Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени Горного института, том XXIII, 1949

К ВОПРОСУ О РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕПЕРНЫХ ЛЕБЕДОК

Кандидат технических наук Л. Шклярский

Настоящая статья посвящена вопросу анализа режима работы привода скреперных лебедок. Как известно, в последнее время скреперные установки нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

Однако, несмотря на это, исследований режима работы их электрического привода и более обоснованного выбора мощности привода скреперных лебедок в литературе не имеется. Анализ режима работы привода скреперных лебедок произведен главным образом на основании диаграмм мощности и тока, снятых автором в производственных условиях в Черемховском угольном бассейне в 1943 г. (рис. 1, 2, 3 и 4), а также на основании аналогичных кривых, приведенных в существующей литературе (рис. 5 и 6).

Необходимо заметить, что хотя диаграммы на рис. 1, 2, 3 и 4 сняты с помощью обычных, не самопишущих измерительных электроприборов, однако общий характер нагрузки привода скреперных лебедок представляется возможным проследить по данным кривым. С другой стороны, диаграммы, приведенные на рис. 5 и 6, сняты с помощью регистрирующих измерительных приборов и несколько затрудняют анализ, так как многочисленные пики, обусловленные всякими случайными явлениями, затрудняют подчас разграничение холостого хода от рабочего хода скрепера. Таким образом, можно считать, что оба рода диаграмм как бы дополняют друг друга при анализе режима работы привода скреперных лебедок.

Из рассмотрения нагрузочных диаграмм (рис. 1, 2, 3, 4, 5 и 6) следует, что нагрузка скреперных лебедок неравномерна, чередуется рабочий и холостой ход. Режим двигателя характеризуется циклически изменяющейся нагрузкой. Следовательно, по существу имеет место прерывистый режим нагрузки, повторно-кратковременный, который характеризуется чередованием периодов работы и пауз (остановки или холостой ход двигателя). Далее по нормам ВЭС (Электромашины, раздел 3, параграф 10), при повторно-кратковременном режиме общая продолжительность цикла работы (время работы + время паузы или холостого хода) не должна превосходить 10 минут. Для всех скреперных лебедок время цикла значительно меньше 10 минут. В частности, для небольших лебедок (УСА-10, ЛР)

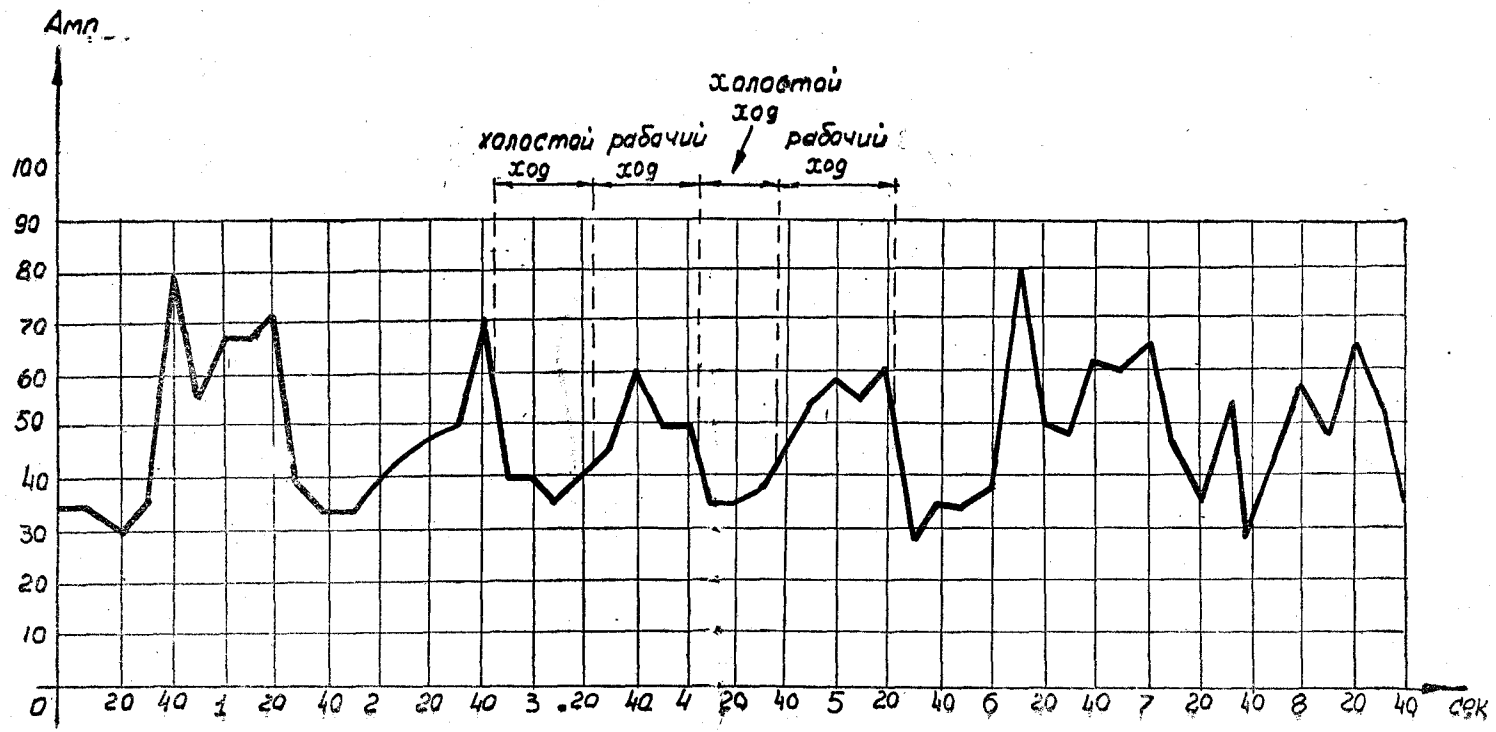

Амп
холостой ход
холостой ход
рабочий ход
рабочий ход
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
20 40 1 20 40 2 20 40 3 20 40 4 20 40 5 20 40 6 20 40 7 20 40 8 20 40
сек

Рис. 1.

