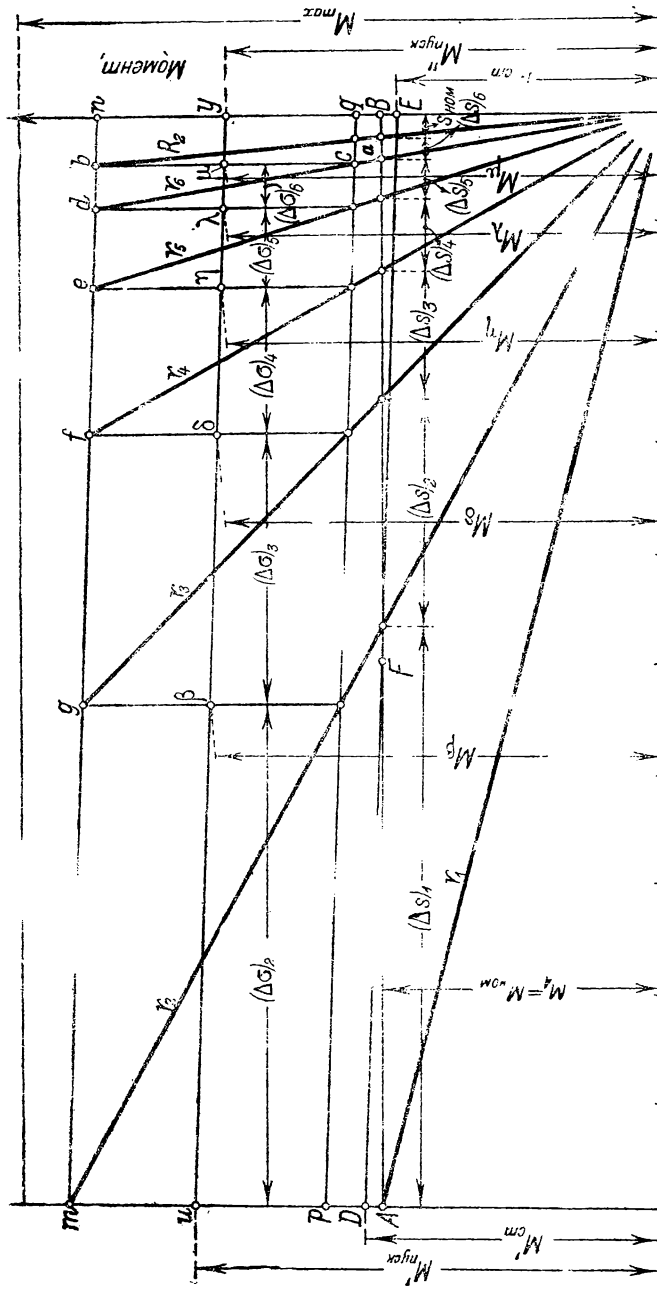
Диапазоном колебаний пускового момента вращения задаются ориентировочно, в зависимости от числа ступеней реостата; после нескольких пробных построений удается установить более или менее точную величину указанного диапазона.

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, на-

---

* Значение $E_{ном}$ соответствует неподвижному ротору двигателя, находящегося под напряжением.

пример, при небольших значениях отношения $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$, порядка 1,8—2,1, может оказаться недостаточным пяти или шести ступеней реостата, ввиду




Фиг. 62. Построение пусковых характеристик асинхронного подъемного двигателя.

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 фиг. 62. 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. * Исходные данные, необходимые для построения последней характеристики, определяются следующим, образом.

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

$$M_{но.} = \frac{P_{ном}}{n_{ном}} \quad 975, \qquad (271)$$

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

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

$$s_н \quad \frac{n_s - n_{ном}}{n_s}, \qquad (272)$$

где $n_s$ — 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.

Продолжая подобным образом дальнейшее построение, получим соответственные искусственные характеристики *Oe* ($r_5$), *Qf* ($r_4$), *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 ~1/3 номинального момента, каковое значение в отдельных случаях может ока-

* В предположении, что некоторая кривизна характеристики при этом не принята во внимание.

заться 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:

$$R_2 = \frac{s_{ном} \cdot E_{ном}}{\sqrt{3}\, J_{ном}} \qquad (273)$$

Входящие в последнее выражение величины: номинальное напряжение ротора $E_{ном}$ в V и номинальный роторный ток $J_{ном}$ в A даются в соответственных каталогах для каждого двигателя; $s_{ном}$ определяется из выражения (272).

Величины сопротивлений отдельных ступеней роторного реостата $(\Delta r)_i = r_i - r_{i+1}$, * 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:

$$(\Delta r)_i\ \% = (\Delta s)_i\ \%. \qquad (274)$$

В свою очередь, величины $(\Delta s)_i$ могут быть определены *измерением* соответственных отрезков $(\Delta s)_1 \ldots (\Delta s)_6$ на диаграмме фиг. 62. При этом должно иметь место равенство:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta s)_i = 1 - s_{ном}. \qquad (275)$$

Сопротивление каждой ступени в омах получается из выражения

$$(\Delta r)_i = \frac{(\Delta r)_i\ \%}{100} \quad R_{ном}, \qquad (276)$$

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

$$R_{ном} = \frac{E_{ном}}{\sqrt{3}\, J_{ном}} \qquad (277)^{**}$$

Полное сопротивление роторного реостата $R_{реост}$:

$$R_{реост} = r_1 - R_2 = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta r)_i, \qquad (278)$$

где $n$ — число ступеней реостата.

---

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

Выражение (277) получается из выражения (273) при скольжении $s_{ном} =$ 1.

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 $r_1$, на которую должно быть подключено к последней ступени роторного реостата *токовое реле*, лимитирующее пусковой ток, то для определения ее можно пользоваться выражением:

$$\frac{V_{отп}}{J'} \tag{286}$$

где $V_{отп}$—напряжение отпуска токового реле, задается в пределах 10—15 V; $J_p'$—ток ротора двигателя, при котором реле замыкает свои контакты, может быть принят превышающим на $\backsim 20-40\%$ величину нормального пускового тока ротора $(J_p)_н$, в соответствии с диапазоном его колебаний, зависящим в свою очередь от количества ступеней реостата.

Пример 29.

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

Двигатель завода „Электросила" типа *АМ* 157-8. Номинальная мощность $P_{ном}=380\ kW$; номинальное напряжение, подводимое к статору,—6000 V; синхронное число оборотов в минуту $n_s=750$; номинальное число оборотов в минуту $n_{ном}=735$. К.п.д. двигателя $\eta\%=91{,}5\%$. Отношение моментов вращения $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}=2{,}3$. Номинальное напряжение ротора $E_{ном}=$ $=527$ V; номинальный ток ротора $J_{ном}=445$ 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—$M'_{пуск}=840$ *кг.м*, в конце периода пуска — $M''_{пуск}=780$ *кг.м*. Статический момент сопротивления: в начале периода пуска—$M'_{ст}=540$ *кг.м*, в конце периода—$M''_{ст}=480$ *кг.м* (фиг. 62).

Количество ступеней (секций) реостата, включая начальную степень, при которой осуществляется ревизия каната, принимается равным *шести.**

Задаемся диапазоном колебаний пускового момента вращения в размере $\backsim 30\%$ 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: $M'_{пуск}(1+0{,}3)=840\cdot 1{,}3=1090$ *кг.м*;

---

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, отношением $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}=2{,}1$ 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. 200) положение, согласно которому при заданном количестве ступеней реостата не всякий двигатель определенной мощности может быть применен для обслуживания данной подъемной установки.

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: $M_{пуск} + 250 = 780 + 250 = 1030$ *кг.м*. Предельные нижние значения пускового момента вращения определяются линией $pq$, расположенной под линией $uy$ на таком же от нее расстоянии, на каком от этой последней отстоит линия $mn$; в данном случае точке $p$ соответствует момент:

$$M'_{пуск}(1 - 0.3) = 840 \cdot 0{,}7 = 590 \text{ кг.м};$$

точке $q$ соответствует момент:

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

Номинальный момент вращения, согласно выражению (271):

$$M_{ном} = \frac{380}{735} \quad 975 = 504 \text{ кг.м.}^*$$

Номинальное скольжение, определяемое выражением (272):

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

На основании последних данных на фиг. 62 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 $M_{ном} = 504$ *кг.м*, который оказался меньше начального значения статического момента сопротивления $M'_{ст} = 540$ *кг.м*.

Собственное сопротивление обмотки ротора, согласно выражению (273):

$$R_2 = \frac{0{,}02 \quad 527}{1{,}73 \quad 445} = 0{,}014 \text{ Ω}.$$

Номинальное сопротивление цепи ротора, согласно выражению (277):

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

Измеряя на диаграмме фиг. 62 отрезки скольжения $(\Delta s)_i$ и принимая во внимание выражение (274) для определения процентов сопротивлений $(\Delta r)_i$ отдельных ступеней реостата, получаем:

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

---

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

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

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

Согласно выражению (275) в качестве проверки получаем:

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

$$= 1 - s_{ном} = 1 - 0{,}02.$$

Сопротивление $(\Delta r)_i$ каждой ступени в омах, согласно выражению (276):

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

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

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

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

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

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

Полное сопротивление реостата $R_{реост}$ согласно выражению (278):

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

Из диаграммы на фиг. 62 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:

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

Согласно выражению (279) определяем промежутки времени $(\Delta t)_i$ между выключениями смежных ступеней реостата.

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

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

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

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

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

Согласно выражению (289), в качестве проверки получаем:

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

Уставки $(t_p)_i$ соответственных реле ускорения $(РУ)i$ можем получить, пользуясь выражением (281):

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 (282):
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:

---

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.

для первой ступени — при нормальном пуске

$$(ПР)_1 = \frac{\tau_1}{T'} = \frac{0{,}75}{68} = 0{,}011; \quad (ПР)_1\% = 1{,}1\%;$$

для второй ступени

$$(ПР)_2 = \frac{\tau_2}{T'} = \frac{6{,}26}{68} = 0{,}092; \quad (ПР)_2\% = 9{,}2\%;$$

для третьей ступени

$$(ПР)_3 = \frac{\tau_3}{T'} = \frac{9{,}32}{68} = 0{,}137; \quad (ПР)_3\% = 13{,}7\%;$$

для четвертой ступени

$$(ПР)_4 = \frac{\tau_4}{T'} = \frac{10{,}97}{68} = 0{,}161; \quad (ПР)_4\% = 16{,}1\%;$$

для пятой ступени

$$(ПР)_5 = \frac{\tau_5}{T'} = \frac{11{,}89}{68} = 0{,}175; \quad (ПР)_5\% = 17{,}5\%;$$

для шестой ступени

$$(ПР)_6 = \frac{\tau_6}{T'} = \frac{12{,}44}{68} = 0{,}18; \quad (ПР)_6\% = 18\%.$$

Зная относительную продолжительность включения для каждой ступени реостата, согласно выражению (284) можем определить величину эффективной силы тока, проходящего через соответственные ступени; с указанной целью необходимо предварительно определить входящее в выражение (285) отношение $\frac{(M_{пуск})_i}{M_{ном}}$ для каждой ступени реостата. В применении к диаграмме на фиг. 62 имеем:
для первой ступени

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

следовательно,

$$\frac{M(_{пуск})_1}{M_{ном}} = \frac{504}{504} = 1;$$

для второй ступени

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

для третьей ступени

$$(M_{пуск})_3 = M_B = 815 \ кг.м; \quad \frac{M(_{пуск})_3}{M_{ном}} = \frac{815}{504} = 1{,}62;$$

для четвертой ступени

$$(M_{пуск})_4 = M_6 = 800 \ кг.м; \quad \frac{(M_{пуск})_4}{M_{ном}} = \frac{800}{504} = 1{,}59;$$

для пятой ступени

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

для шестой ступени

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

при выключении всего реостата

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

Согласно выражению (285) получаем значения силы роторного тока:
для первой ступени

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

для второй ступени

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

для третьей ступени

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

для четвертой ступени

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

для пятой ступени

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

для шестой ступени

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

при выключенном реостате

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

Согласно выражению (284) получаем эффективную (эквивалентную) силу тока для соответственных ступеней реостата:
для первой ступени

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

для второй ступени

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

для третьей ступени

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

для четвертой ступени

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

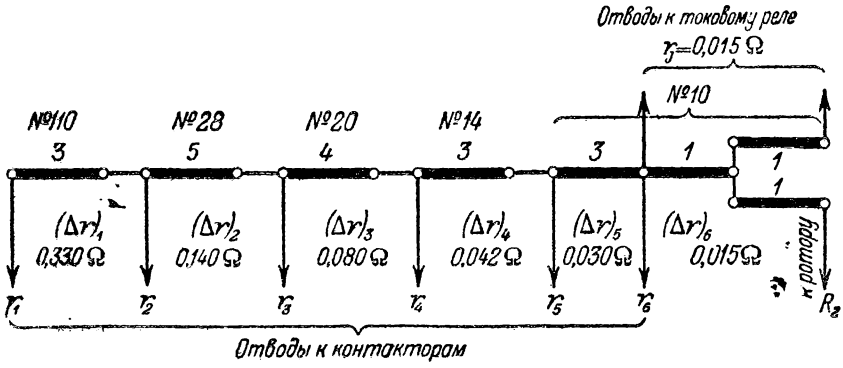
для пятой ступени

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

для шестой ступени

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

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 фиг. 63, где цифры над




Фиг. 63. Схема соединения пусковых сопротивлений, составленных из стандартных спиралей ХЭМЗ.

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 | 214 | 1,1% | 2,5% |
| $(\Delta r)_2 = r_2 - r_3$ | 0,144 | $0{,}028 \times 5 = 0{,}140$ | 28 | 5 | — | 223 | 245 | 9,2% | 12,5% |
| $(\Delta r)_3 = r_3 - r_4$ | 0,079 | $0{,}020 \times 4 = 0{,}080$ | 20 | 4 | — | 267 | 289 | 13,7% | 12,5% |
| $(\Delta r)_4 = r_4 - r_5$ | 0,044 | $0{,}014 \times 3 = 0{,}042$ | 14 | 3 | — | 283 | 277 | 16,1% | 20% |
| $(\Delta r)_5 = r_5 - r_6$ | 0,027 | $0{,}010 \times 3 = 0{,}030$ | 10 | 3 | | 295 | 328 | 17,5% | 20% |
| $(\Delta r)_6 = r_6 - R_2$ | 0,014 | $0{,}010 + \frac{0{,}010}{2} = 0{,}015$ | 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 к ступени $(\Delta r)_6$ роторного реостата

*токовое реле*; согласно выражению (286) получаем:

$$r_J = \frac{V_{отп}}{1{,}3(J_p)_н} = \frac{13{,}6}{1{,}3 \cdot 700} = 0{,}015\ \Omega,$$

где нормальный пусковой ток ротора $(J_p)_н \cong 700$ А принят, как некоторое среднее значение величин $(J_p)_i$. Согласно схеме на фиг. 63 подключение токового реле произведено на сопротивление $r_J = 0{,}015\ \Omega$, обусловленное всей ступенью $(\Delta r)_6$.

## III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОДЪЕМНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эффективная мощность подъемного двигателя, как работающего с периодической нагрузкой, должна удовлетворять условиям предельного его нагревания эквивалентным (средним квадратичным) током; последний обусловливает ту постоянную нагрузку, которую двигатель имел бы, работая непрерывно в течение длительного времени и выделяя при этом то же количество тепла, которое он выделяет при прерывистой и непостоянной нагрузке. Так как сила тока двигателя является функцией развиваемого им момента вращения или усилия, то общее выражение эффективной мощности $P_m$ подъемного двигателя (на его валу) может быть представлено следующим образом:

$$P_m\,(\text{kW}) = \frac{1}{102} \sqrt{\frac{V^2 \sum_{i=1}^{i=n} F^2_{m(i)} \frac{1}{\eta_z^2} t_{m(i)} + V_g^2 \sum_{i=1}^{i=k} F_g^2{}_{(i)} \eta^2_z \eta^4_{g(i)} t_{g(i)} + V_s^2 \sum_{i=1}^{i=t} (F_{b(i)} \eta_м)^2 \cdot \frac{\eta^2_{b(i)}}{\eta^2_{g(i)}} t_{b(i)}}{\sum_{i=1}^{i=n+k+l} t_i + \frac{1}{3}\Theta}} \qquad (287)$$

где $V$—скорость подъема, соответствующая наибольшей возможной скорости двигателя при моторном режиме, независимо от того, с какой скоростью (полной или уменьшенной) он вращается в действительности; $V_g \cong (1{,}04 - 1{,}06)\,V$ — скорость при генераторном режиме; $V_s$ — скорость подъема, соответствующая синхронной скорости двигателя; $V$, $V_g$ и $V_s$ выражаются в *м/сек*; $F_{m(i)}$—положительные усилия на окружности барабана, имеющие место в отдельные периоды $t_{m(i)}$ моторного режима, $n$ — число указанных периодов; $F_{g(i)}$ — отрицательные тормозные усилия на окружности барабана в периоды $t_{g(i)}$ генераторного режима, $k$—число этих периодов; $F_{b(i)}$—тормозные усилия на окружности барабана в периоды $t_{b(i)}$ режима противотока, $l$ — число последних периодов; $F_{m(i)}$, $F_{g(i)}$ и $F_{b(i)}$ выражаются в *кг*; $\eta_z$—к. п. д. зубчатой передачи, $\eta_{g(i)}$ и $\eta_{b(i)}$ — к. п. д. двигателя в соответственные периоды его работы генератором и на противотоке; $\eta_{g(i)}$ — к. п. д. статора двигателя, работающего на противотоке; $\eta_м = \eta_{мех} \cdot \eta_z$ — к. п. д., учитывающий механические потери в двигателе, а также потери в зубчатой передаче. $\Theta$ — пауза между двумя следующими друг за другом подъемами; периоды $t_{m(i)}$, $t_{g(i)}$ и $t_{b(i)}$, а также пауза $\Theta$ выражаются в *сек*.

Эффективная мощность подъемного двигателя может быть также выражена непосредственно в зависимости от значений мощности $P_i$ на

валу барабана в отдельные периоды подъема. По аналогии с выражением (287) получим:

$$P_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_{m(i)}^2 \frac{1}{\eta_z^2} t_{m(i)} + \sum_{i=1}^{i=k} P_{g(i)}^2 \eta_z^2 \eta_{g(i)}^4 t_{g(i)} + \sum_{i=1}^{i=l} P_{b(i)}^2 \frac{\eta_{b(i)}^2}{\eta_{\sigma(i)}^2} t_{b(i)}}{\sum_{i=1}^{i=n+k+l} t_i + \frac{1}{3}\Theta}}, \quad (288$$

где: $P_{m(i)}$ — положительные мощности на валу барабана, соответствующие наибольшей возможной скорости двигателя в отдельные периоды $t_{m(i)}$ моторного режима, $P_{g(i)}$ — отрицательные мощности на валу барабана в периоды $t_{g(i)}$ генераторного режима, $P_{b(i)} \frac{1}{\eta_{\sigma(i)}} = (F_{b(i)}\eta_M) V_s \cdot \frac{1}{\eta_{\sigma(i)}}$ — мощности, потребляемые двигателем из сети в периоды $t_{b'(i)}$ его работы на противотоке. Величины $\eta_z$, $\eta_{g(i)}$, $\eta_{b(i)}$, $\eta_{\sigma(i)}$, $\eta_M$, $n$, $k$, $l$, $\Theta$, $F_{b(i)}$, $V_s$ имеют те же значения, что и в выражении (287).

Наличие во втором члене числителя подкоренной величины выражений (287) и (288) множителя $\eta_{g(i)}^4$, характеризующего генераторный режим, обусловлено следующими соображениями.

При работе двигателя в качестве генератора, к валу которого приложена механическая мощность $P_g$, существует соотношение:

$$P_э = P_g \eta_g,$$

где $P_э$ — электрическая мощность на зажимах двигателя, $\eta_g$ — его к. п. д. при генераторном режиме.

В случае работы двигателя в качестве мотора, развивающего механическую мощность $P_m$, при той же электрической мощности $P_э$ на его зажимах, имеет место соотношение:

$$P_э = P_m \frac{1}{\eta_m},$$

где $\eta_m$ — к. п. д. двигателя при моторном режиме.

При равенстве электрических мощностей $P_э$ при обоих режимах можем написать:

$$P_э = P_g \eta_g = P_m \frac{1}{\eta_m},$$

откуда получаем:

$$\frac{P_m}{P_g} = \eta_m \eta_g.$$

Или, принимая ориентировочно $\eta_m \cong \eta_g$, окончательно получаем:

$$\frac{P_m}{P_g} = \eta_g^2.$$

Таким образом, механическая мощность двигателя, работающего генератором, при одной и той же электрической мощности, обусловливающей его нагрев, в $\frac{1}{\eta_g^2}$ раз больше механической мощности двигателя при его

работе на моторном режиме. Отношение $\eta_g^2$, будучи введено под корень квадратный, даст величину $\eta_g^4$.

Формулы (287) и (288) могут быть соответственным образом применены также в случае, когда режимы подъема и спуска взаимно чередуются; при этом должна быть учтена двойная пауза $\Theta$.

Относительно выражений (287) и (288) следует также отметить, что при наличии в продолжение одного цикла подъема моторного и генераторного режимов, при переходе от пускового периода к периоду полного хода получается некоторый разрыв, обусловленный разностью между скоростями $V$ и $V_g$, однако указанное явление не имеет большого практического значения. Способ компенсации упомянутого разрыва применительно к диаграммам на фиг. 55 приведен ниже.

Выражение (288) применительно к диаграмме мощности на фиг. 48 представляется следующим образом:

$$P_m = \frac{1}{\eta_{lz}} \sqrt{\frac{\frac{P_1'^2 + P_1''^2 + P_1'P_1''}{3} \cdot t_1 + \frac{P_2^2 + P_2''^2 + P_2'P_2''}{3} \cdot t_2}{t_1 \quad t_2 + t_3 + \frac{1}{3}\Theta}}. \qquad (289)$$

Выражение (287) в применении к диаграммам, представленным на фиг. 55 принимает вид:

$$P_m\,(\text{kw}) = \frac{1}{102} \sqrt{\frac{F_1^2 V^2 \quad \frac{1}{\eta_{lz}^2} t_1 + \frac{F_s'^2 + F_s''^2 + F_s'F_s''}{3} V_g^2 \eta_{lz}^2 \eta_{m2}^4 t_2 + (F_\beta \eta_m)^2 V_s^2 \quad \frac{\eta_{lb}^2}{\eta_{l\sigma}^2} t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{3}\Theta}} \qquad (290)$$

В выражении (290) влияние разрыва между скоростями $V$ и $V_g$ компенсировано тем, что период $t_1 = t_r + t_m'$ (фиг. 55) больше промежутка времени $t_r$, в конце которого скорость достигает значения $V$, а период $t_2$ больше времени, в течение которого имеет место скорость $V_g$.

Формула (287) в применении к диаграмме на фиг. 31* и 58-b, в предположении действия механического тормоза в период $t_3$, принимает вид:

$$P_m\,(\text{kw}) = \frac{V}{102\eta_z} \sqrt{\frac{F_1^2(t_0 + t_1) + \frac{F_2' + F_2''^2 + F_2'F_2''}{3} \cdot t_2 + \frac{F_4'^2 + F_{b\tau}^2 + F_4'F_{b\tau}}{3} \cdot \tau_1 + \frac{7}{3} F_{b\tau}^2 \tau_2}{t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \frac{1}{3}\Theta}}. \qquad (291)^*$$

Американская фирма *GEC* при трехпериодной тахограмме для *знаменателя* подкоренной величины в формуле для эффективной мощности $P_m$ принимает выражение **.

$$\frac{1}{2} t_1 + t_2 + \frac{1}{2} t_3 + \frac{1}{4}\Theta. \qquad (B)$$

---

* На фиг. 31 значения $F'_2 = F_{s2}'$ и $F_2'' = F_{s2}''$,

** Эффективная мощность двигателя, расчитанная по методу фирмы *GEC*, оказывается на $\backsim 10 - 12\%$ больше мощности, получаемой по формулам (287) и (288). Выражением (В) для своих расчетов пользуется также ХЭМЗ.

Коэфициенты $\frac{1}{2}$ при $t_1$ и $t_3$, а также $\frac{1}{4}$ при $\Theta$, установлены для двигателей указанной фирмы эмпирическим путем на основании следующих соображений. Условное уменьшение периода $t_1$ в *знаменателе* подкоренной величины, характеризующем режим *охлаждения* двигателя, произведено вследствие того, что охлаждение (вентилирование) двигателя в этот период, при большой силе пускового тока и при неполной скорости вращения, является недостаточным. В период $t_2$ сила тока, а следовательно, и нагревание двигателя, меньше, чем в период $t_1$, скорость же вращения достигает максимального значения, в связи с чем условия охлаждения двигателя являются более благоприятными, чем в период $t_1$; ввиду этого период $t_2$ оставлен без уменьшения. Период $t_3$ уменьшен, так как, хотя сила тока, потребляемая двигателем в этот период, или незначительна, или совсем отсутствует (в предположении отсутствия торможения противотоком), тем не менее в первые два периода двигатель уже значительно нагрелся, условия же охлаждения, в связи с убыванием скорости, ухудшились. Наконец, в течение паузы $\Theta$ нагретый за периоды работы двигатель стоит неподвижно, а потому охлаждение его является недостаточным; в связи с этим пауза в формуле мощности соответственно уменьшена.

Формула (287) применительно к диаграммам на фиг. 34, в предположении применения для знаменателя подкоренной величины выражения (*B*) фирмы *GEC* и при $F_4' \cong 0$ принимает вид:

$$P_{m(\mathrm{kW})} = \frac{V}{102\eta_{1z}} \sqrt{\frac{\frac{F_0'^2 + F_0''^2 + F_0' F_0''}{3} t_0 + \frac{F_1'^2 + F_1''^2 + F_1' F_1''}{3} t_1 + \frac{F_2'^2 + F_2''^2 + F_2' F_2''}{3} \cdot t_2}{\frac{1}{2}(t_0 + t_1) + t_2 + \frac{1}{2}(t_3 + t_4) + \frac{1}{4}\Theta}}. \tag{292}$$

Мощность двигателя должна быть проверена на допустимую перегрузку, обусловленную как максимальным усилием, имеющим место в период подъема, так и максимальным экстренным усилием, получаемым при производстве маневров, в случае наличия последних.

Перегрузка двигателя при *моторном* режиме определяется из выражения:

$$\gamma = \frac{F_{max}}{F_{ном}} \leqslant 1{,}8, \tag{293}$$

где $F_{max}$ — наибольшее усилие на окружности барабана, имеющее место в период подъема; $F_{ном}$ — усилие, соответствующее номинальной мощности $P_{ном}$ подъемного двигателя, определяется из выражения:

$$F_{ном} = \frac{102 P_{ном} \eta_{1z}}{V} \tag{294}$$

где $V$ — наибольшая скорость подъема $\eta_{1z}$ — к. п. д. зубчатой передачи.

