

А. Б. Зеленов

"Выбор
мощности
электропривода
механических
приводных
станков"

РЕ

7
Министерство высшего и среднего специального образования УССР
Учебно-методический кабинет по высшему образованию
Коммунарский горно-металлургический институт

А.Б. Зеленов

ВЫБОР МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ
ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Утверждено Министерством высшего и среднего
специального образования Украинской ССР
в качестве учебного пособия для студентов
специальности "Электропривод и автоматизация
промышленных установок и технологических
комплексов"

Киев УМК ВО 1990

Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов:
Учеб. пособие / А.Б.Зеленов. - К.: УМК ВО, 1990. - 200 с.

Рассмотрены вопросы расчета мощности электроприводов типичных механизмов прокатных станов с использованием классических и специальных методов расчета тепловой нагрузки двигателей. Даны примеры различных расчетов мощности электродвигателей для некоторых механизмов. Пособие предназначено для студентов специальности 21.05 "Электропривод и автоматизация промышленных установок".

Ил. 78. Библиогр.: 8 назв.

Учебное издание

Зеленов Анатолий Борисович

Выбор мощности электропривода механизмов
прокатных станов

Учебное пособие

Рецензенты: А.В. Садовой, канд. техн. наук (ДИИ)
В.Б. Клепиков, канд. техн. наук (ХПИ)

ISBN 5-7763-8121-1

© Учебно-методический кабинет
по высшему образованию при
Минвузе УССР, 1990

Редактор Л.Н. Алдошина

Корректоры: О.В. Горина

Т.А. Ярошенко

Т.Н. Сенюк-Шевчук

Св. темплан 1990 г., поз. 121

Подп. к печ. 11.05.90. Формат 60×84^{1/16}. Бумага
тип. № 3. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,62. Усл. кр.-отт. 11,85.
Уч.-изд. л. 12,31. Тираж 700
Зак. № 01161-р. Цена 40 к.
УМК ВО при Минвузе УССР
252135, г. Киев, проспект Победы, 10.
РАПО «Укрвузполиграф»
252151, г. Киев, ул. Волинская, 60.

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения производительности и улучшения качества работы прокатного оборудования вопрос правильного выбора мощности электропривода имеет большое значение.

Механизмы прокатных станов многообразны по конструкции и выполняемым функциям, в связи с этим различны и требования, предъявляемые к их автоматизированным электроприводам, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся достаточно простые электроприводы без регулирования скорости, ко второй - сложные регулируемые электроприводы, работающие в динамических режимах с частыми пусками и торможениями. К этой же группе относятся приводы механизмов, нуждающихся в точной остановке или работающих на упор. Для приводов второй группы широко используются системы питания двигателя от управляемого источника /генератора постоянного тока, тиристорного преобразователя напряжения, преобразователя частоты/.

В пособии подробно изложены специальные, разработанные автором, методы расчета мощности, не излагаемые в учебных пособиях по теории электропривода, дано много числовых примеров расчета мощности привода для различных механизмов прокатных станов.

Работа электроприводов и расчет их мощности рассмотрены во взаимосвязи с технологическим процессом и конструкциями механизмов. Поэтому автор считал целесообразным, не претендуя на полноту освещения вопроса, привести в соответствующих разделах необходимые сведения о характере технологических процессов, конструктивных особенностях и основных параметрах механизмов.

1. ОБЩИЕ МЕТОДЫ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1. Постановка задачи выбора мощности электропривода

Правильный выбор мощности двигателя обеспечивает надежную и экономичную работу производственного механизма. Выбранная мощность должна соответствовать предполагаемой или рассчитанной нагрузке. Завышение мощности двигателя неоправданно увеличивает габаритные размеры, вес и первоначальную стоимость установки, ухудшает экономические показатели электропривода /снижает КПД и коэффициент мощности/, что отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках системы цехового и заводского электроснабжения. Занижение мощности вызывает перегрев отдельных его частей, что ускоряет выход установки из строя. Кроме того, при перегрузке двигателя также понижаются КПД и коэффициент мощности.

При любом графике нагрузки электродвигатель должен удовлетворять следующим основным требованиям: 1/ перегрев двигателя не должен превышать значений, установленных ГОСТ 183-74 на электрические машины; 2/ двигатель сообщает рабочей машине необходимую частоту вращения, при этом он должен развивать момент, требуемый механизмом.