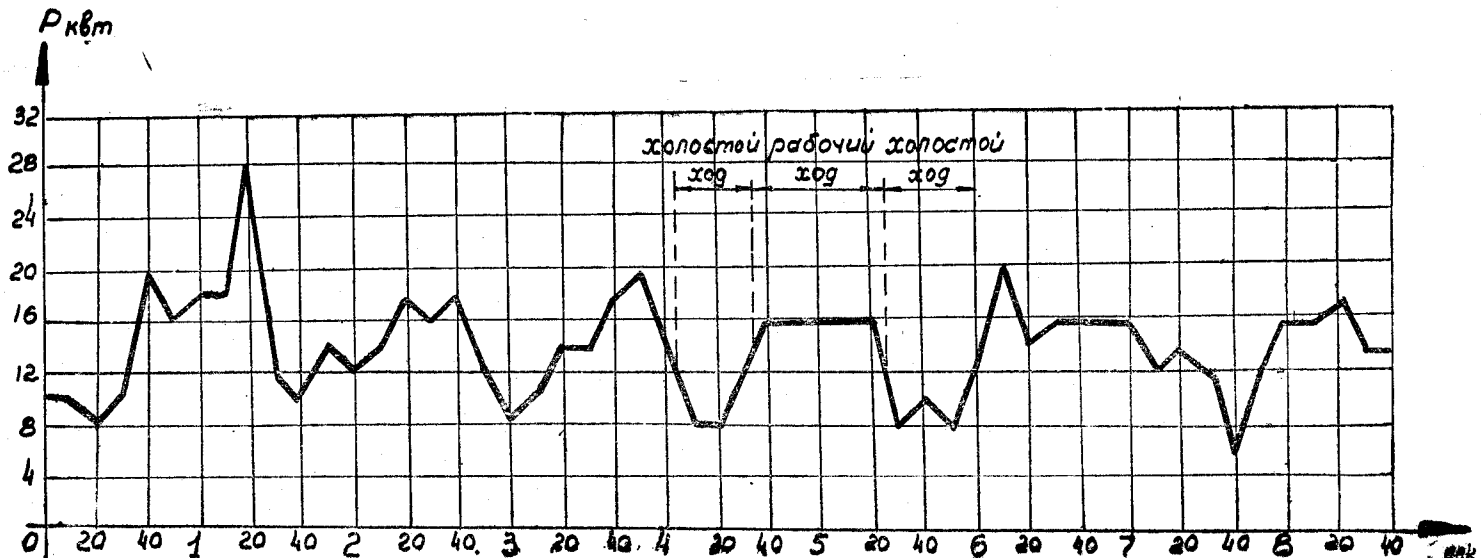

Pквт
32
28
24
20
16
12
8
4
0
20
40
1
20
40
2
20
40
3
20
40
4
20
40
5
20
40
6
20
40
7
20
40
8
20
40
сек
холостой ход
рабочий ход
холостой ход

Рис. 2.