Так как до окончательного выбора двигателя его номинальная мощность $P_{ном}$ еще неизвестна, перегрузку двигателя предварительно можно определять из выражения:

$$\gamma = \frac{F_{max}}{F_m} \leqslant 1{,}8,^* \tag{295}$$

* 1,8 является средним значением допускаемой перегрузки; в действительности величина $\gamma$ для различных типов двигателей может колебаться между значениями 1,6 и 2.

где $F_m$—эффективное усилие, отнесенное к окружности барабана, определяется из выражения:

$$F_m = \frac{102 P_m \eta_z}{V}, \tag{296}$$

где $P_m$ — эффективная мощность двигателя в киловаттах, получаемая на основании выражения (287); $V$—наибольшая скорость подъема, $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи.

Перегрузка двигателя предварительно может быть также определена из выражения:

$$\gamma = \frac{P_{max}}{P_m \eta_z} \leqslant 1{,}8, \tag{297}$$

где: $P_{max}$—наибольшая мощность на валу барабана, имеющая место в период подъема; $P_m$— мощность двигателя, определяемая из выражения (288); $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи.

Перегрузка двигателя при *генераторном режиме* и при работе *противотоком* определяется из выражения (293), где

$$F_{ном} = \frac{102 P_{ном}}{V \eta_z}, \tag{294а}$$

или, предварительно, согласно выражению (295), в котором:

$$F_m = \frac{102 P_m}{V \eta_z}. \tag{296а}$$

Указанная перегрузка может быть также получена на основании выражения:

$$\gamma = \frac{P_{max} \cdot \eta_z}{P_m} \leqslant 1{,}8.* \tag{297а}$$

Значения величин, входящих в выражения (294а), (296а), (297а), соответствуют таковым в выражениях (294), (296), (297).

Следует отметить, что хотя асинхронные двигатели нормально допускают несколько бо́льшую перегрузку (2 — 2,5), обусловленную величиной опрокидного момента, однако в рассматриваемом случае необходимость принятия величины $\gamma \leqslant 1{,}8$ вызвана теми соображениями, чтобы, несмотря на возможные колебания напряжения в питающей сети, двигатель мог преодолеть максимальный момент сопротивления с нормальным ускорением. При этом необходимо иметь в виду, что момент вращения, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату приложенного к нему напряжения.

В случае получения перегрузки $\gamma > 1{,}8$, необходимо попытаться соответственным образом изменить кинематику и динамику подъема, или даже самую систему подъема, например, путем перехода от неуравновешенной системы к уравновешенной, с тем, чтобы получить $\gamma \leqslant 1{,}8$. Если бы почему либо произвести указанные изменения представилось невозможным или нерациональным, то расчетная мощность двигателя должна быть увеличена до значения, определяемого выражением:

$$P_m' = P_m \cdot \frac{\gamma}{1{,}8}, \tag{298}$$

---

* См. сноску на стр. 216.

где $P_m$—мощность, определяемая выражениями (287) и (288); $\gamma$ получается соответственно из выражений (295), (297), (297а).

Необходимо при этом иметь в виду, что двигатель с мощностью $P_m' > P_m$ будет работать несколько недогруженным, каковое обстоятельство послужит причиной как некоторого ухудшения $\cos\varphi$, так и уменьшения, правда незначительного, коэфициента полезного действия двигателя.

Перегрузка двигателя при экстренных моментах определяется из выражения:

$$\gamma' = \frac{F_{extr}}{F_{ном}} \leqslant 2, \tag{299}$$

где $F_{extr}$ — наибольшее экстренное усилие, отнесенное к окружности барабана, $F_{ном}$—усилие, определяемое из выражения (294).

В случае получения значений $\gamma' > 2$, мощность двигателя должна быть увеличена до значения, определяемого выражением:

$$P_m'' = \frac{F_{extr} V}{2\eta_z}, \tag{300}$$

где $V$—наибольшая скорость подъема, $\eta_z$—к. п. д. зубчатой передачи.

Увеличение мощности до указанного значения $P_m''$ может быть допущено, однако, лишь в том случае, если $\gamma' \leqslant 2{,}5$, что соответствует предельному увеличению мощности двигателя на 25 %.*

Получаемое при $\gamma' > 2{,}5$ увеличение мощности двигателя является нерациональным как в отношении ухудшения $\cos\varphi$, так и уменьшения к. п. д. двигателя. В случае получения $\gamma' > 2{,}5$ экстренные моменты, получаемые при производстве маневров, должны быть устраняемы при помощи соответственных приспособлений, например, применением кулаков Штаусса, устройством качающихся площадок и т. п.; экстренные моменты, могущие иметь место при производстве навески канатов, могут быть избегнуты, например, путем отцепки нижней клети.

Пример 30.

В применении к диаграмме двигателя на фиг. 48 определить мощность подъемного двигателя для следующих данных. Отнесенные к полной скорости подъема мощности на валу барабана:

$$P'_1 = 576\,kW, \quad P''_1 = 535\,kW, \quad P'_2 = 326\,kW, \quad P_2'' = 200\,kW;$$

периоды: $t_1 = 12\,сек$, $t_2 = 20\,сек$, $t_3 = 16\,сек$, $\Theta = 20\,сек$, к. п. д. зубчатой передачи $\eta_z = 0{,}95$.

Согласно выражению (289) получаем эффективную мощность двигателя

$$P_m = \frac{1}{0{,}95}\sqrt{\frac{\frac{576^2+535^2+576\cdot 535}{3}\,12 + \frac{326^2+200^2+326\;200}{2}\,20}{12+20+16+\frac{1}{3}\cdot 20}};$$

$$P_m = 322\ \text{kW}.$$

Согласно выражению (297)

$$\gamma = \frac{576}{322\cdot 0{,}95} = 1{,}88 > 1{,}8.$$

* $\frac{2{,}5-2}{2}\,100\% = 25\%$.

Ввиду этого расчетная мощность двигателя должна быть увеличена согласно выражению (298), до значения:

$$P_m' = \frac{322 \cdot 1{,}88}{1{,}8} = 336\ kW.$$

Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$ выбирается по соответственному каталогу, как ближайшая бо́льшая по отношению к $P'_m$ с принятием во внимание соображений, высказанных выше при определении пусковых сопротивлений (стр. 200 и 206); после этого может быть установлено окончательное значение перегрузки двигателя $\gamma$ согласно выражению:

$$\gamma = \frac{P'_1}{P_{ном} \cdot \eta_z}$$

Пример 31.

В применении к диаграммам на фиг. 55 и к данным примера 28 определить мощность подъемного двигателя. Кроме того дано: $\eta_b = 0{,}92$ $\Theta = 20$ *сек*.

Согласно выражению (290) получаем:

$$P_m = \frac{1}{102} \sqrt{\frac{1140^2 \cdot (7{,}6)^2 \cdot \frac{1}{(0{,}95)^2} \cdot 11{,}9 + \frac{1329^2 + 4890^2 + 1329 \cdot 4890}{3} \times}{\times 8^2 \cdot (0{,}95)^2 \cdot (0{,}92)^4 \cdot 31{,}8 + (8420 \cdot 0{,}93)^2 \cdot (7{,}8)^2 \cdot \frac{(0{,}92)^2}{(0{,}96)^2} \cdot 7{,}3}{11{,}9 + 31{,}8 + 7{,}3 + \frac{1}{3}\ 20}};$$

$$P_m = \frac{1}{102} \cdot 26020 = 255\ kW.$$

Перегрузка двигателя определяется согласно выражению (293), в котором $F_{max} = F_3 = -8420$ *кг* имеет место в период $t_3$ работы двигателя на режиме противотока; $F_m$ согласно выражению (296а) равно:

$$F_m = \frac{102\ \ 255}{7{,}6 \cdot 0{,}95} \cong 3600\ кг.$$

Тогда

$$\gamma = \frac{8420}{3600} = 2{,}34 > 1{,}8.$$

Расчетная мощность двигателя должна быть увеличена, согласно выражению (298), до значения:

$$P_m' = \frac{255 \cdot 2{,}34}{1{,}8} \cong 330\ kW,$$

что составляет $\backsim 30\%$ увеличения мощности.

Замена неуравновешенной системы подъема статически уравновешенной системой послужила бы к уменьшению указанной перегрузки, а следовательно к уменьшению мощности двигателя.

*Раздел второй*

# СИСТЕМА ЛЕОНАРДА

Как известно, в системе Леонарда управление подъемным двигателем осуществляется посредством изменения возбуждения пусковой динамо, питающей указанный двигатель; в результате этого получается соответственное изменение напряжения на зажимах как пусковой динамо, так и питаемого ею подъемного двигателя, каковое обстоятельство, в свою очередь, обусловливает соответственное изменение его скорости.

Таким образом, в рассматриваемой системе по существу мы управляем *скоростью* подъемного двигателя, причем, если тахограммой предписан определенный закон изменения скорости подъема, то изменение момента вращения двигателя получается зависящим исключительно от кинематических и динамических соотношений, присущих данной системе подъема; в связи с этим при одном и том же законе изменения скорости для различных систем подъема получится различный характер изменения момента вращения.

По сравнению с асинхронным двигателем система Леонарда в отношении управления машиной представляет громадное преимущество. В самом деле, в тех случаях, когда для осуществления заданной тахограммы управление асинхронным двигателем требует от машиниста сложных операций, как например, при производстве подъема с опрокидными клетями и скипами в периоды их опоражнивания, согласно диаграммам, представленным на фиг. 57 и 58, в рассматриваемой системе получение необходимого изменения скорости, независимо от того, по какому закону, хотя бы самому сложному, оно ни происходило, достигается совершенно просто; для этого необходимо только придать, например, соответственную форму автоматизирующим период замедления приливам (кулачкам) на дисках, управляющих изменением возбуждения пусковой динамо , а следовательно, и скоростью подъема. Равным образом, наиболее целесообразным в отношении удобства управления оказалось бы применение привода Леонарда к обслуживанию режимов подъема, характеризуемых диаграммами, представленными, например, на фиг. 6, 9, 12.

Как известно, скорость подъемного двигателя при системе Леонарда *почти* пропорциональна приложенному к нему напряжению. Более точное выражение скорости указанного двигателя, или что то же, его числа оборотов $n$, получаемое в зависимости от противоэлектродвижущей силы двигателя $E$, имеет следующий вид:

$$n = \frac{1}{a\Phi} E, \qquad (301)$$

* При непосредственном управлении.

где $\Phi$—магнитный поток индукторов двигателя, $\alpha$—коэффициент пропорциональности.

Последнее выражение показывает, что число оборотов двигателя, а следовательно, его скорость, пропорциональна индуктируемой в обмотке его якоря противоэлектродвижущей силе, которая по своей физической природе идентична с электродвижущей силой, индуктируемой в обмотке якоря динамомашины, работающей генератором.

Вышеуказанная зависимость скорости двигателя от его противоэлектродвижущей силы положена в основу приводимого ниже исследования физической стороны системы Леонарда.

## I. ФИЗИКА ПРИВОДА

### А. РЕЖИМ ПОДЪЕМА

Сила тока $J$ двигателя, обусловливающая величину развиваемого им момента вращения, определяется из выражения:

$$J=\frac{U-E}{R}, \tag{302}$$

где $U$—приложенное напряжение; $E$—противоэлектродвижущая сила двигателя; $R$—сопротивление цепи якоря.

### 1. Трехпериодная трапецоидальная тахограмма с прямолинейными боками

#### *а. Случай моторного режима в период замедления*

Для приведения системы в движение необходимо получение начального пускового момента, значение которого было бы больше статического момента сопротивления на величину динамического момента.

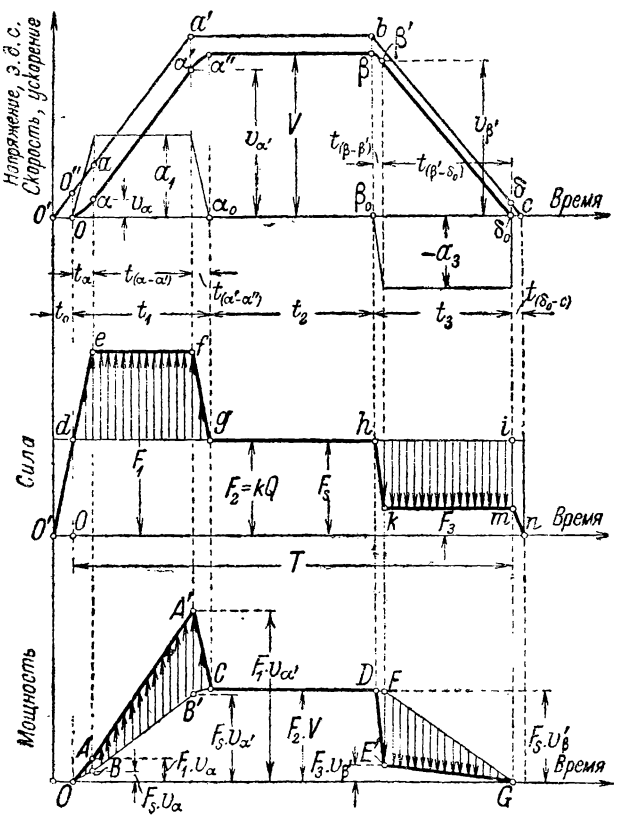
При условии изменения приложенного к двигателю напряжения за один цикл подъема по закону трапеции $O'O''da'b\delta c$ (фиг. 64), в продолжение начального периода $t_0$ будем иметь возрастание указанного напряжения от нулевого значения по линии $O'O''$, чему будет соответствовать возрастание развиваемого двигателем усилия по линии $O'd$ от нуля в точке $O'$ до значения $F_2$ в точке $d$, в которой усилие двигателя оказывается равным статической нагрузке $F_s=kQ$. Так как в период $t_0$ сила двигателя не превышает величины статической нагрузки, двигатель, равно как и вся система, будет находиться в покое; сила тока, потребляемая при этом двигателем, определяется из выражения (302), при $E=0$, т. е. из выражения $J=\frac{U}{R}$.

По окончании периода $t_0$ приложенное к двигателю напряжение будет продолжать расти, в связи с чем сила двигателя сделается больше статической нагрузки $F_s=kQ$; в результате этого двигатель придет во вращение, причем в нем появится противоэлектродвижущая сила, возрастающая вместе с увеличением скорости двигателя в течение периода $t_\alpha$ по некоторой кривой $O\alpha$. Таким образом вращение двигателя и движение всей системы начнется в точке $O$, по истечении периода $t_0$ от начала изменения (возрастания) приложенного к двигателю напряжения; однако пусковое усилие, развиваемое двигателем, достигнет своего нормального значения $F_1$ лишь по окончании периода $t_\alpha$*, в течение которого усилие двигателя воз-

* Что касается продолжительности времени $t_0+t_\alpha$, то таковая, например, для одной подъемной установки составляет $\backsim 3$ сек. (См. кривую тока на фиг. 88, стр. 260).

растает от значения $F_2 = F_s$ до величины $F_1$, изменяясь по линии $de$*. Усилие $F_1$ двигатель будет развивать в продолжение времени $t_{(\alpha - \alpha')}$, в конце которого приложенное к двигателю напряжение достигнет своего максимального значения (точка $a'$), остающегося затем постоянным в течение времени $t_{(\alpha' - \alpha'')} + t_2$.

Так как противоэлектродвижущая сила двигателя всегда меньше приложенного к нему напряжения, ординаты кривой $O\alpha\alpha'\alpha''\beta\beta'\delta_0$, выражающей закон изменения указанной противоэлектродвижущей силы, всегда будут, при одном и том же масштабе, меньше ординат кривой напряжения $O'O''aa'b\delta c$. Здесь необходимо отметить, что так как в период пуска $t_1$ сила тока, потребляемая двигателем, должна быть больше таковой в остальные периоды движения, то разность ординат $\alpha a = \alpha' a'$ указанных кривых, являющаяся мерилом означенной силы тока, в течение периода $t_1$ тоже должна иметь соответственно наибольшие значения; эта разность ординат в продолжение времени $t_{(\alpha - \alpha')}$, составляющего часть периода $t_1$, является постоянной, что соответствует статически уравновешенной системе подъема; для остальных систем подъема указанная разность ординат не будет оставаться постоянной в период $t_{(\alpha - \alpha')}$, а именно, при неуравновешенной системе она будет несколько уменьшаться, а при системе с тяжелым хвостовым канатом увеличиваться, изменяясь по закону соответственных *парабол*.




Фиг. 64. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками. Режим подъема с моторным замедлением в период $t_3$.

Относительно скорости подъема и обусловленной ею величины противоэлектродвижущей силы двигателя необходимо заметить, что по окончании периода $t_{(\alpha - \alpha')}$, несмотря на прекращение изменения приложенного к подъемному двигателю напряжения, они будут продолжать расти в течение некоторого времени $t_{(\alpha' - \alpha'')}$, благодаря наличию превышения движущего усилия над статическим сопротивлением; при этом разность между приложенным к двигателю напряжением и его противоэлектродвижущей силой будет соответственно уменьшаться до тех пор, пока в точке $\alpha''$ не будет достигнуто значение противоэлектродвижущей силы, обусловливающее при максимальном напряжении соответственно уменьшенную силу тока, отве-

* На фиг. 64 линия *de* ориентировочно изображена в виде прямой.

чающую периоду полного хода; в продолжение периода $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ противоэлектродвижущая сила пусть изменяется по некоторой кривой $\alpha'\alpha''$, чему будет соответствовать уменьшение силы, развиваемой двигателем, согласно линии $fg$*, от значения $F_1$ в конце периода $t_{(\alpha-\alpha')}$, совпадающем с началом периода $t_{(\alpha'-\alpha'')}$, до величины $F_2 = F_s$ в конце последнего периода, совпадающем с началом периода $t_2$.

Что касается пускового ускорения за время $t_1$, то оно в продолжение периода $t_\alpha$ будет расти от нуля в начале до максимальной величины $a_1$ в конце этого периода, после чего ускорение будет оставаться постоянным, равным $a_1$, в продолжение времени $t_{(\alpha-\alpha')}$; затем, в течение периода $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ ускорение будет падать от величины $a_1$ до нуля (точка $\alpha_0$), после чего начнется движение с постоянной скоростью, каковая будет иметь место в течение периода полного хода $t_2$. Разность между приложенным к подъемному двигателю напряжением и его противоэлектродвижущей силой в период $t_2$ для статически уравновешенной системы подъема является величиной постоянной; для неуравновешенной системы эта разность в течение указанного периода будет убывать, а для системы с тяжелым хвостовым канатом возрастать, изменяясь по линейному закону, в связи с соответственным изменением статических усилий для означенных систем подъема.

В точке $b$, по окончании периода полного хода $t_2$, с целью перехода к периоду замедления, начинается уменьшение приложенного к двигателю напряжения; что касается скорости подъема и обусловленной ею величины противоэлектродвижущей силы двигателя, то вследствие наличия инерции масс движущихся частей подъемного устройства указанные параметры в продолжение некоторого времени $t_{(\beta-\beta')}$ будут уменьшаться несколько медленнее, чем приложенное напряжение, изменяясь по некоторой кривой $\beta\beta'$ таким образом, что в точке $\beta'$ разность между напряжением и противоэлектродвижущей силой будет соответствовать уменьшенному значению усилия, развиваемого двигателем в период замедления; на фиг. 64 разность ординат линий $b\delta$ и $\beta'\delta_0$ в течение времени $t_{(\beta'-\delta_0)}$ остается постоянной, что предполагает статически уравновешенную систему подъема; для систем неуравновешенной и с тяжелым хвостовым канатом эта разность ординат, по мере уменьшения скорости, не будет оставаться постоянной, а будет изменяться по закону соответственных *парабол.*

В продолжение периода $t_{(\beta-\beta')}$ замедление изменяется от нуля в точке $\beta_0$ до значения $a_3$ в конце указанного периода; далее, в течение времени $t_{(\beta'-\delta_0)}$ величина замедления $a_3$ остается постоянной. В продолжение времени $t_{(\beta-\beta')}$, составляющего часть периода замедления $t_3$, усилие, развиваемое двигателем, будет падать от значения $F_2$ в точке $h$ до величины $F_3$ в точке $k$, изменяясь по линии $hk$. Усилие $F_3$ будет иметь место в течение времени $t_{(\beta'-\delta_0)}$, после чего двигатель, равно как и вся система, остановится; противоэлектродвижущая сила при этом уменьшится до нуля, после чего уменьшение напряжения в продолжение времени $t_{(\delta_0-c)}$ от величины $\delta_0\delta$ до нулевого значения в точке $c$ будет происходить при неподвижном двигателе. Сила двигателя за период $t_{(\delta_0-c)}$ падает от значения $F_3$ до нуля, изменяясь по линии $mn$.**

---

На фиг. 64 линия $fg$ ориентировочно представлена в виде прямой.

** Следует отметить, что при произведенном выше рассмотрении физико-механических процессов, происходящих в подъемном двигателе, мы не принимали во внимание явления самоиндукции в обмотке якоря этого двигателя в переходные периоды $t_\alpha$, $t_{(\alpha'-\alpha'')}$, $t_{(\beta-\beta')}$ (фиг. 64), ввиду ее незначительного влияния на количественную сто-

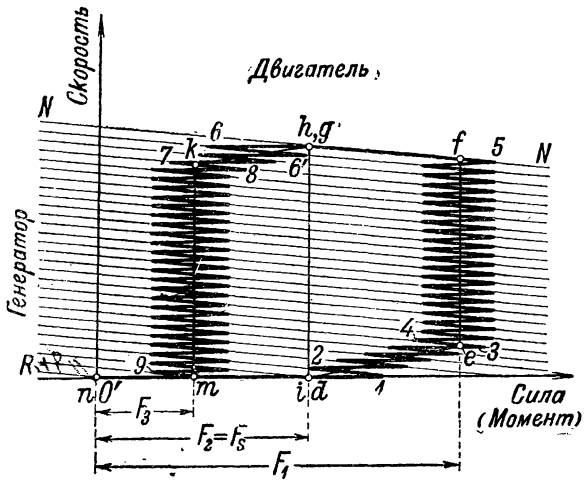
Усилие, развиваемое двигателем* за весь период изменения приложенного к нему напряжения, включая промежутки времени $t_0$ и $t_{(\delta_0-c)}$, в течение которых двигатель является неподвижным, изменяется по линии *O'defghkmn*. Мощность, развиваемая двигателем за весь период подъема *T*, изменяется по линии *OAA'CDE'G*.**

Значения отдельных мощностей двигателя приведены на диаграмме мощности фиг. 64 в виде соответственных произведений из усилия на скорость. ***

На диаграммах усилий и мощностей области действия сил инерции заштрихованы соответственно направленными стрелками.

На диаграмме усилий площади *defgd* и *hkmih* должны быть равны между собой; на диаграмме мощностей равны между собой площади *OAA'CB'BO* и *DEGE'D*.

Здесь следует отметить, что при определенном законе изменения приложенного к двигателю напряжения рассмотренные выше режимы изменения противоэлектродвижущей силы и силы тока, обусловливающие получение необходимых движущих усилий в отдельные периоды движения, получаются автоматически, в связи с наличием определенных кинематических и динамических соотношений данной системы подъема. Что касается периода замедления, то наличие *моторного* режима в данном случае обусловлено недостатком запасенной в период пуска живой силы для завершения подъема в период $t_3$, в результате чего вращение подъемного двигателя будет происходить со скоростью, при которой величина его противоэлектродвижущей силы окажется меньшей по сравнению с приложенным к нему напряжением; вследствие этого в каждое мгновение периода $t_{(\beta'-\delta_0)}$, составляющего часть периода $t_3$, указанное напряжение будет больше противоэлектродвижущей силы двигателя на величину, обусловливающую получение силы тока, потребляемой двигателем и соответствующей необходимому усилию $F_3$.




Фиг. 65. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик, применительно к режиму характеризуемому диаграммам на фиг. 64.

На фиг. 64 (верхняя диаграмма) кривая $O\alpha\alpha'\alpha''\beta\beta'\delta_0$ выражает также в определенном масштабе закон изменения скорости подъема за полный период *T*; ориентировочно при расчетах принимают обыкновенно изменение скорости подъема происходящим по кривой напряжения *O'O''aa'bδc*.

---

рону рассматриваемых процессов. По тем же соображениям не учтены также явления самоиндукции как в обмотке якоря пусковой динамо, так и в обмотке ее индукторов.

* Отнесенное к окружности барабана подъемной машины.

** В продолжение промежутков времени $t_0$ и $t_{(\delta_0-c)}$ механическая мощность двигателя равна нулю.

*** $v_\alpha$, $v_{\alpha'}$, $V$ и $v_{\beta'}$ — скорости подъема, соответствующие определенным моментам движения системы.

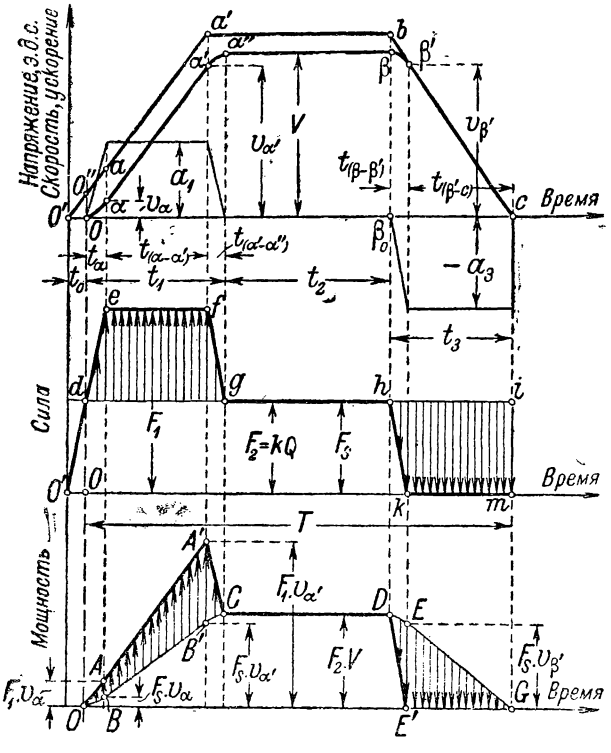
На фиг. 65 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому рассмотренными выше диаграммами на фиг. 64. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 64 и на фиг. 65, имеют соответственно одни и те же значения.