Для многих электроприводов механизмов прокатных станов необходимо обеспечить минимальное время разгона и торможения. Это условие может быть выполнено при правильном выборе так называемого оптимального передаточного числа редуктора между электродвигателем и механизмом. Кроме того, часто требуется решить вопрос о габаритных размерах двигателя и редуктора, обеспечивающих минимальную первоначальную стоимость электропривода. Таким образом, при выборе мощности электродвигателя решается ряд вопросов, связанных с его нагревом, перегрузочной способностью, динамическими свойствами и стоимостью.

Для электроприводов большинства механизмов прокатных станов динамические свойства имеют столь же существенное значение, что и термическая устойчивость двигателя. Вот почему выбор электродвигателя для этих механизмов необходимо начать с расчета динамических свойств привода, т.е. с определения оптимального передаточного числа редуктора для предварительно выбранного двигателя. После этого двигатель проверяется на нагрев и на максимально возможную перегрузку.

Необходимо также редукторный вариант электропривода сравнить по технико-экономическим показателям с безредукторным, который в некоторых случаях обеспечивает наилучшие динамические свойства установки или ее меньшую стоимость.

Для выбора мощности электродвигателя необходимо знать его нагрузку как в установившихся, так и в переходных режимах. Для этого

рассчитываются или строятся на основании экспериментальных данных так называемые нагрузочные диаграммы - зависимость момента на валу двигателя, мощности или тока якоря /ротора/ в функции времени.

Проверка электродвигателя на перегрузку заключается в определении его потребного номинального момента или тока из условий

$$M_H \geq \frac{M_{max}}{\lambda_M}; \quad I_H \geq \frac{I_{max}}{\lambda_I} \quad /1.1/$$

где M_{max} - максимальный момент, который должен развить электродвигатель в соответствии с его нагрузочной диаграммой; I_{max} - максимальный ток, протекающий в электродвигателе и определяемый из диаграммы $I=f(t)$; λ_M и λ_I - коэффициенты перегрузочной способности электродвигателя соответственно по моменту и току.

Величины λ_M и λ_I принимаются по каталожным данным предварительно выбранного двигателя. Примерные значения λ_M для двигателей мощностью до 100 кВт при номинальной скорости приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Перегрузочная способность электродвигателей по моменту

| Тип двигателей | Перегрузочная способность λ_M |
|---|---------------------------------------|
| Длительного режима работы с параллельным, последовательным или смешанным возбуждением | Не менее 2,5 |
| Краново-металлургические: | |
| параллельного возбуждения | 2,5 |
| последовательного возбуждения | 4,0 |
| смешанного возбуждения | 3,5 |
| асинхронные | Не ниже 2,3 |
| Асинхронные длительного режима работы | 1,7...2,2 |
| Синхронные " " " | 2,5...3,0 |

Перегрузочная способность асинхронных двигателей ограничена значением критического момента M_k . Поскольку значение момента этих двигателей пропорционально квадрату напряжения сети, то при проверке двигателей на перегрузку следует принимать в расчетах $0,8 \lambda_M$, учитывая возможное снижение напряжения сети до $0,9 U_N$.

В табл. 1.2 указаны примерные значения перегрузочной способности λ_I для двигателей постоянного тока.

Таблица 1.2

Перегрузочная способность электродвигателей по току

| Тип двигателей | Скорость | | |
|---------------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| | $\omega = 0$ | $\omega = \omega_n$ | $\omega = 2\omega_n$ |
| Длительного режима работы | 2,5...3,0 | 2,5 | 1,6...2,0 |
| Краново-металлургические | 3,6 | 3,0 | 1,5 |

Наибольшая допустимая температура двигателя ограничивается термической стойкостью его изоляции, которая является самым ответственным элементом электрической машины, определяющим срок ее службы.

Электродвигатели могут работать при различной температуре окружающей среды. ГОСТ-183-74 устанавливает, что номинальные данные всех электрических машин относятся к температуре окружающей среды +40 °С. Установлены также максимально допустимые перегревы изоляции ($\tau_{доп}$) над температурой окружающей среды +40 °С /табл.1.3/.