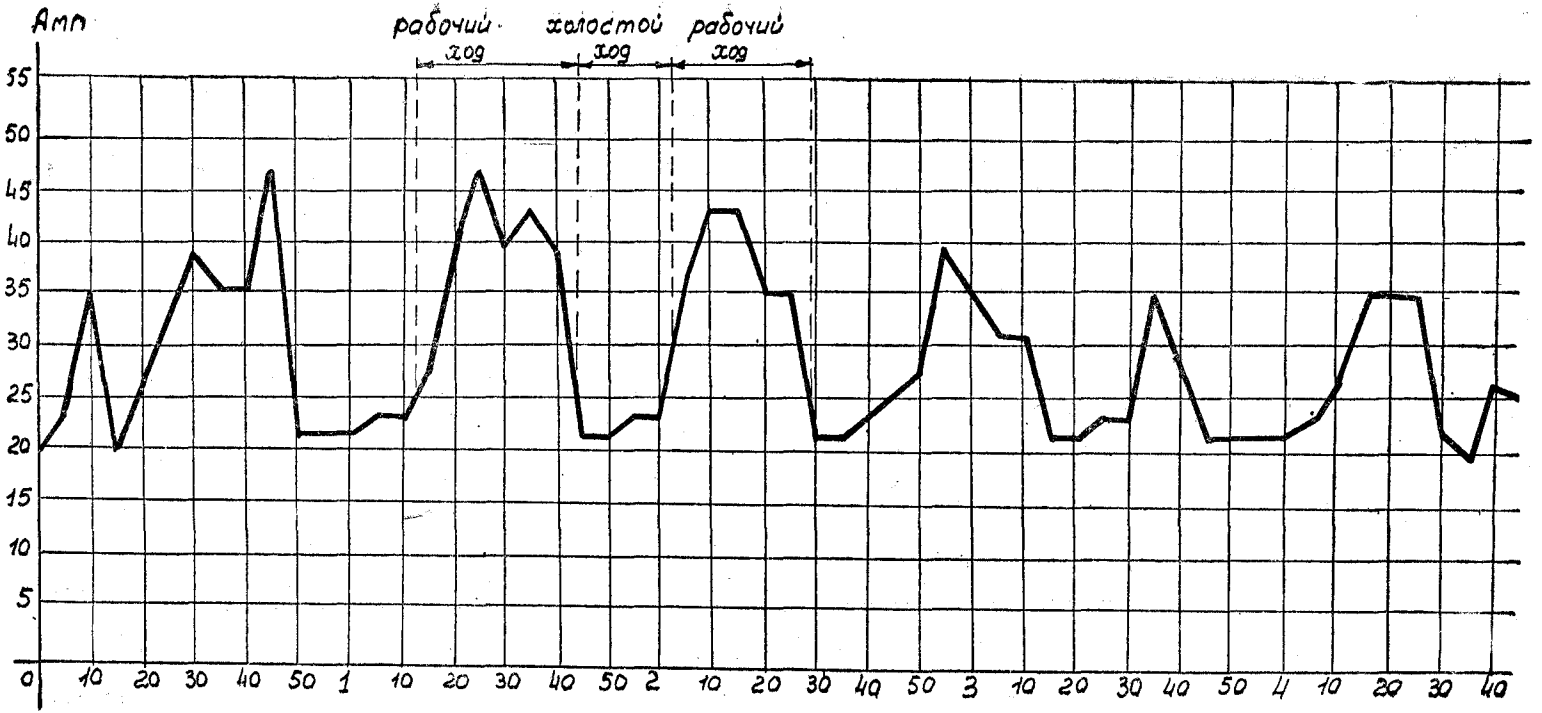

Амп
рабочий ход
холостой ход
рабочий ход
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
10 20 30 40 50 1 10 20 30 40 50 2 10 20 30 40 50 3 10 20 30 40 50 4 10 20 30 40

Рис. 3.

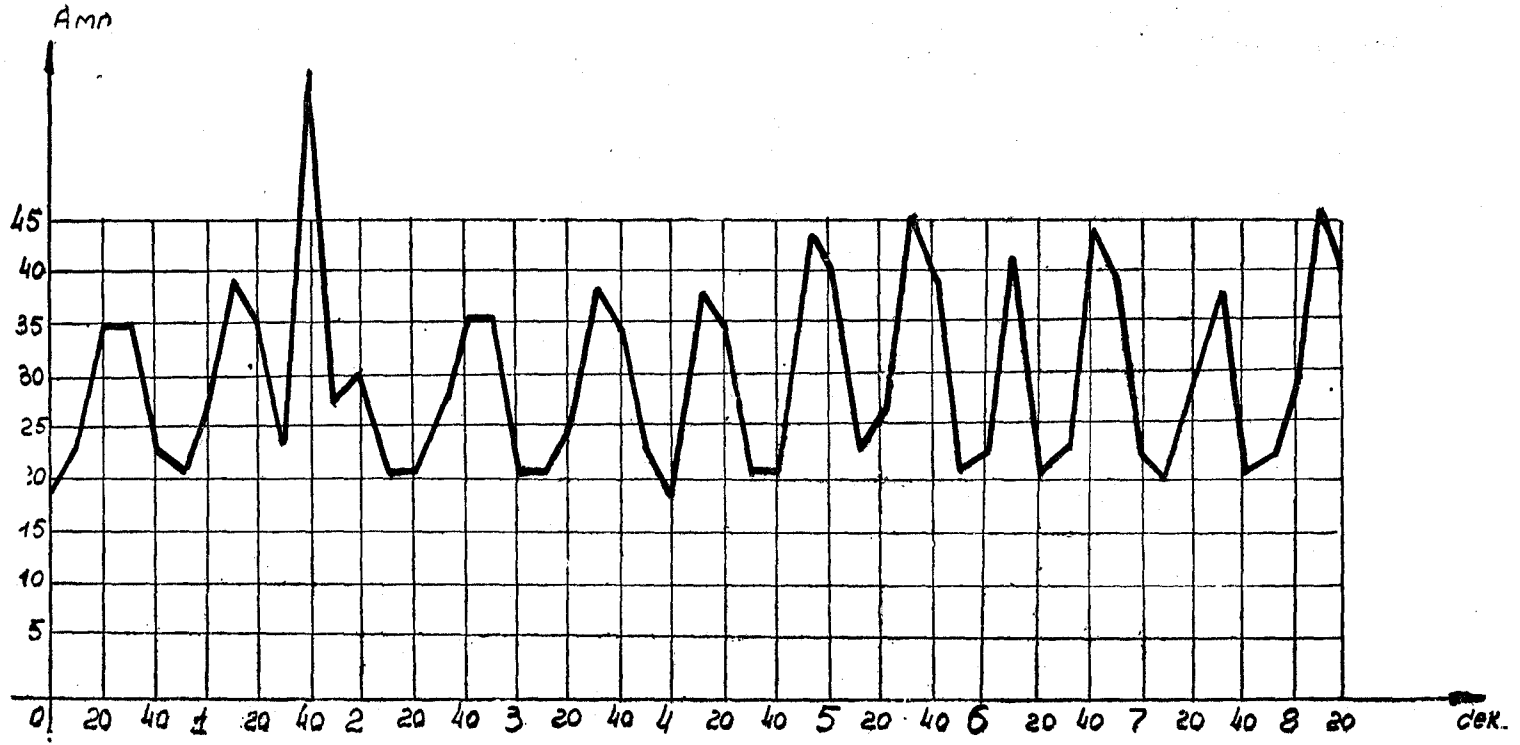

Amn
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
20
40
1
20
40
2
20
40
3
20
40
4
20
40
5
20
40
6
20
40
7
20
40
8
20
сек.

Рис. 4.