Согласно фиг. 65, в начальный период пуска, в результате выведения рычага управления из нулевого (среднего) положения, происходит увеличение силы, развиваемой подъемным двигателем, начиная от нулевого ее значения в точке $O'$ через которую проходит характеристика $R$ двигателя, соответствующая наименьшему приложенному к нему напряжению, каковой режим, в свою очередь, обусловлен наличием максимального сопротивления в цепи возбуждения пусковой динамо; увеличение силы двигателя до точки $d$, соответствующей статической силе сопротивления $F_s$, происходит при нулевой скорости движения, каковое состояние, продолжающееся в течение периода $t_0$ (фиг. 64), сопровождается переходом двигателя через ряд его характеристик, каждая из коих соответствует определенному напряжению, приложенному к двигателю; при переходе от одной характеристики к другой указанное напряжение возрастает в результате соответственного уменьшения сопротивления цепи возбуждения пусковой динамо. Далее сила двигателя в продолжение времени $t_\alpha$ (фиг. 64) должна возрастать по линии $de$ (фиг. 64 и 65) при соответственном изменении увеличивающейся скорости (по линии $O\alpha$ на фиг. 64); но так как при этом необходимо перейти через соответственное число ступеней металлического реостата в цепи возбуждения пусковой динамо, чему соответствует переход через такое же число характеристик подъемного двигателя, каждая из коих соответствует определенному напряжению, подводимому к этому двигателю, вместо точного изменения силы по линии $de$ в действительности получится ее изменение согласно зигзагообразной кривой $d12 \ldots 3e$,* варьирующей около линии $de$, как около некоторого среднего значения. В точке $e$ получается пусковое значение силы двигателя $F_1$, каковое должно оставаться постоянным в продолжение времени $t_{(\alpha-\alpha')}$, чему на диаграмме усилий фиг. 64 и на фиг. 65 соответствует линия $ef$; однако, так как получение указанной силы $F_1$ в период пуска при возрастающей скорости (по линии $\alpha\alpha'$ на фиг. 64) осуществляется путем постепенного выключения отдельных ступеней реостата из цепи возбуждения пусковой динамо, то движущее усилие, развиваемое подъемным двигателем, в продолжение периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ в действительности будет изменяться по зигзагообразной кривой $e4 \ldots 5f$, варьируя около линии $ef$, соответствующей усилию $F_1$, как около некоторого среднего значения. В точке 5, соответствующей крайнему положению рычага управления, двигатель выходит на характеристику $N$, при которой имеет место полное выведение реостата из цепи возбуждения пусковой динамо, каковой режим обусловливает наличие полного напряжения, приложенного к подъемному двигателю. От точки 5 до точки $f$ и от этой последней до точки $g$ падение развиваемого двигателем усилия от значения $F_1$ до величины $F_2 = F_s$ будет происходить согласно характеристике $N$ соответственным возрастанием скорости (по линии $\alpha'\alpha''$ на фиг. 64).

В точке $g$ начинается период $t_2$ равномерного движения (полный ход), который продолжается до точки $h$, совпадающей на фиг. 65 с точкой $g$. По окончании периода $t_2$ наступает период замедления, для осуществления которого необходимо рычаг управления начать выводить из крайнего по-

* В результате изменения на одну ступень сопротивления реостата в цепи возбуждения пусковой динамо получается соответственный переход от одной какой-либо характеристики подъемного двигателя к ближайшей, причем этот переход предполагается происходящим мгновенно—без изменения скорости двигателя.

ложения по направлению к нулевому (среднему) положению, в результате чего будет происходить постепенное включение реостата в цепь возбуждения пусковой динамо, обусловливающее соответственный переход двигателя через ряд его характеристик. Следствием этого явится изменение развиваемого подъемным двигателем усилия в течение периода $t_{(\beta-\beta')}$ (фиг. 64) по зигзагообразной кривой *h66′ ..7k* (фиг. 65), варьирующей около линии *hk*, как около некоторого среднего значения. В продолжение времени $t_{(\beta'-\delta_0)}$ (фиг. 64), в связи с дальнейшим введением реостата в цепь возбуждения пусковой динамо, изменение развиваемого подъемным двигателем усилия будет происходить по зигзагообразной линии *k8 .9 m* (фиг. 65), варьирующей около линии *km*, как около среднего значения, соответствующего постоянному усилию $F_3$. В точке *m* движение прекращается, в результате чего система приходит в состояние покоя. Уменьшение усилия двигателя от значения $F_3$ в точке *m* до нуля в точке *n* происходит при нулевой скорости.




Фиг. 66. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками. Режим подъема со свободным выбегом в период замедления $t_3$.

Таким образом на диаграмме фиг. 65 движущее усилие, развиваемое подъемным двигателем за весь цикл одного подъема $(t_0 + T + t_{(\delta_0-c)}$, будет изменяться по линии *O′d 12. .3e4 ..5f(g,h)66′ ...7k8 ...9mn.**

*b. Случай свободного выбега в период замедления*

В периоды $t_1$ и $t_2$ режим работы подъемного двигателя идентичен с режимом в указанные периоды для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 64 и 65. Что касается периода замедления, то для осуществления в этот период режима свободного выбора, характеризуемого, в случае статически уравновешенной системы подъема, диаграммами на фиг. 66, необходимо наличие условий, при которых в течение периода $t_{(\beta'-c)}$, соответствующего установившемуся режиму периода замедления, противоэлектродвижущая сила все время оставалась бы по величине равной приложенному к двигателю напряжению, что обусловливало бы

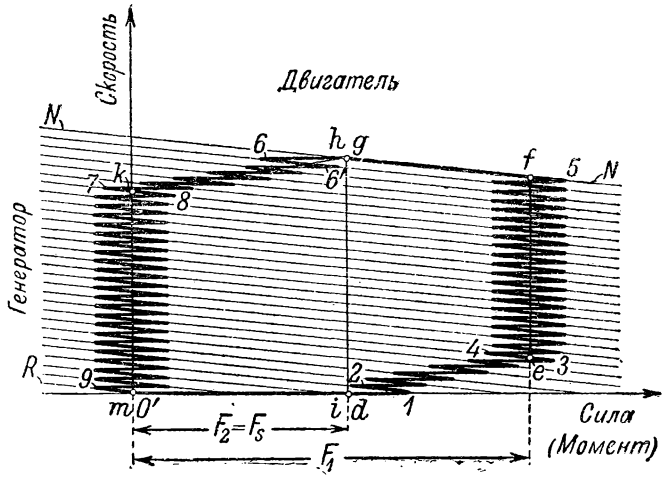
Амплитуды колебаний зигзагообразных линий тока, обусловленных переходом от одной характеристики подъемного двигателя к другой, окажутся тем меньше, чем больше будет рабочих характеристик этого двигателя, количество которых зависит от числа ступеней реостата в цепи возбуждения пусковой динамо; зигзагообразные линии токов на фиг. 65 превратились бы в прямые линии лишь в случае жидкостного реостата, который в системе Леонарда не нашел применения.

в продолжение периода $t_{(\beta'-c)}$ получение нулевого значения разности ординат кривых, характеризующих изменение указанных параметров.

Наличие условий для получения рассматриваемого режима объясняется в данном случае тем обстоятельством, что величина живой силы, запасенной в период пуска, в точности равна тому количеству энергии, которое является необходимым для завершения подъема в период замедления, благодаря чему в последний период, имея в виду его установившийся режим, вращение двигателя будет происходить именно с такой скоростью, при которой его противоэлектродвижущая сила в течение периода $t_{(\beta'-c)}$, составляющего часть периода $t_3$, окажется в среднем равной приложенному к нему напряжению. *

Кривые, представленные на фиг. 66, характеризуют изменение нижеследующих параметров.

Кривая $O'O''aa'b\beta'c$ выражает закон изменения приложенного к двигателю напряжения; кривая $Oaa'\alpha''\beta\beta'c$ в соответственных масштабах представляет закон изменения противоэлектродвижущей силы подъемного двигателя и скорости подъема; $a_1$ и $a_3$ — постоянные значения соответственно ускорения и замедления подъема.




Фиг. 67. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму характеризуемому диаграммами на фиг. 66.

На диаграмме усилий кривая *O'defghkm* определяет закон изменения движущего усилия, развиваемого двигателем в продолжение всего периода изменения приложенного к нему напряжения, причем заштрихованные площади *defgd* и *hkmih*, характеризующие области действия сил инерции, должны быть равны между собой.

На диаграмме мощностей кривая *OAA'CDE'* выражает закон изменения мощности, развиваемой двигателем за период подъема $T$; площади *OAA'CB'BO* и *DEGE'D* равны между собой.

Значения отдельных мощностей на фиг. 66 выражены в виде соответственных произведений из усилия на скорость.

Остальные обозначения на фиг.66 соответствуют таковым на фиг. 64.

На фиг. 67 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 66 Обозначения общие на диаграмме усилий фиг. 66 и на фиг. 67, имеют соответственно одни и те же значения.

Движущее усилие, развиваемое подъемным двигателем за весь цикл одного подъема $(t_0+T)$ на диаграмме фиг. 67 будет изменяться по линии *O'd12 . 3e4 5f(g,h)66' 7k8 9m.*

---

* См. стр. 228 в связи с рассмотрением фиг. 67.

Интересно отметить, что в установившийся период замедления $t_{(\beta'-c)}$ усилие подъемного двигателя, которое теоретически должно равняться нулю, в действительности будет изменяться по зигзагообразной кривой *k8. 9m*, варьируя около нулевой линии *km.* как около среднего значения, причем при переходе с одних характеристик на другие попеременно будут иметь место механически взаимно компенсирующиеся как двигательные, так и генераторные (тормозные) режимы. Отсюда следует, что *получение режима свободного выбега в системе Леонарда является условным*, так как в течение указанного режима в действительности будет иметь место нагревание подъемного двигателя (а также и пусковой динамо) попеременно некоторой силой тока как моторного, так и генераторного характера.

В остальном диаграмма на фиг 67 аналогична диаграмме на фиг. 65.

Что касается систем подъема с тяжелым хвостовым канатом и неуравновешенной, то при изменении в период замедления приложенного к подъемному двигателю напряжения по закону прямой линии точное осуществление режима свободного выбега является невозможным. Указанное явление объясняется тем обстоятельством, что для получения свободного выбега необходимо, чтобы скорость подъема, а следовательно и противоэлектродвижущая сила подъемного двигателя, с которой в данном случае должно совпадать по величине приложенное к нему напряжение, изменялись не по прямой линии, а по закону синуса для системы с тяжелым хвостовым канатом, и по закону гиперболического синуса для неуравновешенной системы подъема.

Графическая интерпретация режима, близкого к свободному выбегу в период замедления, для неуравновешенной системы подъема представлена на фиг. 70 и 71, рассмотрение которых произведено ниже.

### *c. Случай тормозного (генераторного) режима в период замедления*

В периоды $t_1$ и $t_2$ режим работы подъемного двигателя идентичен с режимом в указанные периоды для случаев, характеризуемых диаграммами на фиг. 64, 65 ,66 и 67 Что касается процесса, происходящего по окончании периода $t_2$, то таковой применительно к фиг. 68 представляется следующим образом.

Благодаря избытку запасенной в период пуска энергии по сравнению с той, которая является необходимой для завершения подъема в период замедления, подъемный двигатель по истечении периода $t_2$ будет продолжать вращаться с некоторой скоростью большей, чем это соответствует уменьшающейся величине приложенного к нему напряжения, изменяемого по линии *bωc*. На фиг. 68 изменение (противо)электродвижущей силы двигателя, равно как и его скорости, в продолжение времени $t_{(\beta-\omega)}+t_{(\omega-\beta')}$ предполагается происходящими по некоторой кривой $\beta\omega\beta'$, пересекающей линию напряжения *bωc* в точке ω, в которой значения приложенного к двигателю напряжения и его противоэлектродвижущей силы равны между собой, ввиду чего в это мгновение двигатель не потребляет тока от пусковой динамо. После точки ω противоэлектродвижущая сила двигателя становится больше приложенного к нему напряжения, переходя таким образом в электродвижущую силу, в связи с чем двигатель превращается в генератор, посылающий ток в пусковую динамо, работающую при этом в качестве мотора. Так как указанное генерирование подъемным двигателем тока сопровождается явлением торможения, то в данном случае будет иметь место наличие электрического торможения с рекуперацией энергии. Увеличение разности между электродвижущей силой двигателя и приложенным к нему напряжением будет происходить до тех пор, пока в некоторой

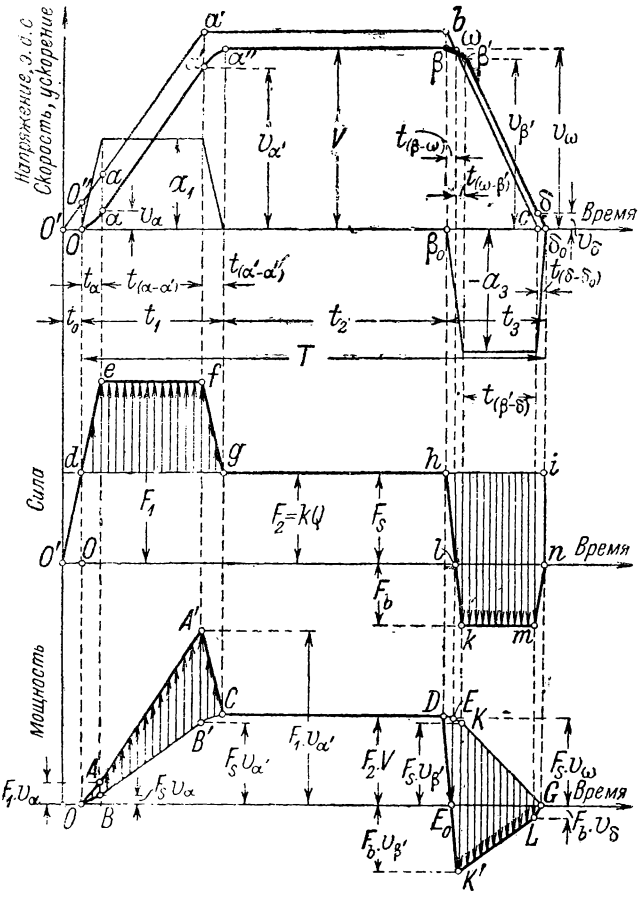
точке $\beta'$ не получится значение указанной разности, обусловливающее величину силы тока, соответствующую необходимому тормозному усилию, которое для случая статически уравновешенной системы, согласно представленному на фиг 68, в продолжение периода $t_{(\beta'-\delta)}$ остается постоянным, равным $F_b$.

Для режима, характеризуемого верхней диаграммой на фиг. 68, приложенное к подъемному двигателю напряжение изменяется за один период подъема по кривой $O'O''aa'b\omega c$; (противо)электродвижущая сила двигателя и скорость подъема за период $T$ изменяются по кривой $O\alpha\alpha'\alpha''\beta\omega\beta'\delta\delta_0$.

На диаграмме усилий кривая $O'defghl$ выражает закон изменения движущего усилия, развиваемого двигателем в продолжение его работы на моторном режиме, т. е. в течение времени $t_0+t_1+t_2+t_{(\beta-\omega)}$; кривая $lkmn$ определяет закон изменения тормозного усилия, развиваемого двигателем в период его работы на генераторном режиме, т. е. в продолжение времени $t_{(\omega-\beta')}+t_{(\beta'-\delta)}+t_{(\delta-\delta_0)}$.

Заштрихованные площади $defgd$ и $hlkmnih$, характеризующие области действия сил инерции, равны между собой.

На диаграмме мощностей кривая $OAA'CDE_0$ выражает закон изменения мощности, развиваемой двигателем в продолжение его работы на моторном режиме; кривая $E_0K'LG$ представляет закон изменения мощности, возвращаемой подъемным двигателем пусковой динамо в период работы этого двигателя в качестве генератора.




Фиг. 68. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками Режим подъема с тормозным замедлением в период $t_3$

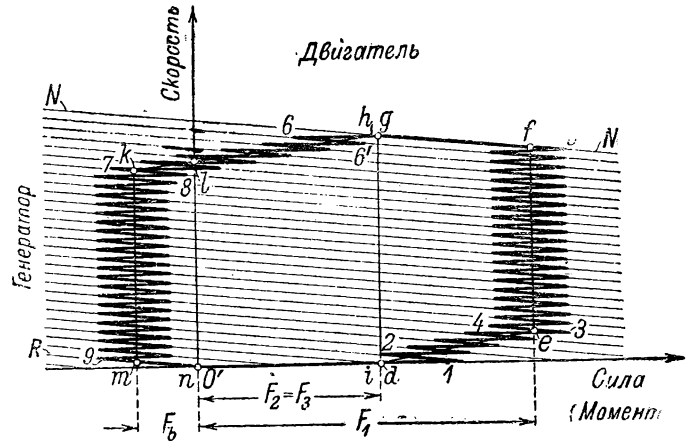
Заштрихованные площади $OAA'CB'BO$ и $DEKGLK'E_0D$ равны между собой.

На фиг. 69 изображена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 68. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 68 и на фиг. 69, имеют соответственно одни и те же значения.

Движущие усилия, развиваемые подъемным двигателем в период его работы на моторном режиме, на диаграмме фиг. 69 изменяются по линии $O'd12....3e4...5f(g,h)66'...l$; тормозные усилия, развиваемые двигателем в период его работы генератором, изменяются по линии $l...7k8...9mn$.

### *d. Случай моторно-генераторного режима в период замедления*

Осуществление рассматриваемого режима имеет место в случае *неуравновешенной* системы подъема, при условии изменения приложенного к подъемному двигателю напряжения за весь цикл подъема по закону трапеции $O'O''aa'b\omega c$ с прямолинейными боками. Диаграммы, характе-




Фиг. 69. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 68.

ризующие этот режим, представлены на фиг. 70 и 71. Величина живой силы, запасенной в период пуска, должна быть в точности равна энергии, необходимой для завершения подъема в период замедления.

Явления, происходящие при производстве подъема согласно указанным выше условиям, рассмотрим по отдельным периодам.

В установившийся период *пуска* величина усилия, развиваемого двигателем, падает, изменяясь по параболе *ef* (фиг. 70); в связи с этим и разность между значениями приложенного к двигателю напряжения и индуктируемой в нем противоэлектродвижущей силы, являющаяся мерилом потребляемой двигателем силы тока, а также развиваемого им усилия, в рассматриваемый период должна соответственно уменьшаться, изменяясь по закону указанной параболы; пусть при этом линия $\alpha\alpha'$ * выражает закон изменения противоэлектродвижущей силы двигателя в установившийся период пуска.

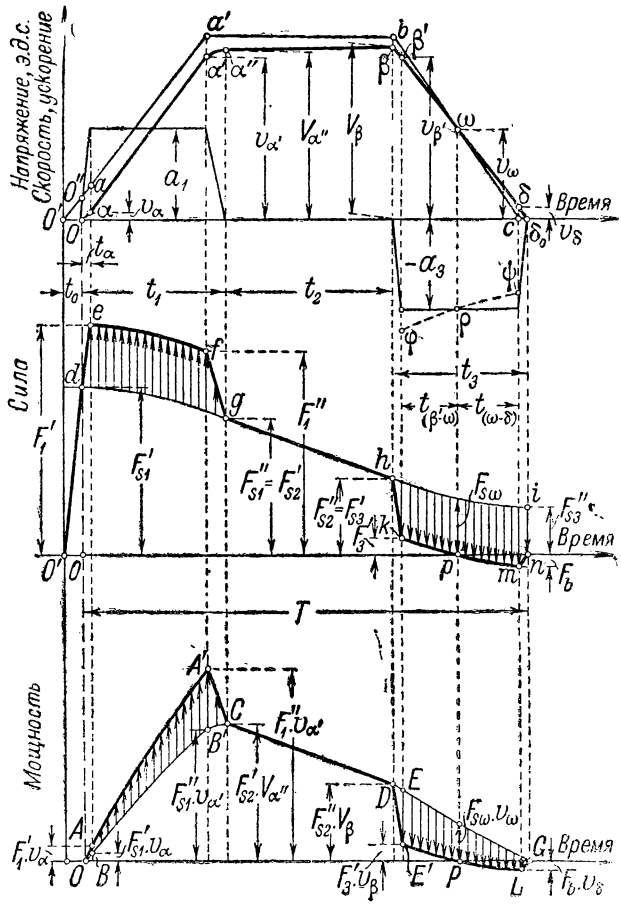
Равным образом разность между значениями приложенного к двигателю напряжения и его противоэлектродвижущей силы в период *полного хода* $t_2$ тоже не является постоянной, а уменьшается, изменяясь по закону

*) Которая не должна быть параллельной линии напряжения $aa'$, а несколько к ней наклоняться по направлению кверху.

прямой линии $gh$, выражающей изменение статического и движущего усилий в последний период; в соответствии с этим закон изменения противоэлектродвижущей силы пусть выражается линией $\alpha''\beta$, соответственно приближающейся к линии напряжения $a'b$.

Что касается периода *замедления*, то явления, происходящие в этот период, представляются следующим образом.

При осуществлении в точности режима свободного выбега для случая неуравновешенной системы замедление в период останова, как известно, должно изменяться по закону гиперболического косинуса, графическое изображение которого для установившегося режима замедления на фиг. 70 представлено в виде пунктирной кривой $\varphi\rho\psi$; при изменении в рассматриваемый период приложенного к подъемному двигателю напряжения, равно как и скорости подъема, по закону прямой линии, что имеет место в данном случае, замедление будет определяться постоянной величиной $a_з$, представляющей собой некоторое среднее значение из отдельных значений замедления, определяемых кривой $\varphi\rho\psi$. Значение величины $a_з$ в начальный период замедления $t_{(\beta'-\omega)}$ будет меньше, а в конечный период $t_{(\omega-\delta)}$ окажется больше соответственных значений замедления, определяемых кривой $\varphi\rho\psi$. Ввиду этого, в первый из указанных периодов, а именно в период $t_{(\beta'-\omega)}$, в течение которого действительное замедление $a_з$ меньше значений, определяемых линией $\varphi\rho$, будет иметь место моторный режим, при котором ординаты линии приложенного напряжения $b\omega$ окажутся больше соответственных ординат линии противоэлектродвижущей силы $\beta'\omega$; в период $t_{(\omega-\delta)}$, в продолжение которого замедление $a_з$ будет больше значений, определяемых линией $\rho\psi$, получится режим торможения, которое в данном случае будет генераторным * Только в момент, определяемый точ-



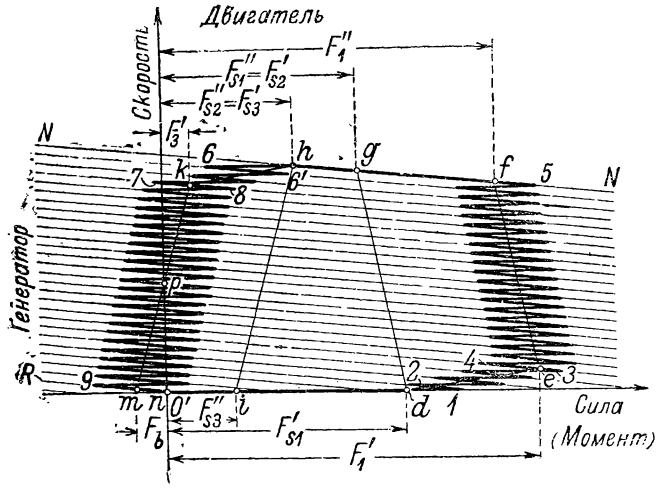

Фиг. 70. Диаграммы, характеризующие неуравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками. Режим подъема с моторно-тормозным замедлением в период $t_з$.

* Случай *генераторно-моторного* режима в период замедления мог бы иметь место в аналогичных условиях применения системы с тяжелым хвостовым канатом.

кой ω, при равенстве приложенного напряжения и противоэлектродвижущей силы, будет иметь место режим свободного выбега.

Таким образом, закон изменения (противо)электродвижущей силы двигателя, а следовательно в определенном масштабе скорости подъема, на фиг. 70 выражается кривой $O\alpha\alpha'\alpha''\beta\beta'\omega\delta\delta_0$.

На диаграмме усилий кривая $O'defghkp$ * представляет закон изменения развиваемых подъемным двигателем усилий за период его работы на моторном режиме; кривая $pmn$ ** выражает изменение тормозных усилий, развиваемых двигателем в период его работы генератором.




Фиг. 71. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 70.

Заштрихованные площади $defgd$ и $hkpmnih$, характеризующие область действия сил инерции, должны быть равны между собой.

Мощность, развиваемая двигателем при его работе на моторном режиме, выражается кривой $OAA'CDE'P$; мощность, возвращаемая системе в период работы подъемного двигателя в качестве генератора, изменяется по закону, определяемому кривой $PLG$. Заштрихованные площади $OAA'CB'BO$ и $DEGLPE'D$ равны между собой.

На фиг. 71 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 70. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 70 и на фиг. 71, имеют соответственно одни и те же значения ***.

Движущие усилия, развиваемые подъемным двигателем в период его работы на моторном режиме, на диаграмме фиг. 71 изменяются по линии $O'd12...3e4...5fgh66'...7k8....p$; тормозные усилия, развиваемые двигателем в период его работы генератором, изменяются по линии $p...9mn$.

Следует при этом отметить, что как в период $t_{(\beta'-\omega)}$ моторного режима, так и в период $t_{(\omega-\delta)}$ генераторного режима (фиг. 70), при переходе с одних характеристик на другие на фиг. 71 в действительности будет иметь место частично каждый из этих двух режимов с соответственным преобладанием: моторного режима в первый из указанных периодов и генераторного — в последний период.

## 2. Трехпериодная тахограмма с параболической частью в период пуска

Здесь ограничимся рассмотрением статически уравновешенной системы.

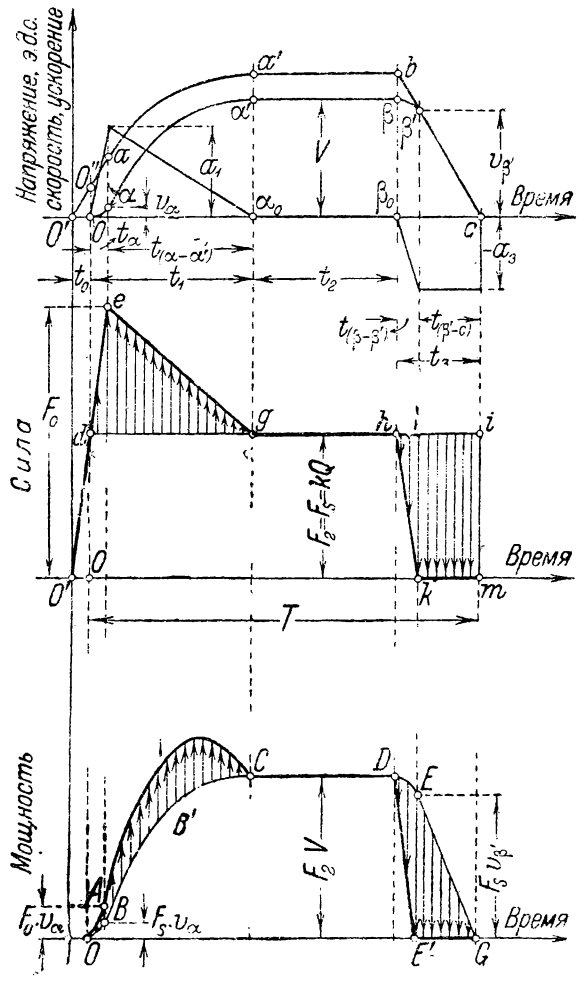
На верхней диаграмме фиг. 72 кривая $O'O''aa'b\beta'c$ с *параболической* частью $O'O''aa'$ в период $(t_0 + t_1)$ представляет закон изменения приложен-

* Часть $kp$ этой кривой представляет параболу.

Часть $pm$ этой кривой представляет параболу.

*** Параболическим кривым $ef$, $dg$, $hi$, $kp$ и $pm$ на диаграмме усилий фиг. 70 соответствуют на фиг. 71 прямые линии того же наименования.