Таблица 1.3

Допустимые перегревы изоляции электрических машин

| Метод измерения температуры | Допустимая температура перегрева для различных классов изоляции, °С | | | | |
|-----------------------------|---|----|----|-----|-----|
| | A | E | B | F | H |
| Термометра | 50 | 65 | 70 | 85 | 105 |
| Сопротивления | 60 | 75 | 80 | 100 | 125 |

В общем случае температура окружающей среды отличается от стандартной /+40 °С/, соответственно изменяется и значение допустимого перегрева изоляции:

$$\tau_{доп} = \tau_{из.доп} - \tau_{ср} \quad /1.2/$$

где $\tau_{из.доп}$ - допустимая температура нагрева изоляции по табл.1.3; $\tau_{ср}$ - температура окружающей среды.

При выборе мощности электродвигателя необходимо учитывать отклонение фактической температуры окружающей среды от стандартного значения. Для этого в расчет вводится соответствующая поправка, как это будет показано далее.

Если электропривод устанавливается на значительной высоте над уровнем моря, то из-за разреженности воздуха теплоотдача двигателя уменьшается, снижается фактическая мощность, развиваемая электроприводом. В связи с этим рекомендуется увеличивать расчетную мощность электропривода на 1% для каждых 100 м превышения высоты установки над 1000 м. Например, при установке электропривода на высоте 3000 м его расчетная мощность должна быть увеличена на 20%.

1.2. Оптимальное передаточное число редуктора

При выборе оптимального передаточного числа редуктора для электропривода необходимо правильно выбрать критерий оптимальности, исходя из режима работы установки.

При продолжительном режиме работы изменение передаточного числа редуктора /и соответственно скорости двигателя/ влияет на стоимость двигателя и редуктора. С увеличением передаточного числа редуктора i увеличивается его стоимость /рис.1.1/, а стоимость двигателя уменьшается, так как возможно применение двигателя с большей номинальной скоростью и меньшим объемом активных материалов при неизменной мощности. Вблизи точки пересечения кривых стоимости двигателя и редуктора имеется значение передаточного числа для типового редуктора и серийного двигателя с конкретным значением номинальной скорости, такой выбор передаточного числа определяет минимальную суммарную стоимость редуктора и двигателя.

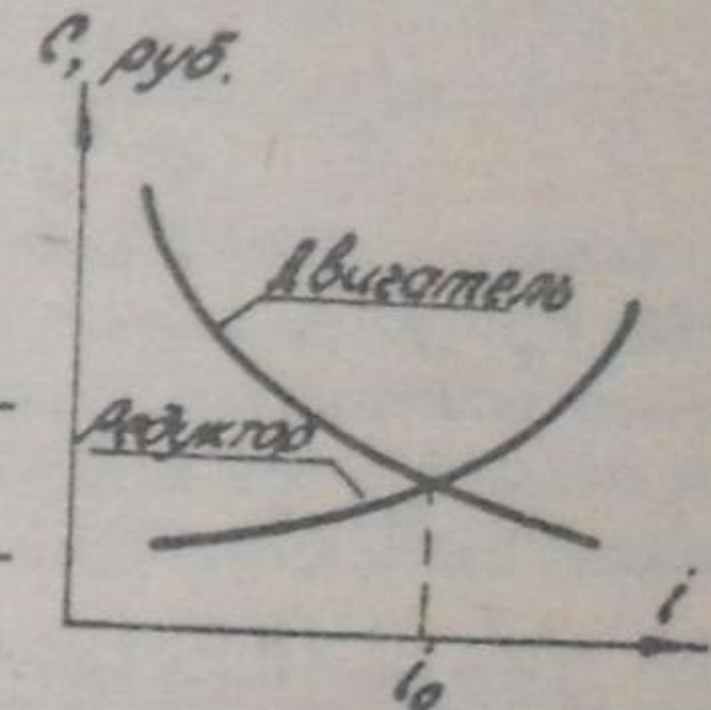


Рис.1.1. Зависимость стоимости электродвигателя и редуктора от передаточного числа

При повторно-кратковременном режиме работы электропривода, особенно при большом числе включений в час, производительность механизма существенно зависит от продолжительности пуска и торможения. В данном случае критерием оптимальности при выборе передаточного числа редуктора является минимум времени пуска и торможения [1; 2].