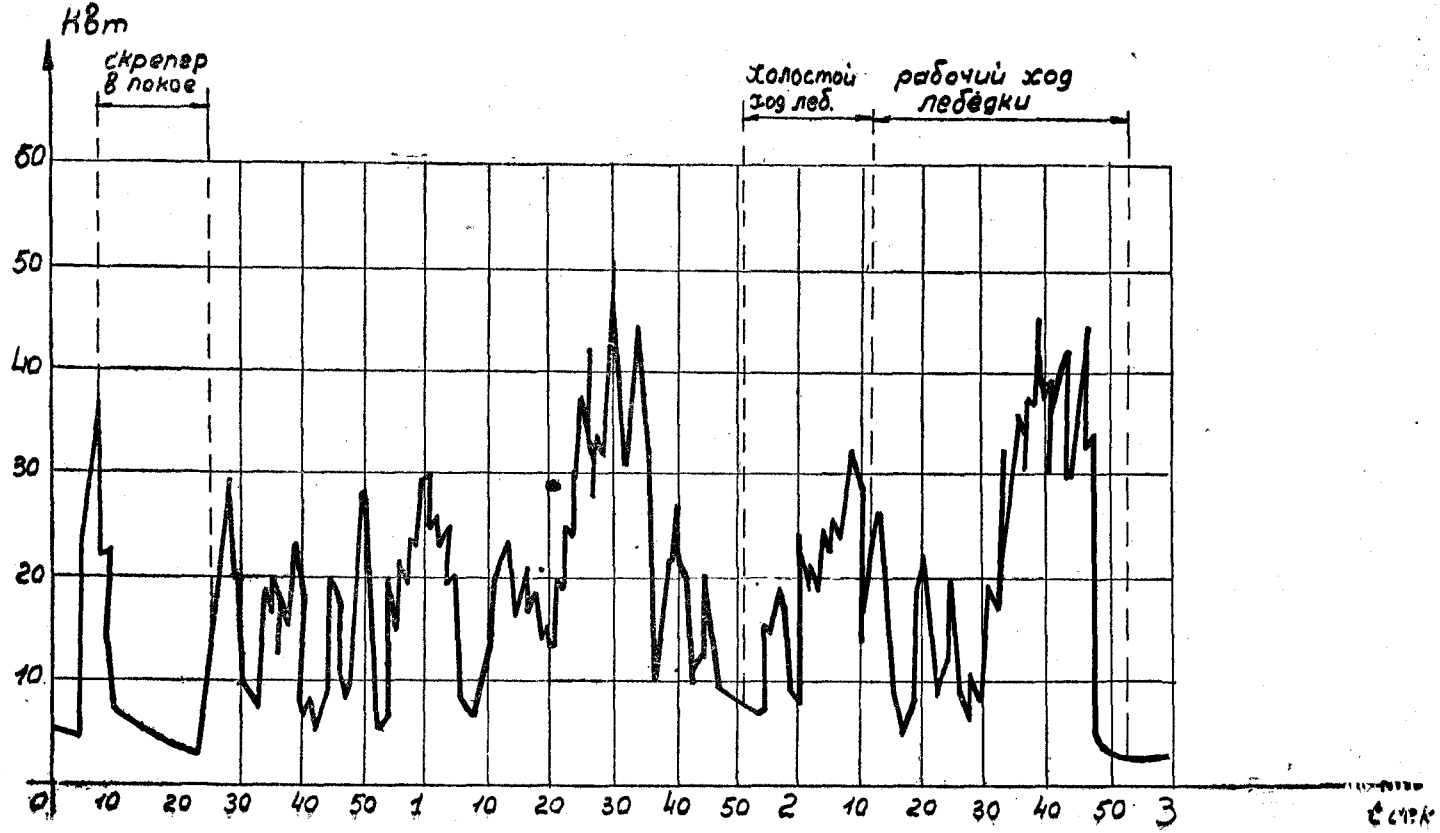

кВт
скрепер в покое
холостой ход леб.
рабочий ход лебёдки
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
1
10
20
30
40
50
2
10
20
30
40
50
3
сек

Рис. 5.