ного к подъемному двигателю напряжения. В продолжение начального периода $t_0$ будет иметь место возрастание указанного напряжения от нулевого значения по линии $O'O''$, чему будет соответствовать возрастание развиваемого двигателем усилия по линии $O'd$ от нуля в точке $O'$ до значения $F_2 = F_s = kQ$ в точке $d$. В течение периода $t_0$ подъемный двигатель будет находиться в покое. По окончании периода $t_0$ приложенное к двигателю напряжение будет продолжать расти, в связи с чем сила двигателя сделается больше статической нагрузки $F_s = kQ$; в результате этого двигатель придет во вращение, причем его противоэлектродвижущая сила, возрастающая вместе с увеличением скорости двигателя, в течение периода $t_\alpha$ будет изменяться по некоторой кривой $O\alpha$, а движущее усилие будет возрастать по линии $de$. По окончании периода $t_\alpha$ пусковое усилие двигателя достигнет своего максимального (расчетного начального) значения $F_0$, обусловленного на верхней диаграмме фиг. 72 отрезком $\alpha a$, равным разности ординат в конце периода $t_\alpha$ между кривой напряжения $O'O''aa'$ и кривой противоэлектродвижущей силы двигателя $O\alpha a'$. В течение периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ разность ординат между указанными кривыми напряжения и противоэлектродвижущей силы будет соответственно уменьшаться таким образом, что усилие, развиваемое двигателем, будет падать по прямой $eg$ от величины $F_0$ до значения $F_2 = F_s$, после чего наступит период полного хода. В периоды $t_2$ и $t_3$ режимы работы подъемного двигателя идентичны с соответственными режимами в указанные периоды для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 66, где для периода замедления предположен свободный выбег *.




Фиг. 72. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с параболической частью кривой напряжения в период пуска. Режим подъема со свободным выбегом в период замедления $t_3$.

На верхней диаграмме фиг. 72 кривая $O\alpha a'\beta\beta' c$ выражает в определенных масштабах как изменение противоэлектродвижущей силы двигателя,

* Режимы моторного и тормозного замедления здесь не рассмотрены ввиду того, что они ничем не отличаются от таковых при трапецоидальной тахограмме, согласно представленному на фиг. 64 и 68, так как физическая сторона явлений, имеющих место

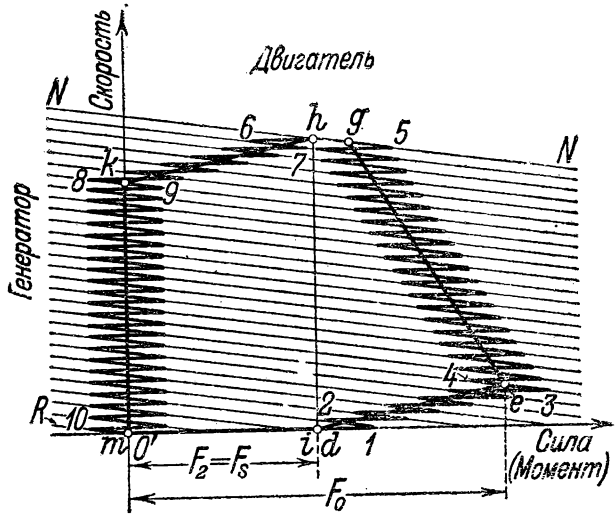
так и скорости подъема. Что касается пускового ускорения, то за период $t_\alpha$ оно будет расти от нуля в начале до максимальной (расчетной начальной) величины $a_1$ в конце этого периода, после чего в течение промежутка времени $t_{(\alpha-\alpha')}$ ускорение будет падать от значения $a_1$ до нуля в точке $\alpha_0$.

Движущее усилие, отнесенное к окружности барабана подъемной машины, за весь период изменения приложенного к двигателю напряжения, включая промежуток времени $t_0$, в течение которого двигатель является неподвижным, изменяется по линии *O'deghkm*.

Мощность, развиваемая двигателем за период подъема *T*, изменяется по линии $OA\gamma CDE'$; мощность, обусловленная статической нагрузкой за указанный период, изменяется по линии *OBB'CDEG*.

На диаграммах усилий и мощностей области действия сил инерции заштрихованы соответственно направленными стрелками.

На фиг. 73 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно




Фиг. 73. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 72.

к режиму подъема, характеризуемому рассмотренными выше диаграммами на фиг. 72. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 72 и на фиг. 73, имеют соответственно одни и те же значения.

Движущее усилие, развиваемое подъемным двигателем за весь цикл одного подъема $(t_0 + T)$, на диаграмме фиг. 73 будет изменяться по линии *O'd12...3e4...5(g,h)67...8k9(10)m*

---

в период замедления, не зависит от характера тахограммы в период пуска. В данном случае основной интерес представляет период пуска с параболическим законом изменения скорости, применительно к каковому режиму и произведено рассмотрение диаграмм на фиг. 72.

* Часть указанной кривой — *8k9...(10)m* варьирует около нулевой линии *km*, как около среднего значения, причем при переходе с одних характеристик на другие попеременно будут иметь место механически взаимно компенсирующиеся как двигательные, так и генераторные (тормозные) режимы, аналогично рассмотренному выше режиму на диаграммах фиг. 66 и 67. Точки *g* и *h*, которые теоретически при бесконечно большом числе характеристик подъемного двигателя должны совпадать между собою, на фиг. 73 отстоят друг от друга на некотором расстоянии, обусловленном тем соображением, что зигзагообразная линия *e4...5g*, варьирующая около линии *eg*, как около некоторого среднего значения, не может заходить влево от линии *hi* (*d*), определяющей величину статического усилия $F_s$.

На фиг. 73 линия $N-N$ — естественная характеристика подъемного двигателя, $R$—характеристика двигателя, соответствующая наименьшему приложенному к нему напряжению ($U = 0$).

### В. РЕЖИМ СПУСКА

При осуществлении рассматриваемого режима подъемный двигатель вращается под влиянием двух факторов: 1) приложенного к двигателю внешнего напряжения, сообщаемого ему пусковой динамо; 2) отрицательного статического момента, создаваемого опускающимся грузом. При этом в период пуска возможны нижеследующие соотношения между заданным ускорением и собственным (свободным) ускорением системы.

#### 1. Трехпериодная трапецоидальная тахограмма с прямолинейными боками

*а. Заданное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы. (Случай моторного режима в период пуска).*

На фиг. 74 кривая (прямолинейная трапеция) $Oaa'\omega bc$ пусть представляет закон изменения приложенного к подъемному двигателю напряжения за период спуска $T$ в предположении статически уравновешенной системы подъема.

Так как в период *пуска* заданное ускорение $a_1$ должно быть больше собственного ускорения $a_1'$, присущего системе, то в продолжение указанного периода должен иметь место *подгон* системы, обусловливающий наличие у подъемного двигателя *моторного* режима, при котором вращение указанного двигателя происходит со скоростью, обусловливающей величину его противоэлектродвижущей силы меньшую, чем приложенное к нему напряжение.

В начальный промежуток времени $t_\alpha$, в течение которого происходит увеличение ускорения от значения $a_1'$ до заданной величины $a_1$, противоэлектродвижущая сила двигателя будет изменяться по некоторой кривой $O\alpha$ таким образом, что разность между ординатами линии напряжения $Oa$ и линии противоэлектродвижущей силы $O\alpha$, являющаяся мерилом силы тока, потребляемого двигателем, в продолжение указанного периода будет возрастать, обусловливая тем самым соответственное возрастание развиваемого двигателем движущего усилия от нулевого значения в начале периода $t_\alpha$ до величины $F_1$ в конце этого периода.

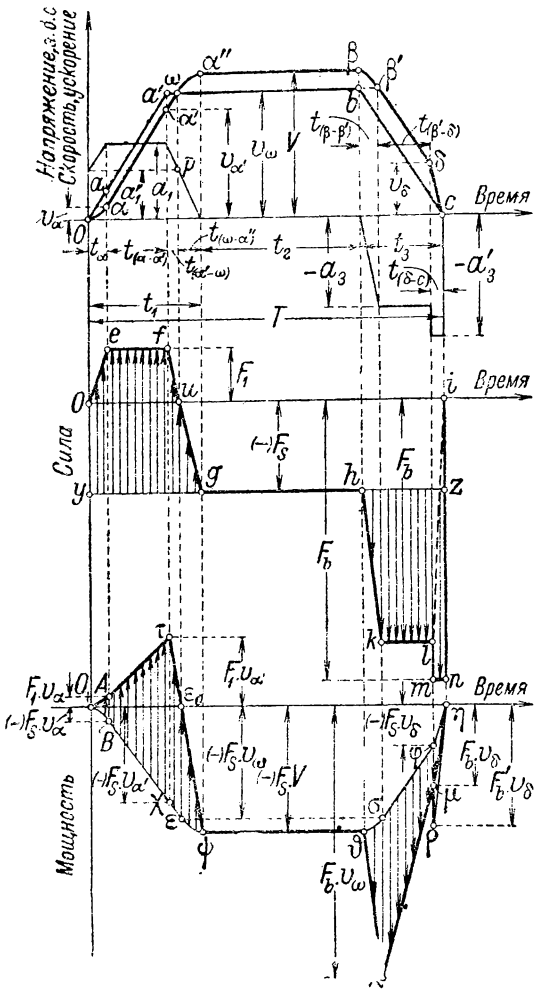
Затем, в продолжение времени $t_{(\alpha-\alpha')}$ разность между ординатами линии напряжения $aa'$ и линии противоэлектродвижущей силы $\alpha\alpha'$ будет оставаться постоянной, соответственно чему и усилие двигателя окажется величиной постоянной, равной $F_1$ *.

Приложенное к двигателю напряжение, достигнув по окончании периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ в точке $a'$ своего наибольшего значения, будет оставаться постоянным в продолжение времени $t_{(\alpha'-\omega)} + t_{(\omega-\alpha'')} + t_2$; что же касается скорости двигателя, то таковая по окончании периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ будет продолжать расти под влиянием отрицательной статической нагрузки $-F_s$. В свою очередь возрастание скорости двигателя обусловливает соответственное возрастание его противоэлектродвижущей силы, которая в про-

---

* При неуравновешенной системе подъема, а также при системе с тяжелым хвостовым канатом, разность между приложенным напряжением и противоэлектродвижущей силой двигателя не будет оставаться постоянной в течение периода $t_{(\alpha-\alpha')}$, а будет изменяться по закону соответственных парабол, уменьшаясь для случая первой системы и увеличиваясь в случае второй системы подъема.

должение времени $t_{(\alpha'-\omega)}$ пусть изменяется по некоторой линии $\alpha'\omega$ таким образом, что разность между постоянным значением приложенного к двигателю напряжения и возрастающей величиной противоэлектродвижущей силы за время $t_{(\alpha'-\omega)}$ соответственно уменьшается, достигая нулевого значения в точке ω, в которой противоэлектродвижущая сила двигателя оказывается равной по величине приложенному к нему напряжению, в каковое мгновение двигатель не будет потреблять тока от пусковой динамо. Соответственно этому движущее усилие, развиваемое двигателем в период $t_{(\alpha'-\omega)}$, будет падать, изменяясь по линии $fu$ от величины $F_1$ до нуля.




Фиг. 74. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками. Режим спуска с моторным ускорением в период $t_1$.

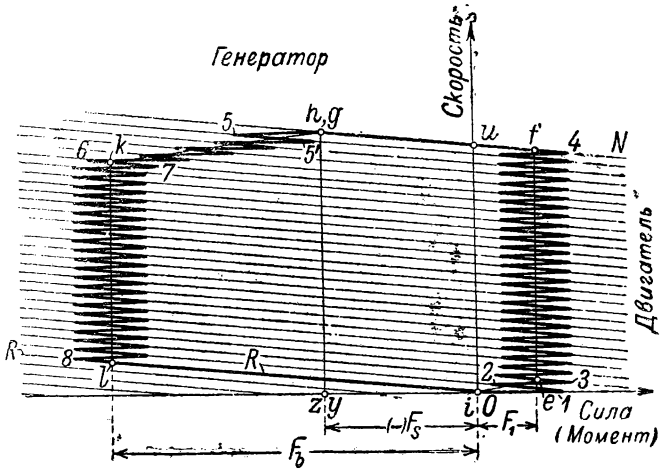
По окончании периода $t_{(\alpha'-\omega)}$ скорость спуска, а следовательно и скорость двигателя, под влиянием отрицательной статической нагрузки будет продолжать расти; при этом, лишь только величина противоэлектродвижущей силы двигателя, перейдя точку ω, превзойдет значение приложенного к нему напряжения, противоэлектродвижущая сила двигателя превратится в его электродвижущую силу, каковой процесс сопровождается переходом подъемного двигателя на генераторный режим, обусловливающий получение необходимого тормозного усилия. Означенная электродвижущая сила двигателя, работающего генератором, вследствие возрастания под влиянием отрицательной статической нагрузки скорости спуска, будет возрастать, изменяясь по некоторой кривой $\omega\alpha''$ до тех пор, пока в точке $\alpha''$ не получится ее значение, необходимое для создания между ею и приложенным к двигателю напряжением разности, являющейся мерилом генерируемого двигателем тока и обусловливающей получение соответственного тормозного усилия, равного по величине отрицательной статической нагрузке — $F_s$. Тормозное усилие, развиваемое двигателем, работающим в качестве генератора, в продолжение времени $t_{(\omega-\alpha'')}$ возрастает от нуля в точке $u$ до величины $F_s$ в точке $g$, изменяясь по линии $ug$.

Ускорение за время $t_{(\alpha'-\omega)} + t_{(\omega-\alpha'')}$ падает от величины $a_1$ до нуля, переходя в мгновение, характеризуемое точкой $p$, через значение собственного ускорения системы $a'_1$.

В продолжение времени $t_2$ постоянная разность между электродвижущей силой двигателя, работающего генератором, и приложенным к нему

напряжением обусловливает постоянство силы генерируемого тока, а следовательно постоянство тормозного усилия $F_s$, развиваемого указанным двигателем *

По окончании периода $t_2$ приложенное к двигателю напряжение начнет уменьшаться, изменяясь по прямой $bc$; электродвижущая сила тоже будет уменьшаться, однако, сначала, в течение времени $t_{(\beta-\beta')}$, несколько медленнее, чем напряжение. Изменение электродвижущей силы и скорости за время $t_{(\beta-\beta')}$ пусть происходит по некоторой кривой $\beta\beta'$; в точке $\beta'$ получается значение разности между электродвижущей силой и приложенным напряжением, соответствующее увеличенной по сравнению с периодом $t_2$ постоянной силе тока, обусловливающей получение необходимого в период замедления $t_{(\beta'-\delta)}$ постоянного тормозного усилия $F_b$**




Фиг. 75. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 74.

За время $t_{(\beta-\beta')}$ тормозное усилие, развиваемое двигателем, возрастает от значения $F_s$ до величины $F_b$, изменяясь по линии $hk$.

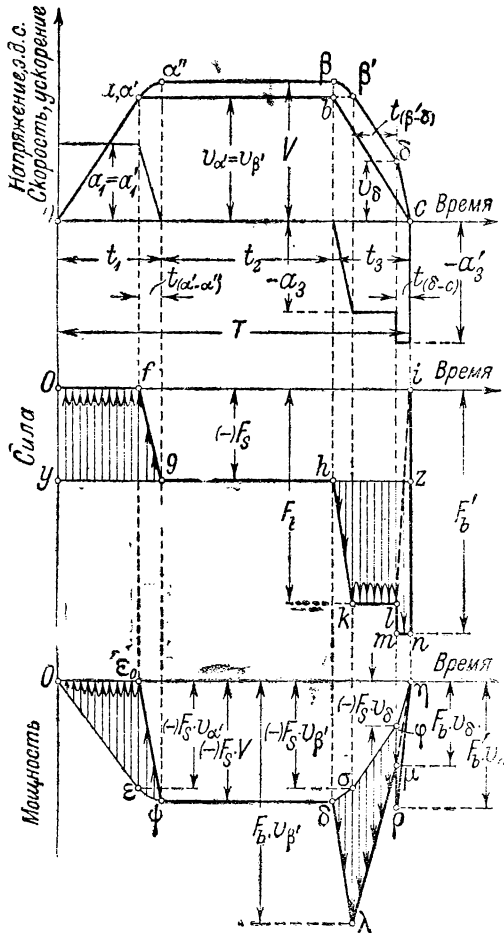
В момент, характеризуемый точкой $\delta$, с целью завершения спуска в течение времени $T$, необходимо на протяжении периода $t_{(\delta-c)}$ применить *механическое* торможение, ибо в противном случае при достижении приложенным к двигателю напряжением нулевого значения скорость опускающегося груза имела бы некоторую отличную от нуля величину. В связи с необходимостью применения в период $t_{(\delta-c)}$ механического тормоза, суммарное тормозное усилие, обусловленное действием как генерируемого подъемным двигателем тока, так и механического тормоза, получит не-

* Для систем подъема неуравновешенной и с тяжелым хвостовым канатом разность между электродвижущей силой двигателя, работающего генератором, и приложенным к нему напряжением в продолжение периода $t_2$ не будет оставаться постоянной, а будет изменяться по линейному закону, соответственно возрастая в первом случае и убывая во втором.

** При неуравновешенной системе подъема, а также при системе с тяжелым хвостовым канатом, разность между электродвижущей силой двигателя, работающего генератором, и приложенным к нему напряжением не будет оставаться постоянной в течение периода $t_{(\beta'-\delta)}$, а будет изменяться по закону соответственных *парабол*, увеличиваясь для случая первой системы и уменьшаясь в случае второй системы подъема.

которое значение $F_b' > F_b$. Линия *li* ориентировочно разделяет область действия электрического и механического торможения в продолжение времени $t_{(\delta-c)}$

Что касается замедления, то в течение периода $t_{(\beta-\beta')}$ оно увеличивается от нуля до значения $a_з$, которое остается постоянным в продолжение времени $t_{(\beta'-\delta)}$; в связи с применением в течение периода $t_{(\delta-c)}$ механического тормоза замедление в последний период получает постоянное значение $a_з' > a_з$. (Противо)электродвижущая сила подъемного двигателя, равно как скорость спуска, за время $T$ изменяются по кривой $O\alpha\alpha'\omega\alpha''\beta\beta'\delta c$; $v_\alpha$, $v_{\alpha'}$, $v_\omega$, $V$ и $v_\delta$—скорости спуска, соответствующие определенным моментам движения системы.




Фиг. 76. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с прямолинейными боками. Режим спуска с собственным (свободным) ускорением системы в период $t_1$.

Движущее усилие, развиваемое двигателем в течение времени $t_\alpha + t_{(\alpha-\alpha')} + t_{(\alpha'-\omega)}$, изменяется по линии *Oefu*; тормозное усилие, развиваемое двигателем, работающим в качестве генератора в продолжение времени $t_{(\omega-\alpha'')} + t_2 + t_3$, изменяется по линии *ughkli*. На диаграммее усилий заштрихованные площади *OefugyO* и *hklmnzh*, характеризующие области действия сил инерции, равны между собой.

Мощность, развиваемая подъемным двигателем в продолжение его работы на моторном режиме, изменятся по линии $AO\tau\varepsilon_0$; мощность, возвращаемая системе при работе двигателя генератором, изменяется по линии $\varepsilon_0\psi\vartheta\lambda\mu\eta$. Заштрихованные площади $OA\tau\varepsilon_0\psi\varepsilon\chi BO$ и $\vartheta\lambda\mu\rho\eta\varphi\sigma\vartheta$, характеризующие область действия сил инерции, должны быть равны между собой. Значения отдельных мощностей на фиг. 74 выражены в виде соответственных произведений из усилия на скорость.

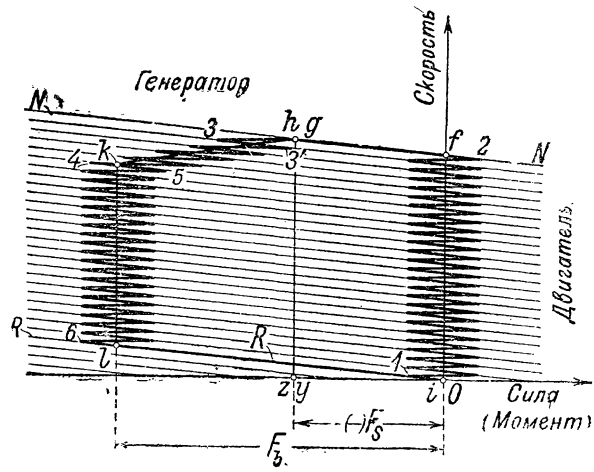
На фиг. 75 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 74. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 74 и на фиг. 75, имеют соответственно одни и те же значения.

Движущие усилия, развиваемые подъемным двигателем в период его работы на моторном режиме, на диаграмме фиг. 75 изменяются по линии *0123e ...4fu*; тормозные усилия, развиваемые двигателем в период его работы генератором, изменяются по линии *u(g, h)55'...6k7...8li*.

*b. Заданное пусковое ускорение равно собственному (свободному) ускорению системы. (Случай свободного движения системы в период пуска).*

Рассматриваемый режим характеризуется диаграммами на фиг. 76, которые в части, относящейся к периодам $t_2$ и $t_3$, являются идентичными с соответственными диаграммами на фиг. 74.

Пусть приложенное к подъемному двигателю напряжение в продолжение времени спуска $T$ изменяется по кривой (трапеции) $O(a,\alpha')bc$ (фиг. 76). В течение периода $(t_1-t_{(\alpha'-\alpha'')})$, при равенстве ускорений $a_1=a'_1$, система оказывается предоставленной самой себе, ввиду чего для осуществления данного режима противоэлектродвижущая сила двигателя и приложенное к нему напряжение по величине должны быть равны между собой. В результате этого двигатель не будет потреблять тока от пусковой динамо. В точке $(a,\alpha')$ приложенное напряжение достигает своего максимального значения, остающегося постоянным в течение времени $t_{(\alpha'-\alpha'')}+t_2$. Что касается противоэлектродвижущей силы двигателя, то она, вследствие возрастания под влиянием отрицательной статической нагрузки скорости спуска, в точке $(a,\alpha')$ переходит в электродвижущую силу, которая в продолжение времени $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ будет возрастать до тех пор, пока в точке $\alpha''$ не достигнет значения, достаточного для создания необходимого тормозного усилия $F_s$ в период полного хода.




Фиг. 77. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 76.

Кривая $O(a,\alpha')\alpha''\beta\beta'\delta c$ в соответственных масштабах выражает закон изменения как (противо)электродвижущей силы подъемного двигателя, так и скорости спуска за время $T$.

Постоянное ускорение $a_1=a'_1$, имеющее место в продолжение времени $(t_1-t_{(\alpha'-\alpha'')})$, в течение периода $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ падает от указанного значения в начале этого периода до нуля в конце его. Что касается замедления, то характер его изменения идентичен с таковым на фиг. 74.

На диаграмме усилий кривая $fghkli$ представляет закон изменения, развиваемого подъемным двигателем, работающим в качестве генератора, тормозного усилия за время $t_{(\alpha'-\alpha'')}+t_2+t_3$. В течение времени $(t_1-t_{(\alpha'-\alpha'')})$, как указывалось выше, подъемный двигатель не потребляет от пусковой динамо тока, равным образом он его и не генерирует.

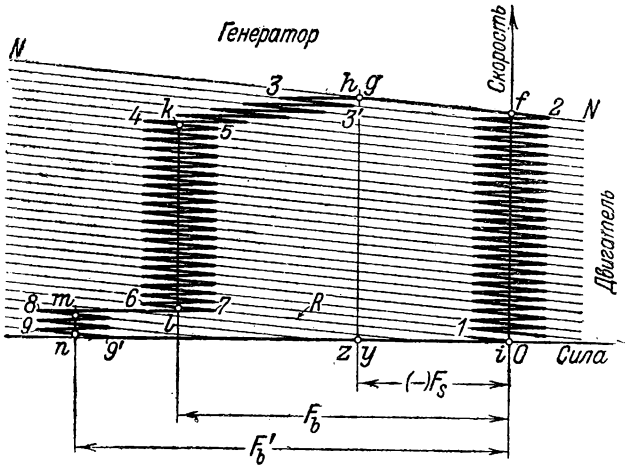
Мощность, возвращаемая подъемным двигателем системе в течение времени $t_{(\alpha'-\alpha'')}+t_2+t_3$, изменяется по кривой $\varepsilon_0\psi\delta\lambda\mu\eta$.

Диаграмма на фиг. 77 представляет графическую интерпретацию работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 76. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 76 и на фиг. 77, имеют соответственно одни и те же значения.

Усилие, развиваемое подъемным двигателем в период равенства приложенного к нему напряжения и его (противо)электродвижущей силы, которое теоретически должно равняться нулю, в действительности, согласно

диаграмме на фиг. 77, будет изменяться по зигзагообразной линии *01...2f*, варьируя около нулевой линии *0f*, как около среднего значения, причем при переходе с одних характеристик на другие попеременно будут иметь место механически взаимно компенсирующиеся как двигательные, так и генераторные (тормозные) режимы.

Таким образом *получение в пусковой период при режиме спуска нулевого усилия, развиваемого подъемным двигателем, в системе Леонарда является условным.* Тормозное усилие, развиваемое двигателем за период $t_2+t_3$, на фиг. 77 изменяется по линии *f(g,h)33'...4k5...6li.*




Фиг. 78. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик при наличии режима противотока в период завершения спуска применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 76.

Следует отметить, что, независимо от рассмотренного выше (фиг. 74 и 76) применения в период $t_{(5-c)}$ механического тормоза при отрицательной статической нагрузке, операция завершения спуска при ручном управлении может быть осуществлена также чисто *электрическим* путем, посредством перевода рычага управления через нулевое положение в обратную сторону, в результате чего подъемный двигатель перейдет на режим *противотока*, при котором будет работать до полного своего останова, переходя при этом с одной характеристики на другую, в связи с переводом рычага управления через соответственные ступени реостата в цепи возбуждения пусковой динамо. На фиг. 78 представлена примерная графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик при наличии режима противотока в период завершения спуска; усилия, развиваемые двигателем в период замедления $t_3$, изменяются по линии *h33'...4k5...6l78m...9n9'zi*; остальные обозначения общие с таковыми на фиг. 76 и 77

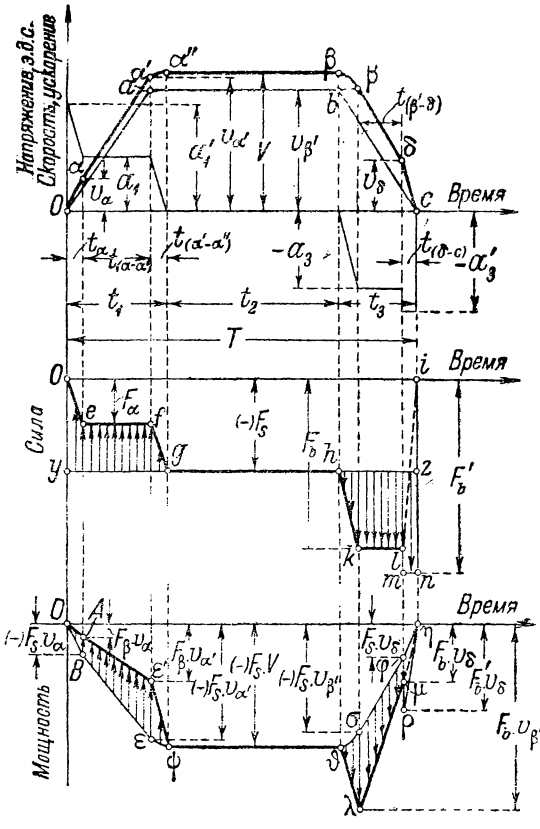
*c. Заданное пусковое ускорение меньше собственного свободного ускорения системы. (Случай тормозного (генераторного) режима в период пуска).*

Данный режим характеризуется диаграммами на фиг. 79, которые в части, относящейся к периодам $t_2$ и $t_3$, являются идентичными с соответственными диаграммами на фиг. 74 и 76.