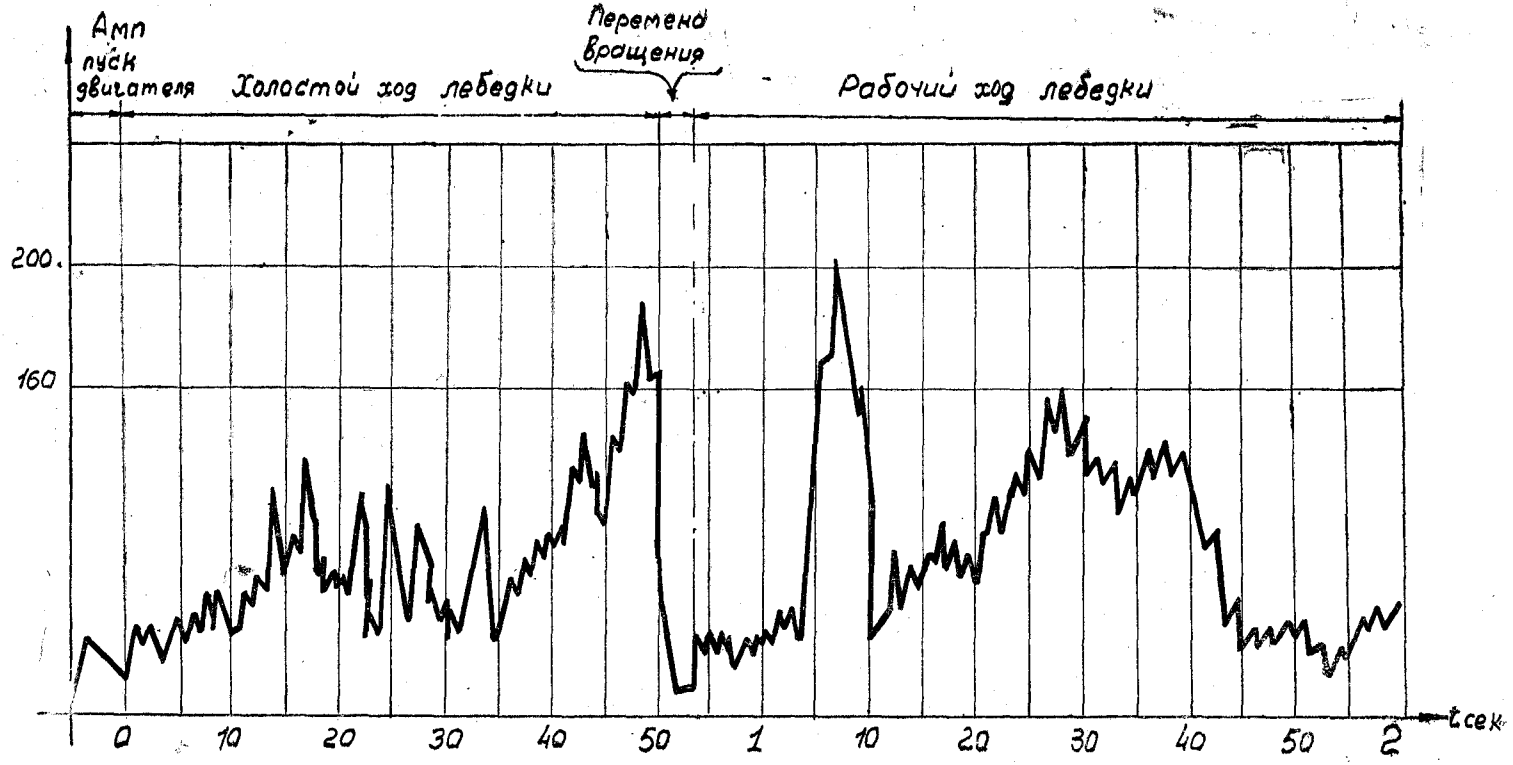

Амп
пуск
двигателя
Холостой ход лебедки
Перемена
вращения
Рабочий ход лебедки
200.
160
0
10
20
30
40
50
1
10
20
30
40
50
2
t сек

Рис. 6.

время цикла $t_ц = 4$ минуты при максимальных длинах скреперирования (125 м), а для самых мощных лебедок типа С-150 при максимальной длине скреперирования 350 м, время цикла с учетом возможных пауз при перемене хода не более 7 минут.[1] Таким образом и в этом смысле режим привода скреперных лебедок является прерывистым. Правда, имеется некоторая условность определения режима работы привода скреперной лебедки, как повторно-кратковременного. Это обстоятельство обусловлено тем, что во время холостого хода лебедки имеет место не собственно холостой ход двигателя, а холостой ход скрепера, т. е. фактически двигатель в это время находится под нагрузкой. Нагрузка двигателя во время холостого хода скрепера не превосходит ~50% нагрузки рабочего хода, а подчас и того менее, таким образом, нагрузка в больших пределах и периодически меняется. Наличие неравномерной нагрузки создает условия нагрева двигателя, отличающиеся от таковых при длительном режиме. Кроме того, необходимо иметь в виду, что так называемая „относительная продолжительность рабочего периода" — ПР% также влияет на условия нагрева двигателя. В большинстве случаев для скреперных лебедок ПР% составляет 50 — 70%, что отличается от условий длительного режима, каковое обстоятельство должно быть принято во внимание. Хотя перечисленные особенности режима работы привода скреперных лебедок не вызывают необходимости создания двигателя специальной конструкции, однако при выборе его мощности указанные особенности режима должны быть учтены.

На основании всего вышесказанного режим работы привода скреперных лебедок может быть *условно* назван повторно-кратковременным.

Из нагрузочных диаграмм также видно, что имеют место многочисленные пики мощности (тока) во время равномерного хода скрепера — как во время рабочего, так и во время холостого хода скрепера. Указанные кратковременные перегрузки наступают тогда, когда на пути скрепера попадаются крупные куски материала, а при рабочем ходе они могут захватываться скрепером, вызывая тем самым ощутительные перегрузки. Неровности почвы также вызывают кратковременные перегрузки. В частности, на рис. 5 видно, что кратковременные перегрузки достигают 50 *квт* при номинальной мощности двигателя в 30 *квт*. На рис. 2 пики достигают 28 *квт*, при номинальной мощности в 14,5 *квт*. На рис. 3 и 4 перегрузки достигают 56—60 *а* при номинальном токе в 50 *а*.

Таким образом, наличие большого числа пик, обусловленного в большей степени случайными явлениями, должно быть учтено при выборе мощности привода. Закономерности в отношении величины и длительности указанных перегрузок установить нельзя, поэтому влияние их на величину мощности двигателя, выбранного расчетным путем, может быть учтено лишь соответственным коэффициентом. Указанный коэффициент, естественно, будет тем более точно учитывать влияние перегрузок на двигатель, чем больше будет накоплено фактических данных в виде нагрузочных диаграмм скреперных ле-

---

[1] Строго говоря, время цикла скреперных лебедок еще меньше, так как в отдельности время рабочего хода и время холостого хода можно считать временем отдельных циклов. Во время холостого хода имеет место время разгона движущихся масс, время равномерного хода скрепера и время паузы. То же самое имеет место во время рабочего хода скрепера.

бедок, аналогичных приводимым в настоящей статье. С другой стороны, так как перегрузки достигают даже двукратного значения от установленной мощности двигателя, то необходимо, чтобы указанные перегрузки двигателя были бы $\leq 1{,}8$ от выбранной мощности его; поэтому, по мнению автора, коэффициент α, учитывающий величину перегрузки, может быть принят равным 1,1—1,15, в зависимости от характера материала.

Таким образом, установленная мощность двигателя

$$P_{дв} = \alpha \cdot P, \qquad (1)$$

где P — мощность двигателя, полученная расчетным путем.

Наличие многочисленных пик мощности предъявляет ряд требований к механической части двигателя и к его вентиляции. Однако необходимо заметить, что двигатели, изготовляемые союзными заводами и применяемые в качестве привода к скреперным лебедкам, удовлетворяют указанным требованиям.

В отношении типа двигателя для скреперной лебедки необходимо заметить, что ориентироваться представляется возможным только на асинхронные двигатели, имея в виду общеизвестные их преимущества перед иными типами двигателей. Как уже говорилось, режим работы привода скреперных лебедок характеризуется многочисленными перегрузками скреперных лебедок, которые, как видно из приведенных нагрузочных диаграмм, достигают двукратного значения от установленной мощности двигателя. Необходимо заметить, что благодаря наличию фрикционного соединения между двигателем скреперной лебедки и барабанами, создается защита двигателя, хотя и довольно грубая, от чрезмерных перегрузок. С другой стороны, для точной, эффективной защиты двигателя необходимо ориентироваться не на обычные рубильники с плавкими предохранителями, где защита от перегрузок осуществляется весьма ориентировочно, а на пускатели, например ПМВ, где имеются тепловые реле, с помощью которых защита двигателя от перегрузок осуществляется достаточно точно, что очень важно при повторно-кратковременном режиме скреперных лебедок, а также в связи со всякими имеющими место перегрузками.

При непрерывно вращающемся двигателе скреперной лебедки и при наличии фрикционного соединения барабанов с редуктором лебедки, пуск двигателя в собственном смысле осуществляется, во-первых, очень редко, а во-вторых, если и осуществляется, то обязательно вхолостую (редуктор разобщен с барабаном). Таким образом, в этом смысле желательно, чтобы двигатель обладал большой перегрузочной способностью, имея в виду двукратные перегрузки во время работы скрепера; пусковой момент может быть небольшим. С этой точки зрения сравнивать между собой имеет смысл три различные конструкции асинхронных короткозамкнутых двигателей — нормальный, Бушеро и с глубоким пазом, что и проделывается ниже. В частности, большей перегрузочной способностью обладают обычные асинхронные короткозамкнутые двигатели, по сравнению с двигателями Бушеро и с глубоким пазом. Перегрузка $\lambda = \frac{M_{опр}}{M_{ном}}$ равна приблизительно 2—2,3 для двигателей с $\cos\varphi > 0{,}85$ (т. е. для нормальных короткозамкнутых двигателей) и $\lambda = 1{,}75$ для двигателей с $\cos\varphi < 0{,}85$ (т. е. для двигателей Бушеро и с глубоким пазом). Таким образом, по перегрузке в качестве двигателей скреперной лебедки желательны обычные короткозамкну-

тые двигатели; они же удовлетворяют требованию небольшого пускового момента, для которых $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} = 0{,}8—1{,}7$, а для двигателей Бушеро и с глубоким пазом $\frac{M_{пуск}}{M_{ном}} = 1—3$.

Двигатели Бушеро и с глубоким пазом по сравнению с нормальным асинхронным короткозамкнутым двигателем обладают также пониженными значениями $\cos\varphi$ и η на несколько процентов, что является их общеизвестным недостатком. Например, для тихоходных двигателей Бушеро их $\cos\varphi_в = \frac{1}{5}(6 \cdot \cos\varphi_а - 1)$; для двигателей быстроходных, при 1500—3000 об/мин $\cos\varphi_в = \frac{1}{4}(5 \cdot \cos\varphi_а - 1)$, где $\cos\varphi_а$ — коэффициент мощности нормального короткозамкнутого двигателя той же мощности. (См. В. К. Попов. Основы электропривода, 1945 г.).

В отношении величины пускового тока короткозамкнутых двигателей необходимо заметить, что таковой у двигателей Бушеро и в особенности с глубоким пазом снижен не намного; в частности, для последних $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}} = 4—6$, а для нормальных короткозамкнутых двигателей $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}} = 5—7$. Кроме того, в случае надобности (напр., недостаточная мощность трансформатора) можно рекомендовать пуск асинхронного двигателя с помощью переключателя со звезды на треугольник, или для более мощных двигателей применение двигателя с фазовым ротором.

Таким образом, можно притти к выводу, что наиболее подходящим двигателем по своим параметрам в качестве привода скреперной лебедки является нормальный асинхронный короткозамкнутый двигатель.

Режим скреперной лебедки характеризуется неравномерным потреблением мощности, что обусловлено чередованием рабочего и холостого хода скрепера. Кроме того, в момент перемены хода лебедки, а также по ряду других причин имеют место паузы различной длительности, во время которых двигатель вращается вхолостую и потребляет мощность, еще меньшую мощности во время холостого хода скрепера, что видно на рис. 5. С точки зрения загрузки двигателя скреперной лебедки такой режим работы является нецелесообразным. КПД двигателя и $\cos\varphi$ во время холостого хода скрепера резко ухудшаются. Например, для двигателя МА-143 мощностью 16 *квт* (рис. 3 и 4) КПД и $\cos\varphi$ соответственно понижаются: с КПД = 0,93 и $\cos\varphi = 0{,}84$ при номинальной нагрузке до КПД = = 0,91 и $\cos\varphi = 0{,}74$ при холостом ходе скрепера. Не только в смысле лучшего использования двигателя, но также и по условиям большей производительности скреперной установки целесообразно уменьшать время холостого хода лебедки, так как уменьшается время цикла, следовательно, возрастает производительность. В настоящее время сокращение времени холостого хода скреперной лебедки осуществляется или за счет увеличения диаметра холостого барабана (лебедки УСА-10, ЛУ-15, СЛ-К), или за счет специальной повышающей передачи от двигателя к холостому барабану при одинаковых диаметрах обоих барабанов (лебедки УС-30, С-75, С-100, С-150). Причем, например, для лебедок С-75, С-100, С-150 скорость холостого хода более чем

в 2 раза превышает скорость рабочего хода. Таким образом, за счет увеличения скорости холостого хода скрепера улучшается использование двигателя, однако практически скорость холостого хода нецелесообразно принимать больше 4 м/сек, так как холостой ход делается напряженным, возможно частое зашкивление каната в роликах и барабанах лебедки и проч. По этой причине применение данного метода несколько ограничено.