Приложенное к подъемному двигателю напряжение в продолжение времени спуска $T$ пусть изменяется по кривой (трапеции) *Oabc* (фиг. 79). Так как в период пуска заданное ускорение $a_1$ должно быть меньше собственного (свободного) ускорения $a'_1$ системы, то в продолжение указанного периода должно иметь место подтормаживание машины, сопровождаемое генераторным режимом работы подъемного двигателя. В связи

* Соотношение между усилиями $F_b$ и $F_b'$ на фиг. 78 несколько отлично от такового на фиг. 76, каковое обстоятельство вызвано желанием придания чертежу на фиг. 78 большей ясности в области работы подъемного двигателя при режиме противотока.

с этим приложенное к двигателю напряжение в течение всего периода $t_1$ должно быть меньше его электродвижущей силы. В начальный промежуток времени $t_\alpha$, в течение которого происходит уменьшение ускорения от значения $a'_1$ до заданной величины $a_1$, электродвижущая сила двигателя, работающего генератором, будет изменяться по некоторой кривой $O\alpha$ таким образом, что разность между ординатами линии электродвижущей силы и линии напряжения, являющаяся мерилом генерируемой подъемным двигателем силы тока, а также получаемого при этом тормозного усилия, в продолжение указанного времени будет возрастать, обусловливая тем самым соответственное возрастание упомянутого тормозного усилия от нулевого значения в начале периода $t_\alpha$ до величины $F_\alpha$ в конце этого периода.




Фиг. 79. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы прямолинейными боками. Режим спуска с тормозным ускорением в период $t_1$.

Затем, в продолжение времен $t_{(\alpha-\alpha')}$ разность между ординатами линии электродвижущей силы $\alpha\alpha'$ и линии приложенного к двигателю напряжения $Oa$ будет оставаться постоянной, соответственно чему и тормозное усилие окажется величиной постоянной, равной $F_\alpha$.

Приложенное к двигателю напряжение, достигнув по окончании периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ в точке $a$ своего наибольшего значения, будет оставаться постоянным в продолжение времени $t_{(\alpha'-\alpha'')}+t_2$; что же касается скорости двигателя, то таковая по окончании периода $t_{(\alpha-\alpha')}$ будет продолжать расти под влиянием отрицательной статической нагрузки $-F_s$. В свою очередь, возрастание скорости двигателя обусловливает соответственное возрастание его электродвижущей силы, которая в продолжении времени $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ пусть изменяется по некоторой линии $\alpha'\alpha''$ таким образом, что разность между возрастающей ее величиной и постоянным значением приложенного к двигателю напряжения за врямя $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ соответственно увеличивается, достигая в точке $\alpha''$ значения, обусловливающего получение соответственного тормозного усилия, равного по величине отрицательной статической нагрузке $-F_s$. В соответствии с изменением электродвижущей силы подъемного двигателя, равно как и его скорости, по линии $\alpha'\alpha''$, тормозное усилие за время $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ возрастает от величины $F_\alpha$ в точке $f$ до значения $F_s$ в точке $g$, изменясь по линии $fg$.

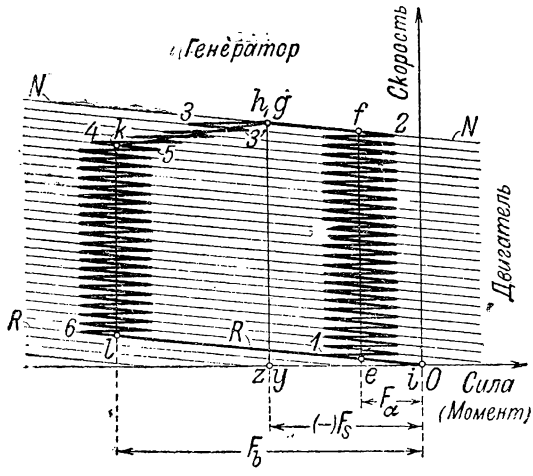
Ускорение в течение периода $t_{(\alpha'-\alpha'')}$ падает от величины $a_1$ до нуля.

Электродвижущая сила подъемного двигателя, работающего генератором в течение всего периода $T$, равно как и скорость спуска, изменяются по кривой $Oaa'a''\beta\beta'\delta c$.

Тормозное усилие, развиваемое подъемным двигателем, работающим в качестве генератора в течение времени $T$, изменяется по линии $Oefghkli$.

Мощность, возвращаемая системе подъемным двигателем за время $T$, изменяется по линии $OA\varepsilon'\psi\vartheta\lambda\rho\eta$. Значения отдельных мощностей на фиг. 79 выражены в виде соответственных произведений из усилия на скорость.

На фиг. 80 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик, применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 79. Обозначения, общие на диаграмме усилий фиг. 79 и на фиг. 80, имеют соответственно одни и те же значения.




Фиг. 80. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 79.

Тормозное усилие, развиваемое подъемным двигателем, работающим на генераторном режиме за весь период спуска, на фиг. 80 изменяется по линии $Oe1....2f\,(g,h)\,33'....4k5....6li$.

## 2. Трехпериодная тахограмма с параболической частью в период пуска *

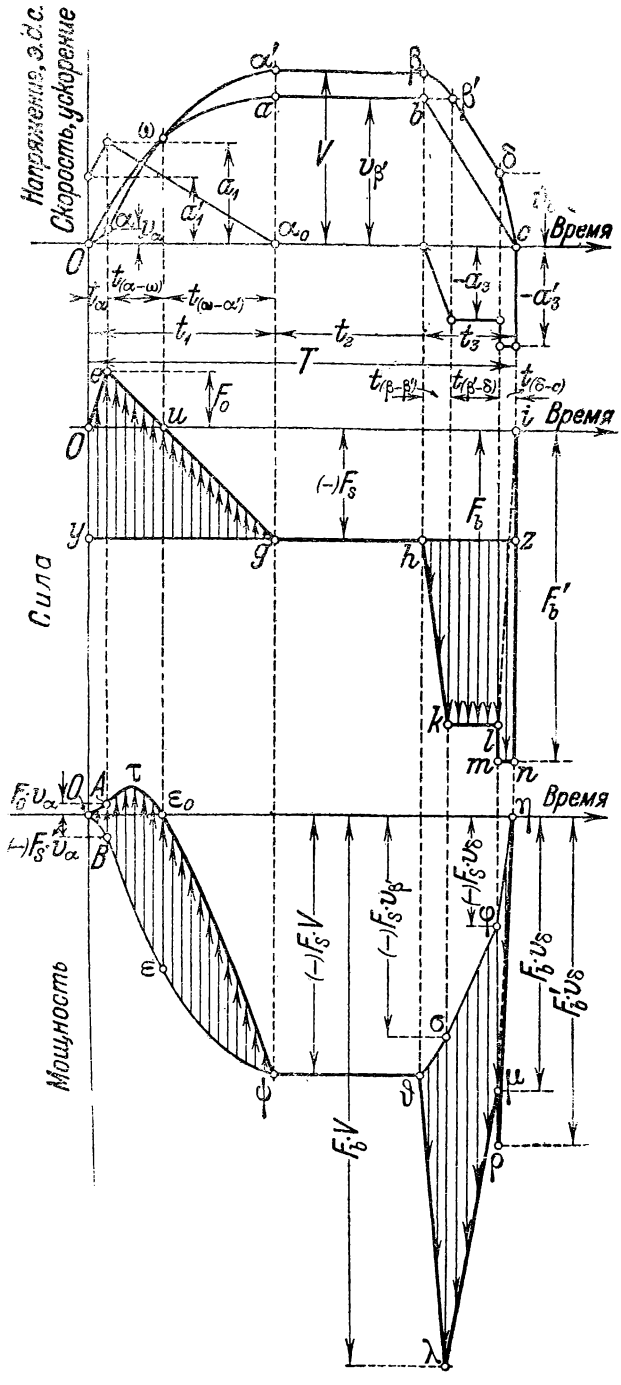
Здесь ограничимся рассмотрением статически уравновешенной системы.

*а. Заданное начальное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы.*

На верхней диаграмме фиг. 81 кривая $O\omega abc$ с *параболической* частью $O\omega a$ в период $t_1$ представляет закон изменения приложенного к подъемному двигателю напряжения за весь период спуска $T$ В начальный промежуток времени $t_\alpha$, в течение которого происходит увеличение собственного (свободного) ускорения системы $a'_1$ до заданной начальной величины $a_1$, противоэлектродвижущая сила двигателя будет изменяться по некоторой кривой $O\alpha$, обусловливая соответственное возрастание развиваемого двигателем движущего усилия от нулевого значения в начале движения до величины $F_0$ в конце периода $t_\alpha$. Затем, в продолжение времени $t_{(\alpha-\omega)}$ будет происходить дальнейшее возрастание скорости, а с ней и противоэлектродвижущей силы двигателя по линии $\alpha\omega$ до тех пор, пока в точке $\omega$ не сравняется указанная противоэлектродвижущая сила с приложенным к нему напряжением, каковой момент времени характеризуется равенством соответственного значения заданного переменного ускорения с собственным ускорением системы. В продолжение времени $t_{(\alpha-\omega)}$ имеет место посте-

* Здесь не рассматривается тахограмма с параболической ветвью в период *замедления*, могущая найти на практике применение при подъемной установке, предназначенной для работы преимущественно на спуск груза, например, с целью доставки с поверхности в шахту закладки. Подобный режим рассмотрен автором в труде: „Горная Электромеханики," Том II. Рудничный Электрический подъем. Часть 2-ая. Физико-механические основы. Стр. 143—145. 1937.

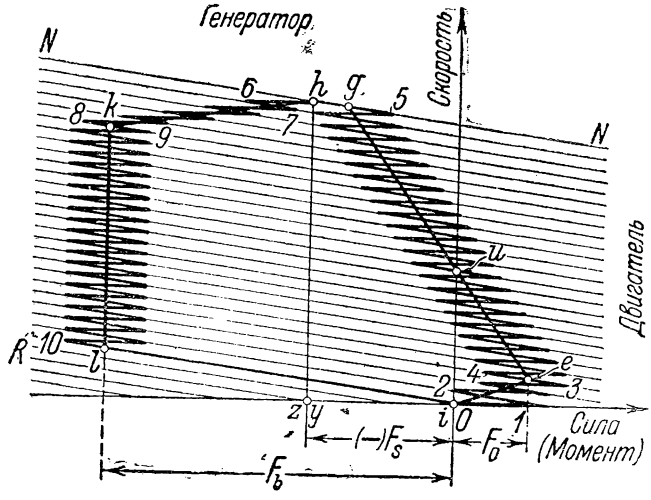
пенное уменьшение разности между напряжением и противоэлектродвижущей силой двигателя таким образом, что падение развиваемого двигателем




Фиг. 81. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с параболической частью кривой напряжения в период пуска. Режим спуска при заданном начальном пусковом ускорении, превышающем собственное (свободное) ускорение системы.

усилия происходит по прямой *eu* от значения $F_0$ до нуля в точке *u*, соответствующей точке ω на верхней диаграмме фиг. 81.

Под влиянием отрицательной статической нагрузки скорость подъема после перехода через точку ω будет продолжать расти, в связи с чем противоэлектродвижущая сила двигателя перейдет в электродвижущую силу, превосходящую по величине приложенное к двигателю напряжение, каковое обстоятельство обусловливает переход двигателя на генераторный (тормозной) режим. В течение периода $t_{(\omega-a')}$ будет происходить увеличение разности между электродвижущей силой двигателя и приложенным к нему напряжением, обусловливающее соответственное возрастание тормозного усилия согласно прямой *ug* до значения, равного по величине и противоположного по знаку отрицательной статической нагрузке $F_s$.




Фиг. 82. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг 81.

В периоды $t_2$ и $t_3$ режимы работы подъемного двигателя идентичны с соответственными режимами в указанные периоды для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 74.

На верхней диаграмме фиг. 81 кривая $O\alpha\omega a'\beta\beta'\delta c$ выражает в определенных масштабах как изменение (противо)электродвижущей силы двигателя, так и скорости подъема.

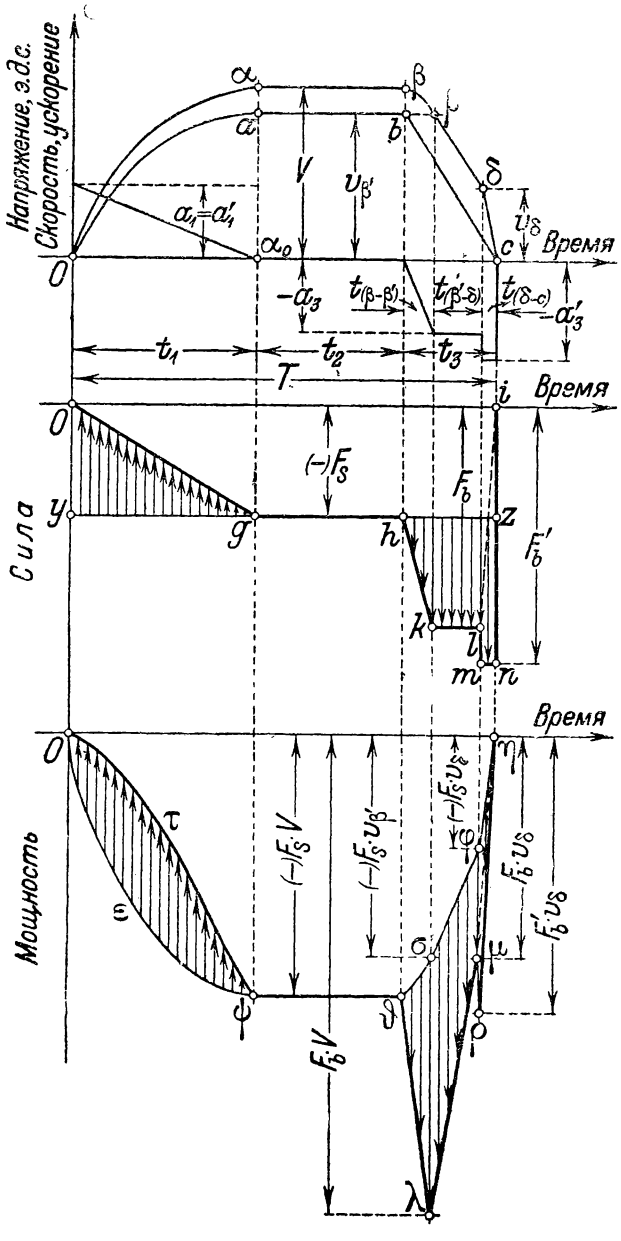
Мощность, развиваемая подъемным двигателем за период его работы на моторном режиме, изменяется по линии $AO\tau\varepsilon_0$; мощность, возвращаемая системе при работе двигателя генератором, изменяется по линии $\varepsilon_0\psi\vartheta\lambda\mu\eta$. Мощность, обусловленная отрицательной статической нагрузкой в течение всего периода спуска *T*, изменяется по линии $OB\varepsilon\psi\vartheta\sigma\varphi\eta$.

На фиг. 82 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 81. Усилия, развиваемые подъемным двигателем за весь период спуска, на диаграмме фиг. 82 изменяются по линии *012... 3e4... u... 5(g,h) 67... 8k9... (10) li**.

* Несовпадение на фиг. 82 точек *g* и *h* обусловлено наличием условий, аналогичных указанным выше при рассмотрении диаграммы на фиг. 73.

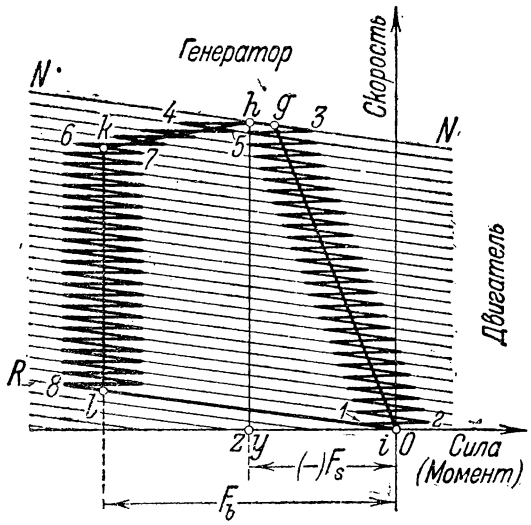
*b. Заданное начальное пусковое ускорение равно собственному (свободному) ускорению системы.*

На верхней диаграмме фиг. 83 кривая *Oabc* с *параболической* частью *Oa* в период $t_1$ представляет закон приложенного к подъемному двигателю напряжения за период спуска *T*. На той же диаграмме кривая




Фиг. 83. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с параболической частью кривой напряжения в период пуска. Режим спуска при заданном начальном пусковом ускорении равном собственному (свободному) ускорению системы.

$Oa\beta\beta'\delta c$ в соответственных масштабах изображает как закон изменения электродвижущей силы подъемного двигателя, работающего все время генератором, так и закон изменения скорости подъема. Соответственно увеличивающаяся в продолжение периода $t_1$ разность между электродвижущей силой двигателя и приложеным к нему напряжением обусловливает изменение по закону прямой линии $Og$ тормозного усилия, которое при этом увеличивается от нулевого значения в начале движения до значения, равного по величине и противоположного по знаку отрицательной статической нагрузке $F_s$, в конце периода $t_1$. В периоды $t_2$ и $t_3$ режимы работы подъемного двигателя идентичны с соответственными режимами в указанные периоды для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 76.




Фиг. 84. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 83.

На диаграмме усилий (фиг. 83) заштрихованные соответственно направленными стрелками площади $OygO$ и $hklmnzh$, характеризующие область действия сил инерции, равны между собой.

Мощность, возвращаемая подъемным двигателем системе за весь период спуска $T$ его работы в качестве генератора, изменяется по линии $O\tau\psi\vartheta\lambda\mu\eta$ (фиг. 83). Мощность, обусловленная отрицательной статической нагрузкой за период $T$, изменяется по линии $O\varepsilon\psi\vartheta\sigma\varphi\eta$.

На нижней диаграмме фиг. 83 заштрихованные площади $O\varepsilon\psi\tau O$ и $\vartheta\lambda\mu\rho\eta\varphi\sigma\vartheta$, характеризующие области действия сил инерции, должны быть равны между собой.

На фиг. 84 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 83.

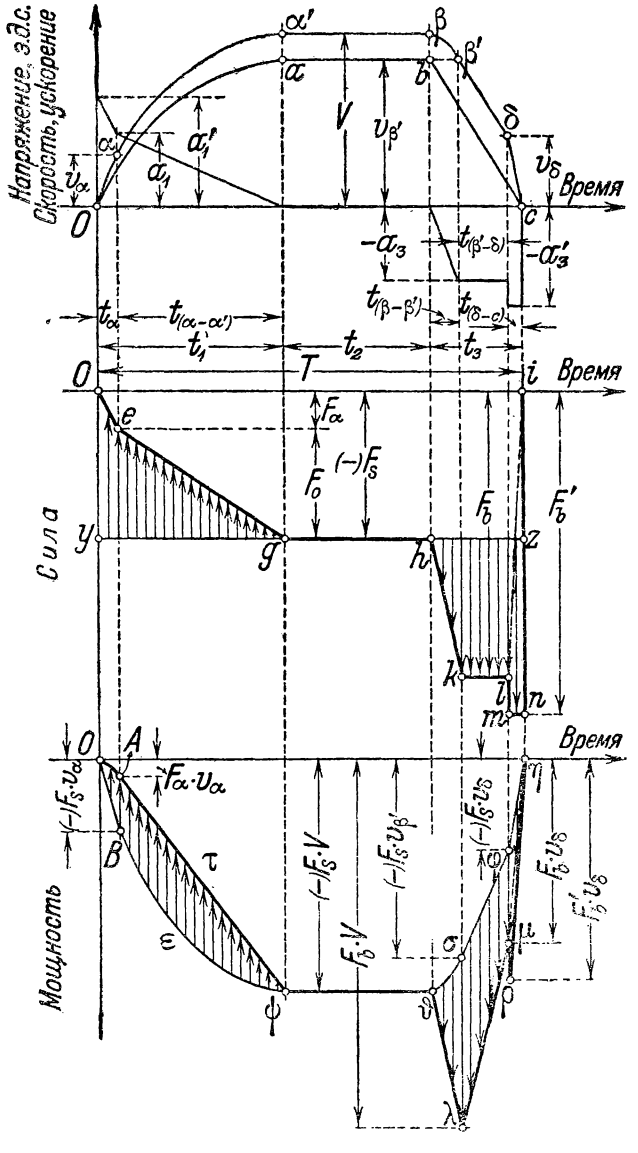
Тормозные усилия, развиваемые указанным двигателем, работающим в течение всего периода спуска в качестве генератора, на диаграмме фиг. 84 изменяются по линии *O12... 3 (g, h) 45... 6k 7 8li.*

### *c. Заданное начальное пусковое ускорение меньше собственного (свободного) ускорения системы.*

На верхней диаграмме фиг. 85 кривая $Oabc$ с *параболической* частью $Oa$ в период $t_1$ выражает закон изменения приложенного к подъемному двигателю напряжения за весь период спуска $T$

В начальный период движения $t_\alpha$, в течение которого происходит падение собственного ускорения $a'_1$ системы до начального заданного значения ускорения $a_1$, скорость, а с нею и электродвижущая сила подъемного двигателя, будет изменяться по некоторой линии $O\alpha$ таким образом, что тормозное усилие, развиваемое указанным двигателем, работающим в качестве генератора, будет расти по линии $Oe$; означенный характер изменения в период $t_\alpha$ тормозного усилия от нулевого значения до величины $F_\alpha$ обусловлен соответственным изменением в этот период разности между электродвижущей силой подъемного двигателя и приложенным

к нему напряжением. Затем, в продолжение времени $t_{(\alpha-\alpha')}$ имеет место дальнейшее возрастание разности между электродвижущей силой этого двигателя и приложенным к нему напряжением таким образом, что увеличение развиваемого двигателем тормозного усилия до значения $F_s = F_0 +$




Фиг. 85. Диаграммы, характеризующие статически уравновешенную систему подъема с приводом Леонарда для трехпериодной тахограммы с параболической частью кривой напряжения в период пуска. Режим спуска при заданном начальном пусковом ускорении меньшем собственного (свободного) ускорения системы.

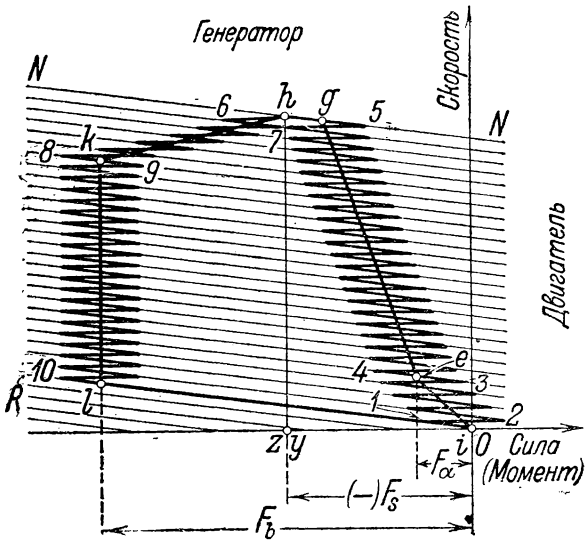
$+ F_\alpha$, где $F_0$ — заданное начальное значение тормозного усилия, будет происходить по закону прямой линии $eg$.

В периоды $t_2$ и $t_3$ режимы работы подъемного двигателя идентичны с соответственными режимами в указанные периоды для случая, характеризуемого диаграммами на фиг. 79.

На верхней диаграмме фиг. 85 кривая $O\alpha\alpha'\beta\beta'\delta c$ выражает в определенных масштабах как изменение электродвижущей силы подъемного двигателя, так и скорости подъема.

На диаграмме усилий (фиг. 85) заштрихованные площади *OegyO* и *hklmnzh*, характеризующие области действия сил инерции, равны между собою.

Мощность, возвращаемая подъемным двигателем системе за весь период спуска $T$ его работы в качестве генератора, изменяется по линии $OA\tau\psi\vartheta\lambda\mu\eta$. Мощность, обусловленная отрицательной статической нагрузкой, за период $T$ изменяется по линии $OB\varepsilon\psi\vartheta\sigma\varphi\eta$.




Фиг. 86. Диаграмма работы подъемного двигателя в системе Леонарда на фоне его механических характеристик применительно к режиму, характеризуемому диаграммами на фиг. 85.

На нижней диаграмме фиг. 85 заштрихованные площади $OA\tau\psi\varepsilon BO$ и $\vartheta\lambda\mu\eta\varphi\sigma\vartheta$, характеризующие области действия сил инерции, должны быть равны между собой.

На фиг. 86 представлена графическая интерпретация работы подъемного двигателя на фоне его механических характеристик применительно к режиму подъема, характеризуемому диаграммами на фиг. 85. Тормозные усилия, развиваемые указанным двигателем, работающим в течение всего периода спуска в качестве генератора, на диаграмме фиг. 86 изменяются по линии *012... 3e4... 5 (g, h) 6 7... 8k 9... (10)li**

В заключение рассмотрения физико-механических свойств привода по сист. Леонарда следует отметить, что в результате влияния сопротивления обмоток якоря пусковой динамо и подъемного двигателя у последнего имеет место известное смягчение характеристик; указанное явление обусловливает, в зависимости от величины нагрузки, бо́льшую или меньшую несогласованность между положениями рычага управления и скоростью подъема.

Достижение более или менее полного соответствия между положениями рычага управления и скоростью подъемного двигателя может быть достигнуто посредством сдвига щеток у пусковой динамо на некоторый (небольшой) угол против направления ее вращения (явление компандирования), благодаря чему получается соответственное компенсирование падения напряжения в обмотке якоря указанной динамо и, как следствие этого, определенное увеличение жесткости характеристик подъемного двигателя.

Следует при этом иметь в виду, что у подъемного двигателя, обладающего реверсией, щетки всегда должны быть расположены строго по геометрической нейтрали.

---

* Значительный интерес представляют построенные инж. А. Г Ефановым диаграммы скорости и тока для пускового периода работы подъема с приводом Леонарда при контакторном управлении. (См. доклад А. Г Ефанова „Шахтные подъемные машины с электроприводом по схеме Леонарда", напечатанный в „Материалах для участников Совещания по Электрификации угольной и горнорудной промышленности", рис. 3. Харьков, 1939 г.).