Некоторого улучшения использования двигателя можно также добиться сведением до минимума неоправданных пауз в работе,

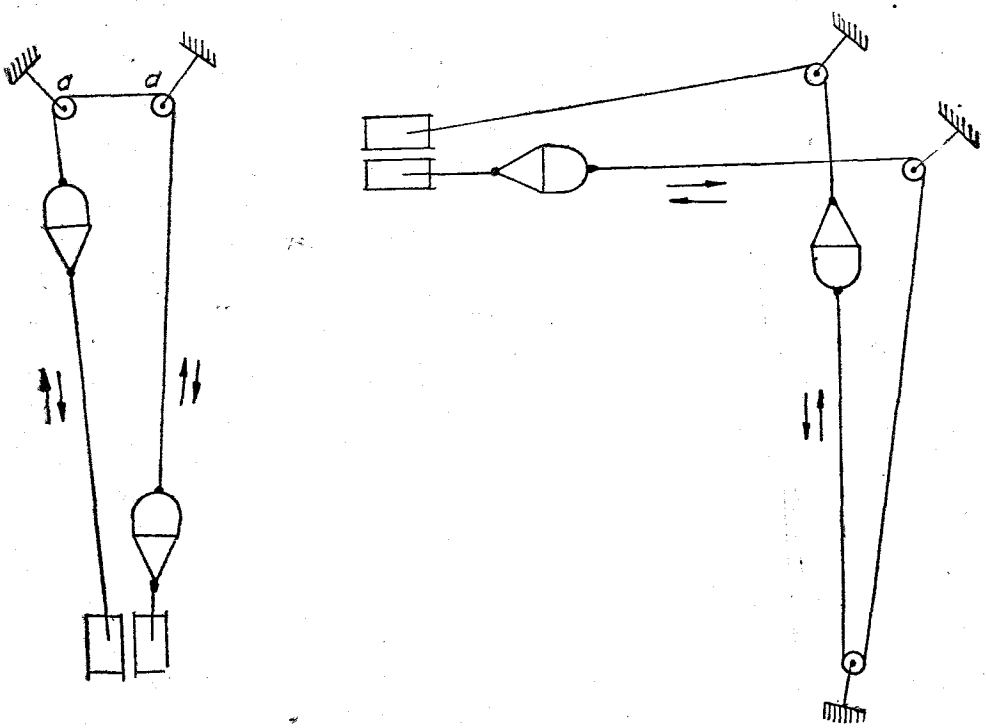


Рис. 7.

в частности, во время перемены хода скреперной лебедки, во время загрузки-разгрузки скрепера, а также выключая каждый раз двигатель в случае отсутствия скреперируемого материала, при удалении неполадок с лебедкой, канатами и проч.

Все рассмотренные выше методы по увеличению производительности скреперной лебедки и загрузки двигателя не обеспечивают, однако, сведения до нуля времени холостого хода скрепера. Сведения до нуля времени холостого хода скрепера можно было бы достигнуть, если бы скреперную лебедку оборудовать не одним, а двумя скреперами, каждый из которых укреплялся бы к своему канату. Хвостовой канат при этом сохраняется. Когда загружается один скрепер, другой разгружается, и наоборот. Таким образом, скреперная установка представляет в этом случае некоторую аналогию подъемной установки с хвостовым канатом с перемещением материала по

горизонтальной или наклонной плоскости (рис. 7). Нетрудно видеть, что в этом случае данная скреперная установка будет обладать следующими преимуществами перед обычной скреперной установкой:

а) производительность резко увеличивается; удельный расход энергии уменьшается;

б) значительно бóльшая загрузка двигателя;

в) режим работы двигателя приближается к длительному; во всяком случае таких провалов на нагрузочных диаграммах (рис. 2, 3 и 4), обусловленных периодами холостого хода скрепера, не будет, так как каждый ход скрепера является рабочим.

Наряду с этим имеются, однако, и недостатки:

а) в частности, в подземных условиях, в тесноте и подчас при недостаточном освещении, скреперы могут друг с другом сталкиваться. При скреперной доставке угля вдоль лавы возможность применения двух скреперов вообще отпадает;

б) затрудняется управление скреперной лебедкой, так как лебедчику приходится одновременно следить за двумя скреперами, что в подземных условиях является затруднительным. Таким образом следует, что указанные скреперные установки реально могут найти применение на поверхности, в частности на складах угля, песка, гравия и проч. На поверхности соответственной установкой блоков (рис. 7) можно добиться исключения возможности столкновения скреперов. Кроме того, на поверхности наблюдение за скреперами и управление лебедкой значительно облегчается, тем более, что при мощных скреперных лебедках лебедчик находится во втором этаже здания лебедки.

Мощность двигателя P скреперной лебедки рядом авторов определяется на основании выражения:

$$P = \frac{V_p \cdot Q}{102 \cdot \eta_л} \cdot f, \qquad (2)$$

где Q — суммарный вес полезного и мертвого груза,

f — коэффициент трения,

V_p — скорость рабочего хода скрепера,

$\eta_л$ — КПД скреперной лебедки.

Таким образом предполагается, что тяговое усилие является постоянным во время работы скрепера. Иными словами, выбор мощности двигателя скреперной лебедки на основании выражения (2) производится так же, как при длительном режиме работы. На самом же деле режим работы двигателя скреперной лебедки как было выяснено выше, не является длительным. Следовательно, выбор мощности на основании выражения (2) не может быть рекомендован с точки зрения учета всех особенностей режима двигателей скреперных лебедок. Исходя из этого, выбор мощности двигателя скреперной лебедки целесообразно было бы осуществлять на основании нагрузочных диаграмм, снятых регистрирующими приборами. Затем, из указанных нагрузочных диаграмм необходимо было бы определить величину средне-квадратичной нагрузки (мощности или тока), осуществив на основании этого выбор мощности двигателя с последующей проверкой на перегрузку по данным диаграмм. При этом методе выбора мощности, хотя недостаточно учитывается нагрев двигателя при пе-

реходном режиме, однако учитываются все колебания нагрузки при работе скрепера. Но, к сожалению, этот метод приходится отвергнуть несмотря на его простоту, так как условия скреперирования весьма разнообразны как в отношении угла наклона плоскости скреперирования, так и в отношении характера скреперируемого материала и длины скреперирования. В этом смысле необходимо было бы располагать для многочисленных условий скреперирования нагрузочными диаграммами, что практически непосильная задача.

Имея в виду все сказанное, ниже делается попытка предложить метод выбора мощности привода скреперной лебедки.