Необходимо также отметить, что соответственное изменение наклона характеристик подъемного двигателя, обусловливающее высокую точность управления и практически полную согласованность между положениями рычага управления и скоростью подъема при различных его режимах, может быть достигнуто применением предложенных в последнее время американскими фирмами особых устройств, как то: *амплидина* (*GEC*), *рототрола* (*Westinghouse*), *регалакса* (*Allis-Chalmers*)*

## II. Определение мощности машин системы Леонарда

Общее выражение эффективной мощности $P_m$ подъемного двигателя в киловаттах имеет следующий вид:

$$P_{m(\text{kW})} = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{V^2\sum_{i=1}^{i=n} F^2_{m(i)}\cdot\frac{1}{\eta^2_z}\cdot t_{m(i)} + V^2_g\sum_{i=1}^{i=k} F^2_{g(i)}\eta^2_z\eta^4_{g(i)}{}^{**}t_{g(i)}}{\sum_{i=1}^{i=n+k} t_i + \frac{1}{3}\Theta}}, \quad (303)$$

где $F_{m(i)}$ — положительные усилия в *кг* на окружности барабана, имеющие место в отдельные периоды подъема $t_{m(i)}$ при моторном режиме двигателя; $n$ — число указанных периодов; $F_{g(i)}$ — отрицательные усилия в *кг* на окружности барабана в периоды $t_{g(i)}$ генераторного режима двигателя; $k$ — число последних периодов; $V$ — максимальная скорость подъема в *м/сек* при моторном режиме; $V_g$ — указанная скорость, соответствующая генераторному режиму; $V_g \cong (1{,}04 - 1{,}06)V$;*** $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи между двигателем и барабаном в случае наличия таковой; при отсутствии указанной передачи $\eta_z = 1$; $\eta_{g(i)}$ — к. п. д. подъемного двигателя, работающего генератором в периоды $t_{g(i)}$; $\Theta$ — пауза. Периоды $t_{m(i)}$, $t_{(i)}$ и $\Theta$ выражаются в секундах.

Американская фирма *GEC* при трехпериодной тахограмме для знаменателя подкоренной величины в формуле эффективной мощности принимает выражение:

$$\frac{3}{4}t_1 + t_2 + \frac{3}{4}t_3 + \frac{1}{2}\Theta. \quad (C)$$

Формула (303) может быть соответственным образом применена также в случае, когда режимы подъема и спуска взаимно чередуются; при этом должна быть учтена двойная пауза $\Theta$.

В применении к диаграммам на фиг. 87 ****, характеризующим статически уравновешенную систему подъема с параболической частью тахограммы в период $t_1$, формула (303) принимает вид:

$$P_{m(\text{kW})} = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{\left(\frac{F_1'^2 + F_1''^2 + F_1'F_1''}{3}t_1 + F_2{}^2 t_2\right)\frac{1}{\eta^2_z}\cdot V^2 + F_g{}^2\eta^2_z\eta_g{}^4 V_g{}^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + \frac{1}{3}\Theta}} \quad (304)$$

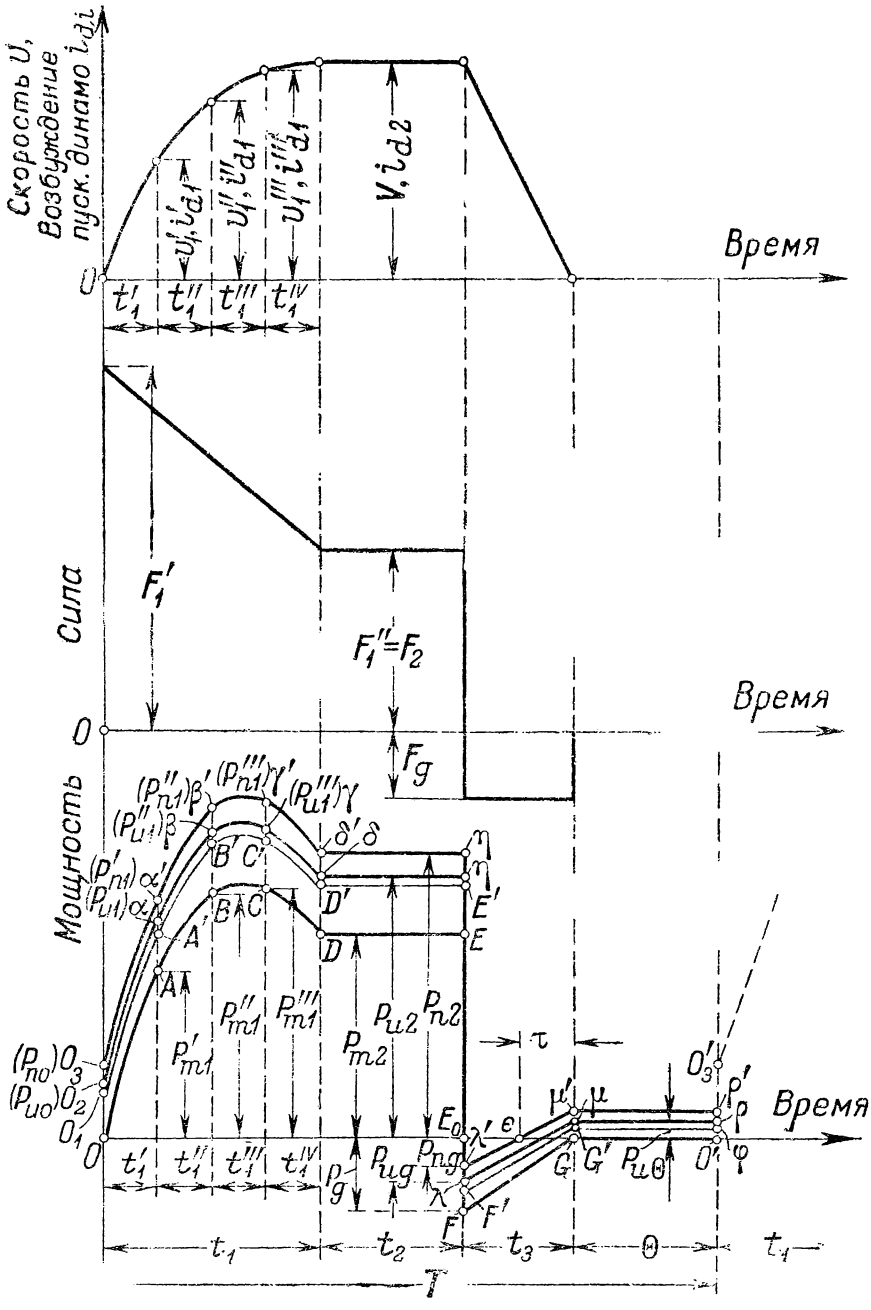
Сведения об этих устройствах см. в специальной литературе.

** Относительно наличия множителя $\eta^4_{g(i)}$ — см. соображения на стр. 214.

*** Ориентировочно можно принять $V_g \cong V$.

**** См. стр. 250.

где $F_1'$, $F_1'' = F_2$, $F_g$ — соответственные усилия на окружности барабана в *кг*; $\eta_g$ — к. п. д. двигателя, работающего генератором в период $t_3$.




Фиг. 87. Диаграммы, характеризующие работу подъемного двигателя и умформерного (преобразовательного) агрегата системы Леонарда в применении к статически уравновешенной системе подъема. Скорость подъема в период пуска изменяется по параболе.

Мощность двигателя должна быть проверена на допустимую перегрузку, которая при *моторном* режиме может быть предварительно опре-

делена из выражения:

$$\gamma = \frac{F_{max}}{F_m} \leqslant 2 \qquad (305)$$

где $F_{max}$ и $F_m$ имеют те же значения, что и в выражении (295), определяющем перегрузку асинхронного подъемного двигателя.

Равным образом указанная перегрузка может быть определена из выражения:

$$\gamma = \frac{P_{max}}{P_m \cdot \eta_z} \leqslant 2 \qquad (306)$$

где $P_{max}$, $P_m$ и $\eta_z$ имеют значения, входящие в выражение (297), характеризующее перегрузку асинхронного подъемного двигателя.*

Перегрузка двигателя при *генераторном* режиме определяется на основании выражения (305), в котором $F_m$ получается из выражения (296а). Означенная перегрузка может быть также определена согласно выражению:

$$\gamma = \frac{P_{max} \cdot \eta_z}{P_m} \leqslant 2. \qquad (306а)$$

Если на основании выражений (305), (306), (306а) получится перегрузка $\gamma > 2$, то расчетная мощность двигателя должна быть увеличена до значения, определяемого выражением:

$$P_m' = P_m \frac{\gamma}{2}, \qquad (307)$$

где $P_m$—мощность, определяемая из выражения (303) или (304); $\gamma$ получается соответственно из выражений (305), (306) и (306а).

Перегрузка двигателя при экстренных моментах определяется из выражения:

$$\gamma' = \frac{F_{extr}}{F_{ном}} \leqslant 2{,}5, \qquad (308)$$

где $F_{extr}$ и $F_{ном}$ имеют значения, входящие в выражение (299), применяемое для случая асинхронного подъемного двигателя.

В случае получения значения $\gamma' > 2{,}5$ мощность двигателя должна быть увеличена до значения, определяемого выражением:

$$P_m'' = \frac{F_{extr} \cdot V}{2{,}5\,\eta_z}, \qquad (309)$$

где $V$ — наибольшая скорость подъема, $\eta_z$ — к. п. д. зубчатой передачи.

Увеличение мощности до указанного значения $P_m''$ может быть допущено, однако, лишь в том случае, если $\gamma' \leqslant 3{,}3$, что соответствует предельному увеличению мощности двигателя на 32% .**

При $\gamma' > 3{,}3$ экстренные моменты должны быть устранены путем применения соответственных приспособлений механического характера.***

Так как условия охлаждения (вентилирования) *пусковой динамо*, вращающейся непрерывно с практически постоянной большой скоростью, значительно лучше, чем подъемного двигателя, то, не смотря на потери в последнем, эффективную мощность указанной динамо $P_d$ на ее зажимах

---

* В случае тахограммы *параболической* ...ствью в период пуска, формула (306) неприменима.

** $\frac{3{,}3 - 2{,}5}{2{,}5} 100\% = 32\%$.

*** См. стр. 218.

*ориентировочно* можно принимать равной мощности подъемного двигателя на его валу, т. е.

$$P_d \cong P_m. \tag{310}$$

Более точное значение мощности пусковой динамо может быть определено в функции отдельных мощностей на ее зажимах, с учетом различных значений к. п. д. подъемного двигателя; при этом, с целью получения результатов, не противоречащих данным практики, знаменатель подкоренной величины в выражении, определяющем мощность пусковой динамо по условиям нагревания, должен быть соответственно увеличен по сравнению с аналогичным знаменателем в формуле, служащей для определения мощности подъемного двигателя, однако, указанный знаменатель не должен быть больше полного периода подъема, включая паузу.

Таким образом, аналогично формуле (303) для эффективной мощности $P_d$ пусковой динамо получаем выражение:

$$P_{d(\mathrm{kW})} = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{V^2\sum_{i=1}^{i=n} F^2_{m(i)}\frac{1}{\eta^2_z}\cdot\frac{1}{\eta^2_{m(i)}}\cdot t_{m(i)} + V^2_g\sum_{i=1}^{i=k} F^2_{g(i)}\eta^2_z\eta^2_{g(i)}t_{g(i)}}{\sum_{i=1}^{i=n+k} t_i + \Theta}} \tag{311}$$

где $\eta_{m(i)}$ — к. п. д. подъемного двигателя для соответственных значений мощности последнего, работающего на моторном режиме. Все остальные величины имеют значения, идентичные с таковыми в формуле (303).

Здесь следует отметить, что во втором члене числителя подкоренной величины выражения (311) к. п. д. подъемного двигателя, работающего генератором, $\eta_{g(i)}$ введен во второй степени (а не в четвертой) на основании тех соображений, что при определении мощности пусковой динамо механическая мощность на валу подъемного двигателя, работающего в качестве генератора, приводится к электрической мощности на его зажимах, а не к механической мощности указанного двигателя, соответствующей моторному режиму, в связи с чем в данном случае учитывается лишь одно преобразование энергии, а именно, механической в электрическую.

В применении к диаграммам на фиг. 87 выражение (311) для эффективной мощности пусковой динамо принимает вид:

$$P_{d(\mathrm{kW})} = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{\left[\frac{\left(F_1'\frac{1}{\eta_{m1}}\right)^2 + \left(F_1''\frac{1}{\eta_{m2}}\right)^2 + F_1'F_1''\frac{1}{\eta_{m1}}\cdot\frac{1}{\eta_{m2}}}{3}\cdot t_1 + \left(F_2\frac{1}{\eta_{m2}}\right)^2 t_2\right]\frac{V^2}{\eta^2_z} + F^2_g\eta^2_z\eta^2_g V^2_g t_3}{t_1+t_2+t_3+\Theta}} \tag{312}$$

где $\eta_{m1}$ и $\eta_{m2}$ — значения к. п. д. подъемного двигателя, имеющие место при его мощностях, соответствующих усилиям $F_1'$ и $F_1'' = F_2$, отнесенным к окружности барабана, при полной скорости подъема; $\eta_g$ — к. п. д. двигателя, работающего генератором в период $t_3$.

При определении эффективной мощности *умформерного двигателя* необходимо иметь в виду принципиальное соображение, состоящее в том, что при постоянном напряжении, приложенном к этому двигателю, *сила тока*, производящего нагрев его, в периоды полной нагрузки *изменяется* примерно *по тому же закону, что и мощность*. Однако при уменьшен-

ной нагрузке, имеющей место в периоды замедления и паузы, в результате получаемого при этом ухудшении $\cos\varphi$, характер изменения нагревающего умформерный двигатель тока и его мощности получается отличным.

Принимая во внимание вышесказанное, общее выражение для эффективной мощности умформерного двигателя можем представить в следующем виде:

$$P_u = \mu \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} P^2_{u\,(i)} t_{u\,(i)} + \sum_{i=1}^{i=k} P^2_{ug\,(i)} \eta^4_{ug(i)}\, t_{ug\,(i)}}{\sum_{i=1}^{i=n+k} t_i + \Theta}} \qquad (313)$$

где $P_{u(i)}$ — мощности на валу умформерного двигателя, имеющие место в отдельные периоды $t_{u\,(i)}$ его моторного режима, $n$ — число указанных периодов, $P_{ug(i)}$ — мощности на валу означенного двигателя в периоды $t_{ug\,(i)}$ его генераторного режима, $k$ — число последних периодов; $\eta_{ug\,(i)}$ — к. п. д. умформерного двигателя, работающего генератором, отнесенный к его нагрузке в соответственные периоды $t_{ug(i)}$; $\Theta$ — пауза; $\mu = 1{,}05$—$1{,}10$— коэфициент, ориентировочно учитывающий влияние уменьшения $\cos\varphi$ в периоды недогрузки умформерного двигателя.

Полученная согласно выражения (313) мощность умформерного двигателя должна быть проверена на его максимальную нагрузку.

Здесь следует отметить, что отношение $\rho$ эффективной мощности умформерного двигателя $P_u$ на его валу к эффективной мощности пусковой динамо $P_d$ на ее зажимах, согласно данным практики, может колебаться в пределах:

$$\rho = \frac{P_u}{P_d} = 0{,}75 - 1{,}1.$$

Последнее выражение показывает, что эффективная мощность умформерного двигателя, несмотря на потери в пусковой динамо, вращаемой этим двигателем, может быть не только равной, но даже меньше эффективной мощности указанной динамо на ее зажимах.

Означенное явление объясняется тем обстоятельством, что ток, нагревающий как подъемный двигатель, так и пусковую динамо, получает максимальное значение в самом начале пускового периода;* между тем на основании высказанного выше соображения относительно идентичности закона изменения мощности умформерного двигателя и нагревающего его тока, нагрев последнего двигателя производится током, нарастание которого происходит в течение указанного периода *постепенно* от некоторого сравнительно небольшого значения в начале до максимума в конце пускового периода. Благодаря указанной разнице в характере нагрева в период пуска умформерного двигателя и пусковой динамо и может иметь место отношение $\rho = \frac{P_u}{P_d} < 1$.

Необходимо при этом иметь в виду, что величина отношения $\rho$ зависит, между прочим, от следующих факторов: 1) от величины периода пуска $t_1$, по сравнению с периодом полного хода $t_2$, а именно, меньшие значения $\rho$

* Исключение составляет система с тяжелым хвостовым канатом, при котором максимальное значение нагревающего подъемный двигатель тока хотя и получается не в начале, а в конце периода пуска, тем не менее и в начале означенного периода указанный ток достигает большой величины, практически незначительно отличающейся от упомянутого значения его в конце пускового периода.

имеют место при бо́льших величинах $t_1$, и наоборот: 2) от характера тахограммы; так, например, при параболическом законе изменения скорости в период пуска $t_1$ значение $\rho$ оказывается меньше, чем при трапецоидальной тахограмме с прямолинейным боком в указанный период; последнее явление нетрудно объяснить, если принять во внимание, что при параболической тахограмме период $t_1$ вообще больше, чем в случае трапецоидальной тахограммы, при равенстве в обоих случаях полного периода подъема $T$

В применении к диаграмме мощностей на фиг. 87 отдельные выражения, входящие в формулу (313), принимают вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{i=n} P^2_{u\,(i)}\, t_{u\,(i)} = \frac{P_{u0}^2 + P'^2_{u1} + P_{u0}\cdot P_{u1}'}{3}\cdot t_1' + \frac{P'^2_{u1} + P''^2_{u1} + P_{u1}'\cdot P_{u1}''}{3}\cdot t_1'' + \\
&+ \frac{P''^2_{u1} + P'''^2_{u1} + P_{u1}''\cdot P_{u1}'''}{3}\cdot t_1''' + \frac{P_{u1}'''^2 + P_{u2}^2 + P_{u1}'''\cdot P_{u2}}{3}\, t_1^{IV} + \\
&+ P_{u2}^2\, t_2 + P_{u\Theta}^2\,\Theta; \qquad\qquad (314)\\
&\sum_{i=1}^{i=k} P^2_{ug(i)}\ \eta^4_{ug(i)}\ t_{ug(i)} \cong \frac{1}{3} P_{ug}^2 \eta_{u3}^4 t_3;^{*} \qquad \sum_{i=1}^{i=n+k} t_i = t_1 + t_2 + t_3.
\end{aligned}\right\}$$

Что касается мощностей $P_{u(i)}$ и $P_{ug(i)}$, входящих в выражения (313) и (314), то определение их может быть произведено на основании ниже следующих соображений.

Чтобы перейти от отдельных мощностей на валу барабана к соответственным мощностям на валу умформерного двигателя, необходимо учесть потери: 1) в зубчатой передаче, в случае наличия таковой, 2) в якорях подъемного двигателя и пусковой динамо и 3) на возбуждение указанных машин, в предположении расположения возбудителя на умформерном валу.

1) Потери в зубчатой передаче учитываются ее к. п. д. $\eta_z$, причем, если $P_{(i)}$ — положительная мощность на валу барабана, то соответственная мощность на валу подъемного двигателя получается из выражения:

$$P_{m(i)} = P_i \cdot \frac{1}{\eta_z}. \qquad (315)$$

Если имеет место отрицательная мощность, т. е. мощность возвращаемая системе при наличии электрического торможения, то для указанного режима получается:

$$P_{g\,(i)} = P_i \cdot \eta_z. \qquad (316)$$

На диаграмме мощностей фиг. 87 кривая $OABCDEE_0FG$ представляет закон изменения мощности на валу подъемного двигателя.

2) Если к ординатам кривой мощности на валу подъемного двигателя прибавить потери в якорях указанного двигателя и пусковой динамо, то получим кривую мощности, потребляемой пусковою динамо, без учета потерь на возбуждение.

---

* Для простоты предположено, что умформерный двигатель работает на генераторном режиме в течение всего периода $t_3$.

В *начале* периода пуска $t_1$ указанные потери в подъемном двигателе и пусковой динамо могут быть определены из выражения:*

$$P_{do} = 0{,}9\, P_{m(\max)}\left(\frac{1}{\eta_m}\cdot\frac{1}{\eta_d} - 1\right), \tag{317}$$

где $P_{m(\max)}$ — наибольшая мощность на валу подъемного двигателя, $\eta_m$ и $\eta_d$ — соответственно значения к. п. д. подъемного двигателя и пусковой динамо.

В случае положительной мощности на валу подъемного двигателя для всех трех периодов $t_1$, $t_2$ и $t_3$, мощность, потребляемая пусковою динамо в продолжение указанных периодов, за исключением потерь на возбуждение, определяется из выражения:

$$P_{di} = P_{m(i)} \cdot \frac{1}{\eta_m'} \cdot \frac{1}{\eta_d'}, \tag{318}$$

где $P_{m(i)}$ — значение мощности на валу подъемного двигателя, соответствующее определенному моменту движения $t_i$; $\eta_m'$ и $\eta_d'$ — значения к. п. д. якорей подъемного двигателя и пусковой динамо, имеющие место в соответственные периоды $t_i$.

В случае наличия в период $t_3$ электрического торможения (фиг. 87), выражение (318) имеет место лишь для периодов $t_1$ и $t_2$, для периода же $t_3$ мощность, возвращаемая пусковою динамо системе, определяется из выражения:

$$P_{d3} = P_g \cdot \eta_m' \cdot \eta_d'. \tag{319}$$

Что касается механических потерь, имеющих место в пусковой динамо в период холостого хода умформерного агрегата (пауза $\Theta$), то эти потери составляют $\sim 1^1/_2{}^0/_0$ от средней мощности $P_{da}$, потребляемой пусковою динамо* в продолжение периодов $t_1+t_2$, т. е.

$$P_{d\Theta} = 0{,}015\, P_{da}, \tag{320}$$

где

$$P_{da} = \frac{\Sigma P_{d(i)}\, t_i}{\Sigma t_i} \tag{321}$$

В последнем выражении $P_{d(i)}$ — значения, определяемые кривыми мощностей, потребляемых пусковою динамо в периоды $t_1+t_2$, без учета потерь на возбуждение; $t_i$ — соответственные периоды подъема.

В применении к диаграмме мощностей на фиг. 87 выражение (321) принимает вид:

$$P_{da} = \frac{{}^1/_2[(P_{d0}+P'_{d1})t_1 + (P_{d1}'+P_{d1}'')t_1 + (P_{d1}''+P_{d1}''')t_1 + (P_{d1}'''+P_{d2})t_1^{IV}] + P_{d3}\, t_2}{t_1+t_2} \tag{322}$$

где значения $P_{d0}$, $P_{d1}'$, $P_{d1}''$, $P_{d1}'''$, $P_{d2}$ определяются на фиг. 87 соответственно точками $O_1$, $A'$, $B'$, $C'$, $D'$.

Пользуясь выражениями (318), (319), (320) и (321), можно построить кривые мощности, потребляемой пусковою динамо, без учета потерь на возбуждение ее и подъемного двигателя.

---

* Согласно данным, приведенным в труде W. Philippi. Elektr ische Fördermaschinen 1927, S. 151 и 152.

На фиг. 87 кривая $O_1A'B'C'D'E'E_0F'G'\varphi$ представляет изменение мощности, потребляемой пусковою динамо в течение одного подъема, за исключением потерь на возбуждение

3) Для получения мощности на валу умформерного двигателя в предположении расположения динамо-возбудителя на указанном валу, необходимо к мощности, характеризуемой последней кривой, прибавить потери на возбуждение подъемного двигателя и пусковой динамо.

Мощность $p_{mt}$, затрачиваемая на возбуждение подъемного двигателя в периоды его работы, составляет $\sim 2-3\%$ от мощности указанного двигателя, т. е.

$$p_{mt} = (0{,}02 - 0{,}03)\, P_{mt}^{**}. \tag{323}$$

Мощность $p_{m\Theta}$, идущая на возбуждение подъемного двигателя в период паузы, составляет примерно половину величины $p_{mt}$, т. е.

$$p_{m\Theta} \cong 0{,}5\ p_{mt},$$

или

$$p_{m\Theta} \simeq (0{,}01 - 0{,}015)\ P_m. \tag{324}$$

Мощность $p_d$, затрачиваемая в период работы подъема на возбуждение пусковой динамо, изменяется по закону, принятому для скорости подъема, причем в период полного хода $t_2$ указанная мощность, достигая своего максимального значения, составляет $\frac{1}{2{,}5} - \frac{1}{2}$ мощности $p_{mt}$, т. е.

$$p_{d2} = (0{,}4 - 0{,}5)\ p_{mt},$$

или

$$p_{d2} = (0{,}008 - 0{,}015)\ P_m. \tag{325}$$

Таким образом мощность на валу умформерного двигателя получается из нижеследующих выражений:

а) в период работы подъемного двигателя:

$$P_{ut} = P_{dt} + p_{mt} + p_{dt}; \tag{326}$$

b) в период паузы:

$$P_{u\Theta} = P_{d\Theta} + p_{m\Theta}. \tag{327}$$

Если к ординатам кривой мощности $O_1A'B'C'D'E'E_0F'G'\varphi$ (фиг. 87) прибавить величины мощностей, затрачиваемых на возбуждение подъемного двигателя и пусковой динамо, согласно выражениям (323), (324) и (325), то получим кривую $O_2\alpha\beta\gamma\delta\eta\lambda\mu\rho$, представляющую изменение мощности на валу умформерного мотора.

Мощность $p_e$ возбудителя (на его зажимах), обслуживающего возбуждение подъемного двигателя и пусковой динамо, а также вспомогательные приспособления, как-то: тормозной электромагнит, различные реле и т. п., ориентировочно может быть определена из выражения:

$$p_e \cong (0{,}03 - 0{,}04)\ P_m, \tag{328}$$

где $P_m$ — мощность подъемного двигателя.

В случае применения в качестве умформерного двигателя синхронного мотора, возбуждение последнего целесообразно питать от особой динамо,

---

Если бы для питания возбуждения подъемного двигателя и пусковой динамо применен был особый мотор-генератор, то последняя кривая представляла бы также изменение мощности на валу умформерного двигателя.

** Меньшие значения $p_{mt}$ имеют место при бо́льших мощностях подъемного двигателя, и наоборот.

независимо от наличия возбудителя, обслуживающего возбуждение подъемного двигателя и пусковой динамо. Рациональность применения отдельного возбудителя для синхронного умформерного двигателя обусловлена теми соображениями, что регулирование возбуждения указанного двигателя может осуществляться при этом посредством шунтового реостата динамо-возбудителя, тогда как при общих шинах постоянного тока для регулирования возбуждения синхронного двигателя пришлось бы применять реостат, включенный в цепь указанного возбуждения, что является менее экономичным по сравнению с регулированием при наличии особого возбудителя.

Мощность возбудителя для синхронного умформерного двигателя

$$p_s = (0{,}01 - 0{,}015)\ P_u, \tag{329}$$

где $P_u$ — мощность умформерного двигателя.

Пример 32.

Применительно к подъему, характеризуемому диаграммами на фиг. 87, определить мощности подъемного двигателя и отдельных машин, составляющих преобразовательный агрегат, для нижеследующих данных.

Усилия на окружности барабана:

$F_1' = 9700$ *кг*; $F_1'' = F_2 = 4370$ *кг*; $F_g = -1660$ *кг*.

Периоды: $t_1' = t_1'' = t_1''' = t_1^{IV} = 10$ *сек*; $t_1 = 40$ *сек*, $t_2 = 3{,}22$ *сек*,

$$t_3 = 18 \text{ сек}, \quad \Theta = 28{,}78 \text{ сек}.$$

Скорость $V = 18$ *м/сек*, $V_g = 1{,}04 \cdot 18 = 18{,}7$ *м/сек*.

Мощности на валу подъемного двигателя: $P_1' = 676$ *kW*, $P_1'' = 974$ *kW*, $P_1''' = 989$ *kW*, $P_2 = 812$ *kW*; максимальная мощность $P_{m\,(max)} = 1007$ *kW*,

$$P_g = -281 \text{ kW}.$$

$$\eta_z = 0{,}95; \quad \eta_g = 0{,}88.$$

Эффективную мощность подъемного двигателя получаем согласно выражению (304).

$$P_m = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{\left(\frac{9700^2 + 4370^2 + 9700 \cdot 4370}{3} \cdot 40 + 4370^2 \cdot 3{,}22\right) \cdot \frac{18}{(0{,}95)^2} + 1660^2 \cdot (0{,}95)^2 \cdot (0{,}88)^4 \cdot (18{,}7)^2 \cdot 18}{40 + 3{,}22 + 18 + \frac{1}{3} \cdot 28{,}78}}$$

$$P_m = \frac{1}{102} \cdot 104586 = 1025 \text{ kW}.^*$$

Перегрузку $\gamma$ подъемного двигателя определим на основании выражения (305),** в котором: $F_{max} = F_1' = 9700$ *кг*; эффективное усилие на окружности барабана, согласно выражению (296), получает значение:

$F_m = \frac{102 \cdot P_m \cdot \eta_z}{V} = \frac{102 \cdot 1025 \cdot 0{,}95}{18} = 5520$ *кг*. Таким образом, получаем:

$$\gamma = \frac{F_{max}}{F_m} = \frac{9700}{5520} \cong 1{,}76 < 2.$$

---

* В случае применения для знаменателя подкоренной величины в формуле для эффективной мощности подъемного двигателя выражения (C), предлагаемого фирмой *GEC*, мощность указанного двигателя получается $P_m \cong 1100$ *kW*, т. е. на $\sim 7\%$ больше, против полученной по формуле (304).

** Пренебрегая наличием генераторного режима в период

Мощность пусковой динамо, согласно выражению (312):

$$P_d = \frac{1}{102}\sqrt{\frac{\left[\frac{\left(9700\cdot\frac{1}{0{,}9}\right)^2+\left(4370\cdot\frac{1}{0{,}92}\right)^2+9700\cdot4370\cdot\frac{1}{0{,}9}\cdot\frac{1}{0{,}92}}{3}\cdot 40+\left(4370\cdot\frac{1}{0{,}92}\right)^2\cdot 3{,}22\right]\frac{18^2}{(0{,}95)^2}+1660^2\cdot(0{,}95)^2\cdot(0{,}88)^2\cdot(18{,}7)^2\cdot 18}{40+3{,}22+18+28{,}78}};$$

$$P_d = \frac{1}{102}\cdot 102667 = 1006\ kW$$

Принимая ориентировочно $P_d = P_m = 1025\ kW$, мы совершили бы неточность порядка: $\frac{1025-1006}{1006}\cdot 100\% = 1{,}89\% < 2\%$.

Прежде, чем перейти к определению эффективной мощности на валу умформерного двигателя, необходимо предварительно получить значения его мощностей, имеющих место в отдельные периоды подъема, каковые операции ниже и произведены.

Мощности, потребляемые пусковою динамо, без потерь на возбуждение, представляются в следующем виде.

Мощность в начальный момент подъема, согласно выражению (317):

$$P_{d0} = 0{,}9\cdot 1007\left(\frac{1}{0{,}9}\cdot\frac{1}{0{,}92}-1\right) = 180\ kW.$$

Мощности, имеющие место в отдельные моменты периода $t_1$, получаются согласно выражению (318):

$$P_{d_1}' = 676\cdot\frac{1}{0{,}92}\cdot\frac{1}{0{,}94} = 782\ kW$$

$$P_{d_1}'' = 974\cdot\frac{1}{0{,}92}\cdot\frac{1}{0{,}94} = 1126\ kW$$

$$P_{d_1}''' = 989\cdot\frac{1}{0{,}92}\cdot\frac{1}{0{,}94} = 1143\ kW$$

$$P_{d(max)} = 1007\cdot\frac{1}{0{,}92}\cdot\frac{1}{0{,}94} = 1164\ kW$$

Мощность в период $t_2$ согласно выражению (318):

$$P_{d2} = 812\cdot\frac{1}{0{,}92}\cdot\frac{1}{0{,}94} = 940\ kW.$$

Максимальная мощность, возвращаемая пусковою динамо системе в период $t_3$, согласно выражению (319):

$$P_{db} = (-281)\cdot 0{,}9\cdot 0{,}92 = -233\ kW$$

Средняя мощность, потребляемая пусковою динамо в продолжение периода $t_1+t_2$, согласно выражению (322):

$$P_{da} = \frac{\frac{1}{2}\cdot 10(180+2\cdot 782+2\cdot 1126+2\cdot 1143+939)+939\cdot 3{,}22}{4\cdot 10+3{,}22}$$

$$P_{da} = 905\ kW$$

Потери холостого хода умформерного агрегата в течение паузы $\Theta$, согласно выражению (320):

$$P_{d\Theta} = 0{,}015 \cdot 905 = 14 \ kW$$

Мощность, идущая на возбуждение подъемного двигателя в период его работы, согласно выражению (323):

$$p_{mt} = 0{,}03 \cdot 1025 \cong 30 \ kW.$$

Указанная мощность в период паузы, согласно выражеиню (324):

$$p_{m\Theta} = 0{,}015 \cdot 1025 \cong 15 \ kW$$

Мощность, затрачиваемая на возбуждение пусковой динамо в период $t_2$, согласно выражению (325):

$$p_{d2} = 0{,}015 \cdot 1025 \cong 15 \ kW.$$

Мощности, идущие на возбуждение пусковой динамо в отдельные моменты периода $t_1$, получаются применительно к кривой скорости для этого периода на основании приведенного выше соображения,* состоящего в том, что мощность, затрачиваемая на возбуждение пусковой динамо в период работы подъема, изменяется по закону, принятому для скорости подъема. В связи с этим, в применении к тахограмме на фиг. 87, получаем соответственные значения указанных мощностей:

$$p_{d1}' = 8 \ kW; \ p_{d1}'' = 13 \ kW; \ p_{d1}''' = 15 \ kW.$$

Принимая во внимание полученные выше значения мощностей, идущих на возбуждение подъемного двигателя и пусковой динамо, получаем мощности на валу умформерного двигателя в отдельные периоды подъема, согласно выражению (326):

$$\begin{gathered}
P_{u0} = 180 + 30 = 210 \ kW \\
P_{u1}' = 782 + 30 + 8 = 820 \ kW \\
P_{u1}'' = 1126 + 30 + 13 = 1169 \ kW \\
P_{u1}''' = 1143 + 30 + 15 = 1188 \ kW \\
P_{u\,(max)} = 1164 + 30 + 15 = 1209 \ kW \\
P_{u2} = 939 + 30 + 15 = 984 \ kW \\
P_{ug} = -233 + 30 + 15 = -188 \ kW
\end{gathered}$$

Указанная мощность в период паузы, согласно выражению (327):

$$P_{u\Theta} = 14 + 15 = 29 \cong 30 \ kW.$$

Подставляя полученные выше значения в выражения (314) получаем:

$$\sum_{i=1}^{i=n} P^2_{u(i)} t_{u(i)} = \frac{210^2 + 820^2 + 210 \cdot 820}{3} 10 + \frac{820^2 + 1169^2 + 820 \cdot 1169}{3} 10 +$$

$$+ \frac{1169^2 + 1188^2 + 1169 \ 1188}{3} 10 + \frac{1188^2 + 984^2 + 1188 \cdot 984}{3} 10 +$$

$$+ 984^2 \cdot 3{,}22 + 30^2 \cdot 28{,}78 = 41832248 \ kW^2. \ сек.$$

$$\sum_{i=1}^{i=k} P^2_{ug(i)} \eta^4_{ug(i)} t_{ug(i)} = \frac{1}{3} \cdot 187^2 \cdot (0{,}8)^4 \cdot 18 = 86\,022 \ kW^2. \ сек.$$

* См. стр. 256.

Подставляя последние значения в выражение (313), получаем эффективную мощность умформерного двигателя:

$$P_a = 1{,}1\sqrt{\frac{41832248 + 86022}{40 + 3{,}22 + 18 + 28{,}78}}$$

$$P_u = 1{,}1 \cdot 682 = 750\,kW$$

Перегрузка умформерного двигателя

$$\gamma_u = \frac{P_{u(max)}}{P_u} = \frac{1209}{750} = 1{,}61,$$

что вполне допустимо.

Отношение эффективной мощности умформерного двигателя к эффективной мощности пусковой динамо:

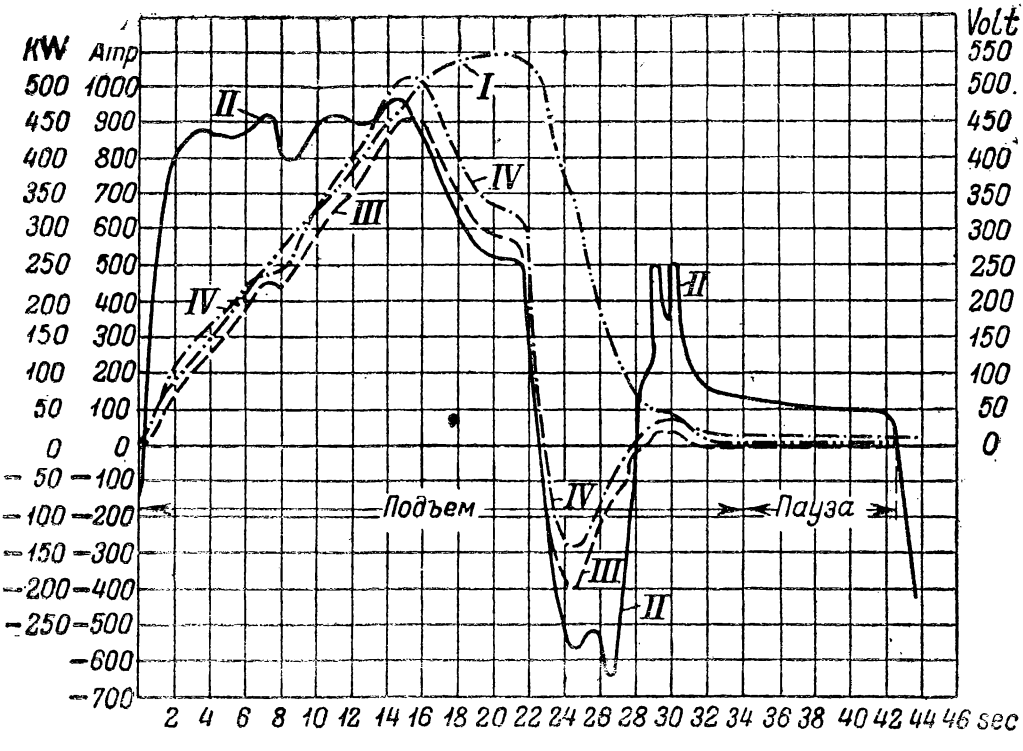
$$\rho = \frac{P_u}{P_d} = \frac{750}{1006} \cong 0{,}75.$$

Мощность возбудителя, обслуживающего подъемный двигатель и пусковую динамо, согласно выражению (328) составляет:

$$p_e = 0{,}03 \cdot 1025 \cong 30\,kW$$

Мощность возбудителя для умформерного синхронного двигателя согласно выражению (329):

$$p_s = 0{,}015 \cdot 750 \cong 12\,kW$$




Фиг. 88. Кривые напряжения, тока и мощности, зарегистрированные самопишущими приборами для одной подъемной установки с приводом системы Леонарда.

Не лишенными интереса являются изображенные на фиг. 88 кривые, зарегистрированные для одной подъемной установки, оборудованной по системе Леонарда. Кривая *I* представляет изменение напряжения пусковой динамо; с известным приближением в определенном масштабе эта кривая характеризует также изменение скорости подъемного двигателя. Кривая *II* характеризует изменение силы тока, генерируемого пусковой динамо, или в определенном масштабе, момент вращения, развиваемый подъемным двигателем. Кривая *III* выражает изменение мощности, развиваемой пусковой динамо. Кривая *IV* представляет изменение мощности в *kW*, потребляемой умформерным мотором, или в соответственном масштабе, примерное изменение силы тока, потребляемой последним мотором, в амперах.

Главнейшие данные указанной установки следующие: полезный за раз поднимаемый груз — 2000 *кг*, высота подъема—190 *м*, наибольшая скорость подъема—11 *м/сек*, часовая производительность —160 *т*. Продолжительная мощность подъемного двигателя, соединенного непосредственно с валом шкива Кёпе, составляет 360 л. с.= 265 *kW*

## III. РАСХОД ЭНЕРГИИ

На фиг. 87, как указывалось, кривая $O_2\alpha\beta\gamma\delta\eta\lambda\mu\rho$ представляет закон изменения мощности $P_{u(i)}$ на валу умформерного двигателя *. Для получения мощности $P_{n(i)}$, потребляемой умформерным двигателем из сети, необходимо принять во внимание потери в указанном двигателе, учитываемые его к.п.д. $\eta_u$. Таким образом имеем:

$$P_{n(i)} = P_{u(i)} \cdot \frac{1}{\eta_u}. \tag{330}$$

На фиг. 87 кривая $O_3\alpha'\beta'\gamma'\delta'\eta'\lambda'\mu'\rho'$ представляет закон изменения мощности, потребляемой умформерным двигателем из сети.

Сумма площадей

$$(O_3\alpha'\beta'\gamma'\delta'\eta'E_oOO_3 - E_o\lambda'eE_o + e\mu'\rho'O'Ge)$$

представляет соответственно энергию, потребляемую умформерным двигателем из сети в продолжение одного подъема. Указанная энергия в применении к фиг. 87 может быть определена на основании нижеследующего выражения:

$$L_{umf} = \frac{1}{2}[(P_{n0} + P'_{n1})t'_1 + (P'_{n1} + P''_{n1})t''_1 + (P''_{n1} + P_{n1}''')t_1''' +$$

$$+ (P_{n}''' + P_{n2})t_1^{IV} - P_{ng}(t_3 - \tau)] + P_{n2}t_2 + P_{no}\left(\Theta + \frac{1}{2}\tau\right) \tag{331}$$

Для получения полного расхода энергии необходимо еще учесть энергию $L_k$, затрачиваемую на работу тормозного компрессора. Средняя мощность $p_k$, потребляемая компрессорным мотором, составляет:**

$$p_k = 4 - 6\,kW$$

Энергия

$$L_k = p_k(T + \Theta). \tag{332}$$

Таким образом полный расход энергии, приходящийся на один подъем, составляет:

$$L_n = L_{umf} + L_k. \tag{333}$$

---

* В определенном масштабе кривая $O_2\alpha\beta\gamma\delta\eta\lambda\mu\rho$ представляет также примерное изменение силы тока, потребляемой умформерным двигателем.

** Применительно к данным, приведенным в труде *W Philippi. Elektrische Fördermaschinen.*, S. 153 и 165. 1927.

Пример 33

Определить расход энергии применительно к фиг. 87 и к результатам, полученным в примере 32. Кроме того дано: полезный за раз поднимаемый груз $Q = 3900\,кг$; высота подъема $H = 700\,м$; $\tau \cong \frac{1}{2} t_з$.

Мощности, потребляемые умформерным двигателем из сети, согласно выражению (330) получают нижеследующие значения:

$$P_{n0} = 210 \quad \frac{1}{0{,}85} = 247\,kW$$

$$P_{n1}' = 820 \quad \frac{1}{0{,}93} = 882\,kW.$$

$$P_{n1}'' = 1169 \quad \frac{1}{0{,}94} = 1244\ kW$$

$$P_{n1}''' = 1188 \quad \frac{1}{0{,}94} = 1264\ kW$$

$$P_{n2} = 984 \quad \frac{1}{0{,}94} = 1048\ kW$$

$$P_{ng} = (-188) \cdot 0{,}8 = -150\,kW$$

$$P_{n\theta} = 30 \quad \frac{1}{0{,}5} = 60\ kW.$$

Энергия, потребляемая умформерным двигателем из сети за один подъем, согласно выражению (331):

$$L_{umf} = \frac{1}{2}\left\{ 10 \left[ 247 + 2\,(882 + 1244 + 1264) + 1048 \right] - 150\,(18-9) \right\} +$$

$$+ 1048 \quad 3{,}22 + 60\left( 28{,}78 + \frac{1}{2} \quad 9 \right);$$

$$L_{umf} = 44\,286\,kW\text{-}сек.$$

Расход энергии на тормозной компрессор, согласно выражению (332):

$$L_k = 5 \quad 90 = 450\,kW\text{-}сек.$$

Полный расход энергии, приходящийся на один подъем, согласно выражению (333) составляет:

$$L_n = 44\,286 + 450 = 44\,736\,kW\text{-}сек = 12{,}43\ kWh.$$

Полезная работа, производимая за один подъем, согласно выражениям (241) и (243) составляют:

$$L_u = 3900 \cdot 700 = 2\,730\,000\,кг.м. = 7{,}43\ kWh.$$

Коэфициент полезного действия подъемной установки:

$$\eta_{ih} = \frac{7{,}43}{12{,}43} \cong 0{,}6.$$

Полученное значение к. н. д. подъемной установки является несколько преувеличенным.

# ОБЛАСТЬ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИВОДОВ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ

## А. АСИНХРОННЫЙ ПОДЪЕМНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

При наличии на рудниках переменного тока как низкого, так и высокого напряжения порядка 3000—6000 V, асинхронные двигатели нашли применение в качестве привода для подъемных машин не только малых и средних мощностей, где они получили преимущественное распространение, но также при оборудовании и более крупных установок. Одним из факторов, лимитирующих применение асинхронного двигателя, является мощность статорных переключателей (реверсеров); в последнее время ХЭМЗ, например, стал изготовлять указанные приборы для мощностей, доходящих до 1200 *kW* Конечно, применяя два подъемных двигателя, можно достигнуть соответственного увеличения предельной мощности обслуживаемой ими подъемной установки, при условии, что каждый двигатель будет снабжен отдельным статорным переключателем.

Рассмотрим условия при которых применение асинхронного двигателя в качестве подъемного может представиться наиболее целесообразным в отношении: 1) экономичности, 2) удобства управления и 3) влияния на силовую установку, питающую подъем; при этом здесь ограничимся лишь соображениями общего характера.

1) Известно, что в период пуска, а иногда и в период замедления, подъемный двигатель бесполезно расходует энергию в реостате, тем бо́льшую, чем продолжительнее указанные периоды по сравнению с полным периодом подъема, а также, чем больше максимальная скорость подъема. Имея это в виду, можно заключить, что с точки зрения расхода энергии более экономичной является работа двигателя при трапецоидальной тахограмме, чем при треугольной, требующей, при прочих одинаковых условиях подъема, более продолжительного периода пуска и большей максимальной скорости по сравнению с первой диаграммой. Очевидно также, что потери в реостате, имеющие место в течение каждого подъема, окажутся за определенный период работы тем меньше, чем меньше будет произведено за это время самих подъемов, и наоборот. Отсюда вытекает целесообразность производства подъема при большом за раз поднимаемом грузе, влияющем на уменьшение числа подъемов, что может иметь место, например, при скиповом подъеме. Вместе с тем увеличение за раз поднимаемого груза позволяет уменьшить скорость подъема вообще, а следовательно и максимальную, что также содействует уменьшению потерь в реостате. В отношении уменьшения указанных потерь благоприятное влияние оказывает увеличение глубины шахты, обусловливающее относительное уменьшение периода пуска.

Что касается случаев работы двигателя с уменьшенной скоростью, могущих иметь место, например, при подъеме и спуске людей, то эти случаи, как требующие применения реостата, а иногда и тормоза, не только в период пуска, но и в период полного хода, являются неэкономичными с точки зрения использования потребляемой двигателем энергии. Ввиду этого, в тех случаях, когда двигатель, работая с нормальной скоростью, не превосходящей предельную скорость принятую для подъема и спуска людей успеет произвести необходимую выдачу груза (уголь, руда), рационально и выдачу указанного груза и подъем людей производить с одинаковой скоростью, что послужит к устранению потерь в реостате или тормозе в период полного хода при подъеме людей, а следовательно, к более экономичной работе двигателя.

Необходимо еще указать на то обстоятельство, что при выборе системы привода, кроме вышеуказанных соображений относительно расхода энергии на производство подъема, не меньшую, если не бо́льшую роль играют также соображения относительно первоначальных затрат на оборудование; в этом отношении асинхронный двигатель, являясь наиболее простым, а вместе с тем наиболее дешевым видом электрического привода в применении к рудничному подъему, представляет бесспорные преимущества по сравнению с другими системами электрификации упомянутого подъема. Положительной стороной применения асинхронного двигателя являются также сравнительно небольшие размеры получаемого при этом машинного здания.

2) Выше нами указывалось *, что в отношении ручного управления асинхронным подъемным двигателем при работе его под реостатом в периоды пуска и замедления, независимо от системы подъема, наиболее удобным является случай постоянного момента вращения, развиваемого двигателем. Что касается случаев пуска, когда момент вращения, развиваемый двигателем, должен изменяться в период его работы под реостатом, то подобный режим наиболее удобно осуществляется при автоматическом управлении с применением контакторов и соответственно настроенных реле времени.

Относительно применения той или иной системы роторных реостатов необходимо указать, что жидкостные реостаты являются наиболее удобными в отношении гибкости управления и получаемой при этом плавности изменения скорости подъема. Следует при этом отметить, что контакторное управление обусловливает необходимость применения металлических реостатов.

3) Все периодические колебания нагрузки подъемного двигателя, обусловленные характером изменения потребляемой им мощности, полностью передаются питающей двигатель силовой станции или подстанции, причем потребляемая из сети в период пуска мощность сразу получает свое максимальное значение (см. фиг. 44, 47, 48, 49, 50). Ввиду этого, если мощность силовой установки незначительна по сравнению с мощностью подъема, то указанные колебания нагрузки, особенно ее пусковые пики, окажут вредное влияние на работу станции, значительно понижая в соответственные периоды напряжение на ее шинах и тем самым расстраивая работу как самого подъема, так и других приемников энергии. На основании изложенного можно заключить, что асинхронные двигатели в качестве подъемных рационально применять лишь при достаточно мощных силовых станциях, питающих эти двигатели. Обыкновенно принимают, что если мощность станции, примерно, в 10—15 раз больше мощности подъемной установки, то с колебаниями нагрузки, обусловленными применением асинхронного двигателя в качестве подъемного, можно мириться.

---

* Стр 198.

При этом имеет также значение и величина отношения максимальной нагрузки (пика) к мощности двигателя: чем это отношение больше, тем больше должна быть мощность станции, и наоборот. Некоторое уменьшение пусковых пиков может быть иногда достигнуто удачным подбором соответственных элементов кинематики и динамики подъема. Благоприятное влияние в отношении смягчения пусковых пиков оказывает применение уравновешенных систем подъема.

Наиболее благоприятным решением вопроса в отношении ослабления влияния асинхронных подъемных двигателей на работу станции является кольцевание сети в связи с развитием крупных районных станций, обслуживающих не отдельные рудники, а целые рудничные районы; при этом мощность станции по отношению к мощности каждой подъемной установки получается настолько большой, что влияние последней на работу станции оказывается незначительным, ввиду чего с указанным фактором можно не считаться.

Необходимо еще указать на неблагоприятное влияние которое оказывает на силовую станцию и сеть сравнительно невысокой $\cos\varphi$, обусловленный характером работы подъемных асинхронных двигателей. Эти влияние сказывается в увеличении потерь в генераторах станции от нагревания их безваттными токами, равно как в уменьшении активной мощности, вырабатываемой станцией. Низкий $\cos\varphi$ служит также причиной увеличения падения напряжения в сети, а следовательно, уменьшения напряжения на зажимах двигателя, что соответственно уменьшает развиваемый им момент вращения **.

В заключение считаем необходимым высказать некоторые соображения, относящиеся к случаю обслуживания одной и той же подъемной установкой нескольких горизонтов, что на практике имеет место довольно часто.

Если организация подъема дает возможность при одной и той же концевой нагрузке принять для всех горизонтов одну и ту же полную скорость, равную максимальной скорости для наивысшего горизонта, то полный период одного подъема будет иметь различные значения для каждого из горизонтов, а именно, наибольшая продолжительность указанного периода получится для наинизшего горизонта и наименьшая для наивысшего. Так как при этом для наивысшего горизонта скорость подъема не должна превышать допустимой величины, то для наинизшего горизонта указанная скорость всегда получается меньше, а время подъема больше, чем это допускается для последнего горизонта. При наличии указанных условий один и тот же двигатель, при одной и той же зубчатой передаче, может обслужить все горизонты, без применения роторного реостата в период полного хода.

Эффективная мощность подъемного двигателя определяется условиями работы подъема на тот горизонт, для которого она получает наибольшее значение. В таком случае для указанного горизонта работа двигателя окажется наивыгоднейшей как в отношении его коэфициента полезного действия, так и $\cos\varphi$; для остальных горизонтов работа двигателя будет тем менее выгодна, чем с большей недогрузкой ему придется работать.

Здесь необходимо отметить, что наиболее благоприятные условия работы подъемного двигателя получаются для наинизшего горизонта лишь при сохранении без изменения одной и той же системы подъема для всех горизонтов; при различных же системах подъема указанное явление может и не иметь места. В самом деле, применяя для верхних горизонтов неурав-

---

Кажущаяся мощность, измеряемая в kVA, остается без изменения.

** Момент вращения двигателя, как известно, пропорционален квадрату приложенного к нему напряжения.

новешенную систему подъема, а для нижних горизонтов статически уравновешенную систему, можно получить величину эффективной мощности подъемного двигателя для нижних горизонтов не превышающей значение указанной мощности для верхних горизонтов. Если по эксплоатационным и организационным соображениям не представляется возможным сохранение одной и той же скорости подъема для всех горизонтов, то при переводе на нижние горизонты оставление одного и того же подъемного двигателя определенной мощности обусловливает необходимость соответственной замены зубчатой передачи таким образом, чтобы получилось требуемое увеличение скорости подъема.

В случае невозможности оставления одного и того же двигателя на весь срок службы подъема при работе его на несколько горизонтов, необходимо применить два двигателя, развивающих различные скорости, а следовательно обладающих при одной и той же концевой нагрузке различными мощностями. Указанные двигатели при этом желательно выбирать таким образом, чтобы они по возможности обладали одними и теми же габаритными размерами, что дало бы возможность при замене двигателей оставить прежние зубчатые передачи, фундаменты, плиты, подшипники и т. п.; последнее обстоятельство, в свою очередь, соответственно, сократило бы неизбежный при этом перерыв в работе подъема. С указанной целью для обслуживания верхних горизонтов при меньших скоростях подъема пришлось бы применить сравнительно тихоходный двигатель меньшей мощности, при переходе же на нижние горизонты следовало бы указанный двигатель заменить более быстроходным с соответственно большей мощностью.