Режим работы скреперных лебедок характеризуется частыми пусками, вернее частыми разгонами движущихся масс. Каждый раз, как в начале рабочего хода, так и в начале холостого хода, имеет место разгон движущихся масс (масса скрепера, барабанов и канатов при холостом ходе или масса скрепера и материала в нем, барабанов и канатов при рабочем ходе), при непрерывно вращающемся двигателе. Это обусловливает кратковременную перегрузку двигателя во время разгона масс в начале рабочего или холостого ходов. Таким образом, имеет место определенное число включений лебедки в час. Здесь идет речь не о включении двигателя в сеть, а о разгоне движущихся масс при непрерывно вращающемся двигателе; но поскольку имеет место периодически меняющаяся нагрузка на двигатель, то может итти речь о числе включений в час скреперной лебедки. Число включений в час скреперной лебедки колеблется в широких пределах, в частности от 100—120 (лебедки ЛУ-15, УС-15 при длине откатки 50 м) до 20—30 для лебедок типа С-100, С-150 при длине откатки 350 м. Очевидно, что максимальное число включений в час скреперных лебедок определится из условий минимальной длины скреперирования.

Необходимость проверки ориентировочно, например по формуле (2), выбранного двигателя на допустимое число включений в час обусловлена тем, что условия работы асинхронных двигателей, в особенности короткозамкнутых, которые применяются для скреперных лебедок, отличаются от работы двигателей при длительном режиме. Общепринятым методом проверки на допустимое число включений в час является метод средних потерь, когда, по существу, учитываются суммарные средние медные потери статора и ротора за цикл и сопоставляются с суммарными медными потерями в статоре и роторе при нормальном режиме двигателя. Железные потери в большинстве случаев не учитываются, так как они для двигательного режима составляют 1—2%.

В данном случае необходимо только иметь в виду, что потери в двигателе во время пуска скрепера (период ускоренного движения массы барабанов, канатов, скрепера и материала в нем) не могут быть определены таким методом, каким они определяются обычно в случае пуска самого двигателя, связанного с соответственным исполнительным механизмом. При пуске скрепера двигатель, как известно, непрерывно вращается, поэтому пусковые потери в двигателе в собственном смысле будут отсутствовать — пуск скрепера соответствует работе двигателя на устойчивой части его характеристики.

С другой стороны, бесспорно, что потери в двигателе при условии его непрерывного вращения при пуске скрепера будут меньше таковых при пуске двигателя.

Имея в виду все сказанное, представляется возможным следующим образом определить потери в двигателе в течение отдельных периодов цикла.

Таким образом, вычисление суммарных потерь в статоре и роторе во время разгона системы может быть произведено по следующей формуле:

$$A_1 = \frac{P_{\text{пуск}}(1-\eta_{\text{дв}})}{\eta_{\text{дв}}} t_1 \text{ квт-сек}, \quad (3)$$

$P_{\text{пуск}}$ — мощность, потребляемая двигателем при пуске груженого скрепера;

t_1 — время пуска скрепера;

$\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя при данной нагрузке.

Суммарные потери в статоре и роторе во время установившегося движения скрепера определяются из выражения:

$$A_2 = \frac{P_{\text{ст}}(1-\eta_{\text{дв}})}{\eta_{\text{дв}}} t_2 \text{ квт-сек}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ст}}$ — мощность, потребляемая двигателем при установившемся движении;

$\eta_{\text{дв}}$ — КПД двигателя при данной нагрузке;

t_2 — время установившегося движения.

Потери в статоре и роторе за время паузы определяются из выражения:

$$A_3 = \frac{P_0(1-\eta_{\text{дв}_0})}{\eta_{\text{дв}_0}} \cdot (\theta_1 + t_3) \text{ квт-сек}, \quad (5)$$

где P_0 — мощность двигателя при холостом ходе;

$\eta_{\text{дв}_0}$ — КПД двигателя при холостом ходе;

$\theta_1 + t_3$ — время паузы. [1]

Аналогичным образом определяются потери в двигателе при холостом ходе скрепера.

Полные потери в двигателе за время рабочего и холостого хода скрепера будут:

$$A_m = A_1 + A_2 + A_3 + A_1' + A_2' + A_3',$$

где A_1', A_2', A_3' — потери в двигателе во время холостого хода скрепера.

Средние действительные потери мощности за время цикла в киловаттах будут:

$$N_m = \frac{A_m}{t_ц} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_1' + A_2' + A_3'}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + \theta_1 + \theta_2}. \quad (6)$$

Допустимые потери мощности выбранного двигателя могут быть определены из выражения

$$N_d = N_n \cdot \frac{\alpha'(t_1 + t_2 + t_4 + t_5) + t_3 + t_6 + \theta_1 + \theta_2}{\alpha'(t_1 + t_2 + t_4 + t_5)}, \quad (7)$$

где

$$N_n = \frac{P_N(1-\eta_{\text{дв}})}{\eta_{\text{дв}}}.$$

[1] Время паузы состоит из: а) времени t_3, прошедшего с момента разобщения двигателя с барабаном скреперной лебедки до момента остановки барабанов, канатов и скрепера, и б) времени θ_1, в течение которого производится изменение направления движения скрепера.

Причем P_N — номинальная табличная мощность двигателя; α' — коэффициент, учитывающий ухудшение охлаждения двигателя во время остановки, пуска и торможения. Для ориентировочных подсчетов можно принимать $\alpha' \cong 3$. Однако в нашем случае, как правило, остановки, пуск и торможение двигателя отсутствуют. Поэтому принимаем $\alpha' = 1$.

Располагая значениями N_m и N_n, находим допустимое число включений в час (z) по формуле: [1]

$$Z = 3600 \frac{N_n}{N_m \cdot t_ц} \sqrt{\frac{N_m \cdot t_ц}{N_n \cdot t_к}}, \qquad (8)$$

где

$$t_к = t_1 + t_2 + t_4 + t_5 .$$

Если полученное по формуле (8) значение z меньше такового для двигателя скреперной лебедки для данных условий скреперирования, принимается следующий больший по мощности двигатель, и проверка выполняется снова.

[1] Проф. В. К. Попов. Основы электропривода, 1945.