Применение в продолжение всего срока службы подъема больше двух двигателей является нецелесообразным, и прибегать к подобной мере можно лишь в исключительных случаях.

## II. СИСТЕМА ЛЕОНАРДА

1) В отличие от системы с асинхронным подъемным двигателем, в системе Леонарда отсутствуют потери в пусковом реостате* Правда, вместо этого существуют постоянные потери в непрерывно вращающемся умформерном агрегате, ввиду чего система Леонарда в отношении использования потребляемой из сети энергии окажется тем выгоднее, чем меньше отношение продолжительности паузы к периоду рабочего цикла.

Что касается сравнительного расхода энергии на производство подъема при указанных двух системах, то следует отметить, что при соответственном подборе кинематики и динамики подъема привод с асинхронным двигателем в этом отношении может оказаться более или менее равноценным с системой Леонарда при одной и той же мощности установки; в некоторых случаях система Леонарда в отношении потребляемой энергии может оказаться даже менее выгодной по сравнению с приводом от асинхронного двигателя, если бы продолжительность паузы по отношению к периоду рабочего цикла оказалась более или менее значительной.

Стоимость подъемной установки, оборудованной по системе Леонарда, является значительной, превышая в два и более раза стоимость установки с асинхронным подъемным двигателем. Размеры, а следовательно, и стоимость машинного здания, ввиду наличия умформерного агрегата, получаются больше, чем при установках с асинхронным двигателем. Вообще можно отметить, что система Леонарда оказывается экономически при прочих одинаковых условиях тем выгоднее, чем больше мощность подъемной установки.

---

* Потери в реостате возбуждения пусковой динамо незначительны.

2) В отношении удобства управления подъемной машиной и осуществления автоматизации подъема система Леонарда занимает первое место среди существующих систем электрификации. Ввиду этого, в тех случаях, когда заданная тахограмма не может быть удобно осуществлена посредством применения асинхронного двигателя, вопрос же о строгом выполнении указанной тахограммы приобретает особо важное значение, может представиться рациональным применение системы Леонарда даже тогда, когда она окажется менее экономичной, чем система с асинхронным подъемным двигателем.

3) Колебания нагрузки, испытываемые подъемным двигателем, почти целиком передаются станции. Пояснением указанного обстоятельства может служить диаграмма мощностей на фиг. 87 Сравнивая получаемые при этом колебания нагрузки с имеющими место у асинхронного подъемного двигателя, можем заключить, что в системе Леонарда указанные колебания носят менее резкий характер, чем в случае асинхронного двигателя, у которого потребляемая из сети в период пуска мощность сразу получает свое максимальное значение.

В системе Леонарда колебания нагрузки несколько смягчаются также благодаря буферирующему действию умформерного агрегата.

Наконец, благодаря удобству управления в рассматриваемой системе, независимо от характера изменения скорости, последнюю можно в некоторых случаях так подобрать, чтобы пики мощности в начале пуска получались более или менее сглаженными. Пояснением этого могут служить диаграммы на фиг. 87, показывающие, что плавное и притом не особенно большое возрастание мощности, развиваемое подъемным двигателем при параболическом изменении скорости в период пуска, окажет на работу станции, питающей подъемную установку, менее вредное влияние, чем это имело бы место при трапецоидальной тахограмме.

Необходимо, однако, отметить, что несмотря на указанное сглаживание пиковой нагрузки,* колебания мощности, испытываемые при этом станцией, отнюдь не уничтожаются, а лишь несколько ослабляются, так как периоды полной нагрузки чередуются с периодами малого потребления энергии. Ввиду этого применение системы Леонарда, хотя и в несколько меньшей степени, чем это имеет место для установок с асинхронным подъемным двигателем, все же в значительной мере обусловлено величиной мощности, питающей подъемную установку станции.

Что касается влияния $\cos\varphi$ на станцию и сеть, то при асинхронном умформерном моторе в системе Леонарда это влияние будет менее значительно, чем при асинхронном подъемном двигателе. Объясняется это тем, что $\cos\varphi$ у первого, как более быстроходного, будет выше, чем у второго, более тихоходного.** Улучшение $\cos\varphi$ при асинхронном умформерном моторе может быть достигнуто путем применения фазных компенсаторов (трехфазных возбудителей). Вопрос о влиянии $\cos\varphi$ на работу станции получает наиболее благоприятное разрешение в случае применения в качестве умформерного мотора *синхронного* двигателя, который в последнее время в установках системы Леонарда получил преимущественное распространение.

Что касается возможности применения одного и того же подъемного двигателя при работе его на несколько горизонтов, то при системе Леонарда вопрос этот разрешается весьма благоприятно, так как получение

---

* Достигаемое в подъемных установках европейских систем применением в период пуска параболической тахограммы. В американских системах с контакторным управлением уменьшение пиков достигается применением (би)цилиндро-конических барабанов при трапецоидальном законе изменения угловой скорости.

** Часто даже при наличии зубчатой передачи. Что касается скорости умформерного мотора, то таковая составляет 500—900 *об/мин*

в случае надобности, различных скоростей подъема для различных горизонтов достигается путем соответственного изменения сопротивления включаемого в цепь возбуждения пусковой динамо реостата, потери в котором незначительны. Следует при этом иметь в виду, что при определении мощности как подъемного двигателя, так и машин, составляющих умформерный агрегат, должна быть принята во внимание максимальная скорость подъема, имеющая место при работе на наинизший горизонт.

## III. СИСТЕМА ИЛЬГНЕРА-ЛЕОНАРДА

Наличие в рассматриваемой системе маховика вполне разрешает вопрос об уничтожении колебаний нагрузки станции, обслуживающей подъемную установку. К достоинствам применения маховика можно отнести также то обстоятельство, что в случае внезапного повреждения в цепи тока, питающего умформерный мотор, благодаря запасу живой силы маховика подъем может быть закончен, и подъемный сосуд не останется в стволе; можно даже совершить еще один—два подъема, благодаря происходящему за счет живой силы маховика вращению расположенной на умформерном валу пусковой динамо, обусловливающей в данном случае работу подъемного двигателя.

Однако, наряду с указанными преимуществами имеются также и недостатки, связанные с применением маховика. Дело в том, что сам маховик представляет источник потерь; кроме того наличие маховика служит причиной некоторого усложнения подъемного устройства; ввиду этого установка с маховиком является как менее экономичной в эксплоатации, так и более дорогой по устройству, в сравнении с системой Леонарда без маховика. Равным образом в отношении способа улучшения $\cos\varphi$ подъемной установки система Ильгнера-Леонарда уступает место системе Леонарда, в которой применение синхронного умформерного мотора дает наиболее удачное решение этого вопроса.

В этом отношении исключение составляет лишь устройство фирмы Metropolitan-Vickers с синхронным умформерным мотором, соединение которого с маховиком осуществляется при помощи гидравлической муфты;* благодаря указанному устройству условия работы системы Ильгнера-Леонарда в отношении $\cos\varphi$ подъемной установки являются аналогичными условиям, имеющим место в системе Леонарда с синхронным двигателем без маховика.

Вообще же относительно системы Ильгнера-Леонарда можно заключить, что применение ее, обусловленное факторами, аналогичными для системы Леонарда, имеет место в случае наличия питающих подъемную установку станций, мощность которых является недостаточной для работы подъема без выравнивания нагрузки при помощи маховика.

В заключение следует отметить, что наличие мощных районных электрических станций, в связи с кольцеванием сети, делает применение системы Ильгнера-Леонарда излишним.

## IV ПРИВОД С УПРАВЛЯЕМЫМИ РТУТНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

Схема с одним выпрямителем может применяться при сравнительно небольших мощностях подъемных установок — порядка 500 — 700 $kW$
При более значительных мощностях необходимо применение схемы с двумя выпрямителями, так как создание мощного переключателя, являюще-

* См. Ф. Н. Шклярский. „О применении синхронного двигателя в качестве умформерного мотора в схеме электрификации рудничного подъема по сист. Ильгнера-Леонарда". (Записки Ленинградского Горного Института. Т. VIII. 1934).

гося неотъемлемой частью схемы с одним выпрямителем, сопряжено со значительными трудностями. Следует при этом иметь в виду, что система с двумя выпрямителями, наряду с более простой схемой управления, присущей этой системе, является более дорогой, чем система с одним выпрямителем.

В отношении преимуществ системы привода с управляемыми ртутными выпрямителями по сравнению с системой Леонарда можно указать на нижеследующие главнейшие моменты:

1) при ртутных выпрямителях получается значительная экономия меди и черных металлов;

2) система с ртутными выпрямителями стоит дешевле, чем умформерный агрегат Леонарда; получаемая при этом примерная экономия составляет: при мощностях порядка 300—500 $kW$ — около 25%, при мощностях порядка 1000 $kW$ — 35—40%, при бо́льших мощностях — даже выше;*

3) коэфициент полезного действия выпрямителя выше, чем агрегата Леонарда;

4) ртутные выпрямители не требуют фундамента и занимают меньшую площадь, каковое обстоятельство обусловливает сокращение строительных расходов.

К недостаткам привода с управляемыми ртутными выпрямителями следует отнести:

1) пониженный $\cos\varphi$ установки,

2) относительно небольшую перегрузочную способность при инвертерном режиме;

3) сложность защиты, предохраняющей от возможности обратного зажигания.

В заключение следует отметить, что хотя схемы с управляемыми ртутными выпрямителями и не получили еще окончательного технического оформления в применении к рудничному подъему, тем не менее имеются основания полагать, что в ближайшем будущем эти схемы будут настолько разработаны и испытаны, что область применения двигателей постоянного тока в качестве приводных при обслуживании рудничного подъема может быть значительно расширена. В связи с этим представилось бы возможным вместо асинхронных подъемных двигателей в установках средней мощности применять двигатели постоянного тока с независимым возбуждением, которые при питании их от управляемых ртутных выпрямителей позволяют производить регулирование скорости без изменения жесткости характеристик, что обусловливает возможность соблюдения одной и той же тахограммы при различных нагрузках.

Вместе с тем благоприятное разрешение получил бы также вопрос автоматического управления подъемной машиной, рациональное осуществление которого при асинхронном подъемном двигателе, как известно, представляет значительные трудности.

---

* По данным ВЭИ („Технический отчет", часть 1. „Применение ртутных выпрямителей в электроприводах с регулировкой скорости для замены схемы Леонарда").

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

*Часть первая*

**Динамика рудничного подъема с постоянным радиусом навивки**

*Раздел первый*

**Динамика подъема**

I. Общее уравнение динамического равновесия 5

II. Уравновешенная система с равновесными канатами 6
1. Трехпериодная тахограмма —
2. Четырехпериодная тахограмма 19
a. Случай скипа с донной разгрузкой 22
b. Случай опрокидного подъемного сосуда 26
3. Пятипериодная тахограмма с постоянным ускорением в период $t_0$ 30
a. Случай скипа с донной разгрузкой 33
b. Случай опрокидного подъемного сосуда 36
4. Пятипериодная тахограмма с возрастающим ускорением в период $t_0$ 44

III. Система с тяжелым хвостовым канатом 48

A. Тахограмма с прямолинейными боками 49
B. Тахограмма с выпуклыми боками 57
C. Тахограмма с одним прямолинейным и другим выпуклым боком 66

IV. Неуравновешенная система 72

A. Тахограммы с прямолинейными боками 72
1. Трехпериодная тахограмма 72
2. Четырехпериодная тахограмма 80
a. Случай скипа с донной разгрузкой 81
b. Случай опрокидного подъемного сосуда 85
3. Пятипериодная тахограмма с постоянным ускорением в период $t_0$ 88
a. Случай скипа с донной разгрузкой 88
b. Случай опрокидного подъемного сосуда 92

B. Тахограммы с вогнутыми боками 97
1. Трехпериодная тахограмма 97
2. Двухпериодная тахограмма 107
3. Пятипериодная тахограмма 112

C. Тахограммы с одним прямолинейным и другим вогнутым боком 120
1. Трехпериодная тахограмма 120
2. Четырехпериодная тахограмма 125
3. Пятипериодная тахограмма 133

*Раздел второй*

**Динамика спуска**

I. Уравновешенная система с равновесными канатами 137
II. Неуравновешенная система 141
A. Тахограмма с двумя вогнутыми боками 141
B. Тахограмма с одним прямолинейным и другим вогнутым боком 150

*Часть вторая*

# Электрический привод рудничного подъема

*Раздел первый*

## Асинхронный подъемный двигатель


Стр.

I. Физика привода . . . . . 155
A. Подъемные операции при моторном режиме двигателя. Расход энергии 155
B. Электрическое торможение . 177
1. Торможение противотоком 177
2. Генераторное торможение . . . . . 183
3. Область применения и способы осуществления электрического торможения 185
C. Более сложные случаи управления подъемным двигателем 189
II. Расчет пусковых сопротивлений и уставок реле ускорения 189
III. Определение мощности подъемного двигателя 213


*Раздел второй*

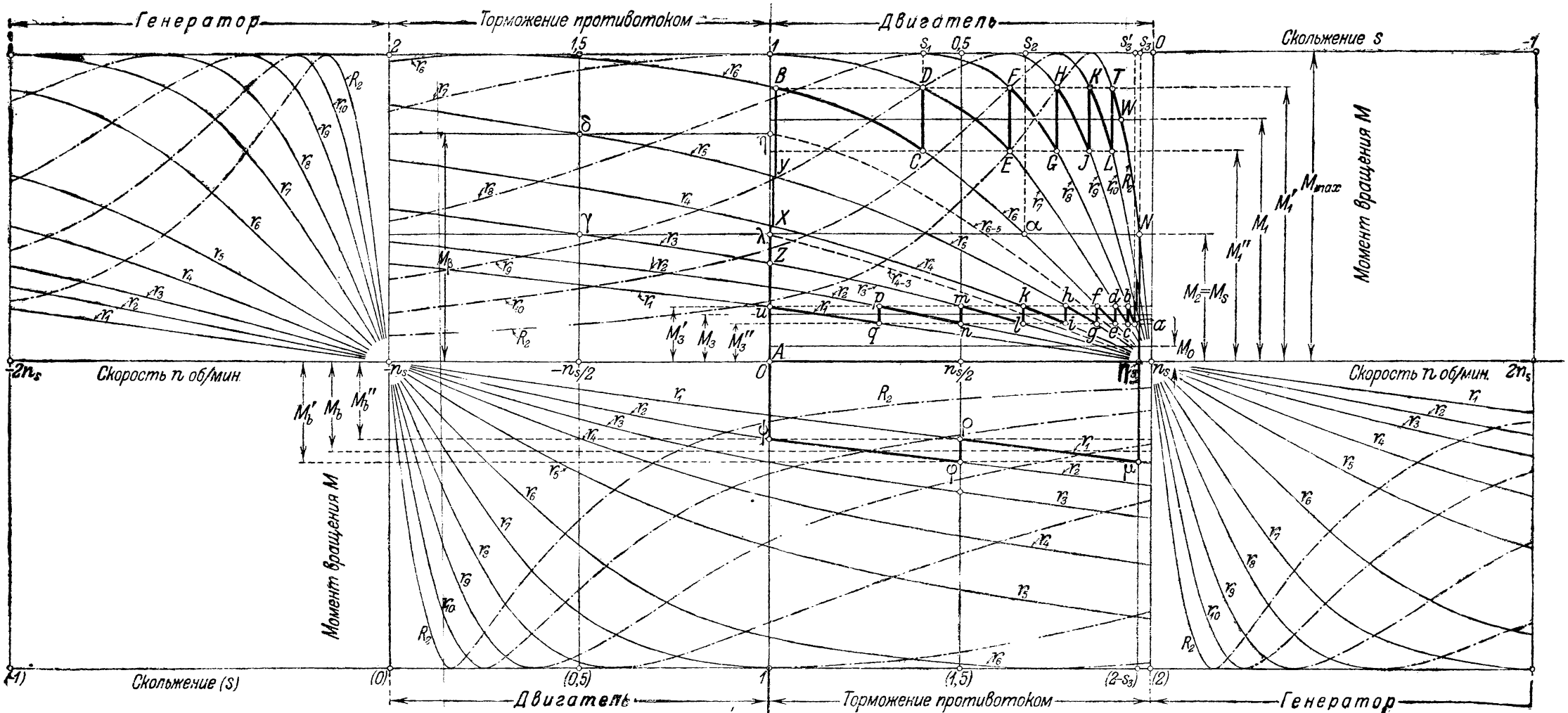
## Система Леонарда


I. Физика привода 221
A. Режим подъема . . . . . 221
1. Трехпериодная трапецоидальная тахограмма с прямолинейными боками . 221
a. Случай моторного режима в период замедления 221
b. Случай свободного выбега в период замедления . . . . 226
c. Случай тормозного (генераторного) режима в период замедления 228
d. Случай моторно-генераторного режима в период замедления 230
2. Трехпериодная тахограмма с параболической частью в период пуска . 232
B. Режим спуска . . . . . 235
1. Трехпериодная трапецоидальная тахограмма с прямолинейными боками . 235
a. Заданное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы (случай моторного режима в период пуска) . . . . 235
b. Заданное пусковое ускорение равно собственному (свободному) ускорению системы. (Случай свободного движения системы в период пуска) 238
c. Заданное пусковое ускорение меньше собственного (свободного) ускорения системы. (Случай тормозного (генераторного) режима в период пуска) 240
2. Трехпериодная тахограмма с параболической частью в период пуска . 242
a. Заданное начальное пусковое ускорение больше собственного (свободного) ускорения системы . . . . . 242
b. Заданное начальное пусковое ускорение равно собственному (свободному) ускорению системы . . . . . 245
c. Заданное начальное пусковое ускорение меньше собственного (свободного) ускорения системы . 246
II. Определение мощности машин системы Леонарда 249
III. Расход энергии 261


*Раздел третий*

## Область и условия применения приводов различных систем


I. Асинхронный подъемный двигатель . 263
II. Система Леонарда 266
III. Система Ильгнера-Леонарда 268
IV. Привод с управляемыми ртутными выпрямителями . 268




Фиг. 42. Диаграммы управления асинхронным подъемным двигателем на фоне его механических характеристик. Режим *подъема*.

# Опечатки к труду Ф. Н. Шклярского

| Страница | Строка сверху | Строка снизу | Напечатано | Должно быть |
|---|---|---|---|---|
| 3 | — | 9 | установок | уставок |
| 4 | — | 3 | o- | of |
| 4 | — | 4 | prof | pro- |
| 18 | 17 | — | согласно выражению (31): | согласно выражению (30): |
| 25 | — | 4 | периода $t$: | периода $t_3$: |
| 35 | 13 | — | $P'_1 - F_1 \cdot v_1$ | $P'_1 = F_1 v_1$ |
| 37 | — | 7 | $P'_1 = F \cdot v_1$ | $P'_1 = F_1 \cdot v_1$ |
| 39 | фиг. 12 | | $F_0'' \cdot v$ | $F''_0 \cdot v_1$ |
| 39 | фиг. 12 | | $F''_4 \cdot v_3$ | $F'_4 \cdot v_3$ |
| 40 | 21 | — | $t_0$ | $t'_0$ |
| 43 | 13 | — | 2160 *кг*. | — 840 *кг*. |
| 43 | 15 | — | $= 600 - 12000 \cdot 0{,}42 = -2640$ *кг*. | $\simeq -600 - 12000 . 0{,}42 = +5640$ *кг* |
| 44 | 2 | — | $F_1 \cdot v_1$ | $F'_1 \cdot v_1$ |
| 44 | 11 | — | $= 2160 . 1.25 = 2700 \frac{кг.м}{сек} = 26 kW$. | $= -840 . 1{,}25 = -1050 \frac{кг.м}{сек} = -10{,}3 kW$ |
| 47 | 6 | — | 309 42 *м*. | 309, 42 *м*. |
| 48 | 13 | — | $P''_1$ | $P'_1$ |
| 51 | — | 5 | $h_1 = \frac{1}{2} a_1 t^2$; | $h_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2$; |
| 58 | подпись под фиг. 16 | | переменных; ускорениях, периоды $t_1$ и $t_3$ $F_3$ период $t_3$. | переменных ускорениях, периоды $t_1$ и $t_3$; $F_3$ в период $t_3$. |
| 60 | 5 | — | получилась | получилось |
| 60 | 7 | — | выражению (74); | выражению (75); |
| 60 | 26 | — | равномернпго | равномерного |
| 60 | 27 | — | выражениямм | выражениями |
| 61 | 3 | — | $F_3 = kQ + \delta (H - 2x) + m \frac{d^2x}{dt^2}$, | $F_3 = kQ + \delta(H + 2x) + m \frac{d^2x}{dt^2}$, (1e) |
| 62 | 4 | — | условия $F_3$ | усилия $F_3$ |
| 62 | — | 3 и 2 | выражения (100), | выражения (110), |
| 63 | (сноска) | 3 | выражению (92); | выражению (93); |
| 67 | подпись под фиг. 19 | | усилий мощностей $h_3 = \frac{1 - kQ + \delta H - F_3}{2\delta} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{V^2 . 2\delta m}{(kQ + \delta H - F_3)^2}} \right]$ (111a) | усилий и мощностей $h_3 = \frac{kQ + \delta H - F_3}{2\delta} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{V^2 . 2\delta m}{(kQ + \delta H - F_3)^2}} \right]$ (111a) |
| 69 | 2 | — | | |
| 79 | 5 | — | выражениям (137) и (137a) | выражениям (136) и (137) |
| 82 | 24 | — | $F_{s1}'$ | $F''_{s1}$ |
| 84 | фиг. 24 | | $F''_0 V = F'_{(1-0)} V$ | $F''_1 V$ |
| 84 | подпись под фиг. 24 | | периоды $t_1$ и $t_2$ | периоды $t_1$ и $t_3$; |
| 85 | 17 — формула (143a) | | $F'_{s3}$ | $F''_{s3}$ |
| 86 | 13 | — | $F_{s1}'$ | $F'_{s(1-0)}$ |
| 86 | | 1 | 0 47 | 0,47 |
| 86 | | 3 | $F'_2 = F = {}'_{s2} 3434$ *кг*; | $F_2' = F'_{s2} = 3434$ *кг*; |
| 86 | — | 7 | $F'_1$ | $F'_{(1-0)}$ |
| 87 | 2 | | $F'_3 = F_3''$ | $F''_3 = F''_{b3}$ |
| 87 | 4 | | $F''_4$ | $F'_4$ |
| 87 | 6 | | $F''_4 = F_{b4}'' = 4890 - 5000.0{,}2 = -5890$ *кг* | $F''_4 = F''_{b4} = -4890 - 5000.02 = -5890$ *гк* |
| 88 | 16 | — | $t_2$ | $t_3$ |
| 88 | — | 5 | $-ph_3$ | $-2ph_3$ |
| 91 | — | — | $F = {}'_1 6139$ | $F'_1 = 6139$ |
| 92 | | 11 | $= -817\ 1{,}5$ | $817.\ 1{,}5$ |
| 94 | 2 | — | $-2h_1$ | $-2ph_1$ |
| 96 | 3 | | $t$ | $t_1$ |
| 96 | 6 | | $F''_{s3} \cdot V$ | $F'_{s3} . V$ |

| Страница | Строка сверху | Строка снизу | Напечатано | Должно быть |
|---|---|---|---|---|
| 107 | 8 | | (171) | (171 a) |
| 122 | 13 | — | (171 b) | (171 β) |
| 124 | (сноска) 4 | | (171 b) | (171 β) |
| 126 | фиг. 33 | | $F_{s3}'' V = F'_{s4} V$ | $F''_{s3} \cdot v_3 = F'_{s4} \cdot v_4$ |
| 127 | 13 | | проходимый | проходимый |
| 127 | 21 | — | плоной | полной |
| 134 | подпись под фиг. 34 | | соответсвенные | соответственны |
| 141 | 4 | — | перидо | период |
| 146 | — | 12 | (172 a) | (173 a) |
| 149 | 11 | — | $_3 = 28,2$ м, | $h_3 = 28{,}2$ м, |
| 153 | — | 4 | + 330 | + 7.330 |
| 155 | | 14 | остальнх | остальных |
| 159 | — | 12 | (см. етр. | (см. стр. 185 — 18 |
| 163 | — | 2 | периода $t$ | периода $t_1$ |
| 167 | 2 | — | Неуравновешеннея | Неуравновешенна |
| 174 | — | 26 | обусловленно | обусловлено |
| 176 | 19 | — | истечений | истечении |
| 177 | 8 | — | $P$ / $\eta$ | $\frac{P}{\eta_z}$ |
| 177 | 16 | — | на | за |
| 177 | 19 | | $L$ | $L_n$ |
| 178 | 5 | — | топротивление | сопротивление |
| 181 | форм. (263) и (264) | | $F\beta$ | $F_\beta$ |
| 181 | форм. (267) | | $\frac{1}{\eta_\beta}$ | $\frac{1}{\eta_M}$ |
| 184 | 19 | — | и $F_s' V_g$ | и $F''_s V_g$ |
| 184 | 27 | — | $b_0 b' d'' d_0 b_0$ | $b_0 b' d' d_0 b_0$ |
| 184 | форм. (268) | | $F\beta$ | $F_\beta$ |
| 190 | — | 5 | $F_{\beta 1}$ | $F_{b4}$ |
| 192 | 17 | — | диаграмма $q$ | диаграмма $b$ |
| 197 | фиг. 61 | | Конец периода $t_2$ и начало периода $t_3$ | на тахограмме соответствую |
| 202 | форм. (271) | | $M_{но}$ | $M_{ном}$ |
| 202 | 28 | — | $Qf(r_4)$ | $Of(r_4)$ |
| 205 | таблица 1 | | ХЕМЗ | ХЭМЗ |
| 206 | 12 | — | замыкает | размыкает |
| 206 | — | 19 | степень | ступень |
| 206 | — | 20 | $M''_{сп}$ | $M''_{ст}$ |
| 207 | 4 | | $M_{пуск}$ | $M''_{пуск}$ |
| 224 | подпись под фиг. 65 | | диаграммам | диаграммами |
| 240 | 9 | — | $t_2 + t_3$ | $t_{(\alpha' - \alpha'')} + t_2 + t_3$ |
| 245 | 4 | | закон приложенного | закон изменения приложе |
| 249 | 21 | — | $t_{(i)}$ | $t_{g(i)}$ |
| 249 | 30 | — | стати | статически |
| 255 | форм. (322) | | $(P_{d0} + P'_{d1}) t_1$ | $(P_{d0} + P'_{d1}) t'_1$ |
| 256 | форм. (323) | | $p_{mt} = (0{,}02 - 0{,}03) P_{mt}$ | $p_{mt} = (0{,}02 - 0{,}03) P$ |
| 261 | форм. (331) | | $P_{no}\left(0 + \frac{1}{2}\tau\right)$ | $P_{n0}\left(\theta + \frac{1}{2}\tau\right)$ |
| | 7 | — | pores | ropes |
| | | 4 | hoisfing | hoisting |
| | | 18 | one the system. | one of the system. |