При заданной скорости механизма ω_n можно выбрать электродвигатель с различной скоростью ω . При этом изменение передаточного числа $i = \omega/\omega_n$ будет влиять на условия пуска и торможения электропривода.

Рассмотрим выбор оптимального передаточного числа, считая заданными и не зависящими от скорости моменты инерции на валу электродвигателя

и на валу механизма (J_A и J_M), момент статического сопротивления на валу механизма M_C и вращающий момент на валу электродвигателя M_A . Эти исходные данные справедливы для механизмов с постоянным моментом сопротивления, электродвигателей с многоступенчатым реостатным пуском, асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с двойной беличьей клеткой, а также для современных систем электропривода, оснащенных регуляторами для стабилизации тока /момента/ при пуске и торможении.

Уравнение движения рабочего вала механизма при пуске может быть записано следующим образом:

$$\eta M_A i - M_{CM} = (J_A i^2 + J_M) \frac{d\omega_M}{dt}, \quad /1.3/$$

где η - КПД передач.

Время пуска механизма, найденное из /1.3/,

$$t_n = \frac{J_A i^2 + J_M}{\eta M_A i - M_{CM}} \omega_M, \quad /1.4/$$

Выражение /1.4/ хорошо иллюстрирует экстремальный характер зависимости $t_n = f(i)$. Рассматривая t_n как явную функцию i и полагая остальные величины постоянными, можно найти такое оптимальное передаточное число i_{01} , при котором время пуска будет минимальным. Для этого необходимо взять производную $\frac{dt_n}{di}$ и приравнять ее к нулю:

$$\frac{dt_n}{di} = \frac{2J_A i_{01} (\eta M_A i_{01} - M_{CM}) - \eta M_A (J_A i_{01}^2 + J_M)}{(\eta M_A i_{01} - M_{CM})^2} \omega_M = 0. \quad /1.5/$$

После решения получаемого из числителя /1.5/ квадратного уравнения запишем

$$i_{01} = \frac{M_{CM}}{\eta M_A} + \sqrt{\left(\frac{M_{CM}}{\eta M_A}\right)^2 + \frac{J_M}{J_A}}. \quad /1.6/$$

Решение аналогичной задачи для определения i_{02} , обеспечивающего минимальное время торможения, приводит к следующему результату:

$$i_{02} = -\frac{\eta M_{CM}}{M_A} + \sqrt{\left(\frac{\eta M_{CM}}{M_A}\right)^2 + \frac{J_M}{J_A}}. \quad /1.7/$$

Знак "-" перед радикалами в /1.6/ и /1.7/ отброшен, так как передаточное число может иметь только положительное значение.

При треугольной тахограмме работы электропривода оптимальное передаточное число i_0 , обеспечивающее минимальное время пуска и торможения, приближенно может быть найдено как среднеарифметическое значение i_{01} и i_{02} :

$$i_0 \approx \frac{i_{01} + i_{02}}{2}. \quad /1.8/$$

Более точное значение i_0 , усредненное по времени, может быть найдено в том случае, если известно время пуска и торможения:

$$i_0 \approx \frac{i_{01} t_n + i_{02} t_r}{t_n + t_r}. \quad /1.9/$$

Для электропривода с относительно небольшой статической нагрузкой и значительными инерционными массами величиной M_C можно пренебречь и определять i_0 по упрощенной формуле:

$$i_0 \approx \sqrt{\frac{J_M}{J_A}}. \quad /1.10/$$

Полученные зависимости для определения i_0 имеют тот недостаток, что в них входят величины M_A и J_A , заранее известные, т.е. оптимальное передаточное число не выбирается, а проверяется для предварительно выбранного электродвигателя. Различным электродвигателям, выбранным для одного и того же механизма, будут соответствовать разные оптимальные передаточные числа редуктора.

Как уже указывалось, определение i_0 для механизмов с частыми пусками имеет первостепенное значение. Однако в силу различных особенностей тех или иных механизмов приходится отступать от расчетного значения i_0 . Например, для электропривода роликана нельзя выбирать такое i_0 и соответственно такое ускорение механизма, при котором слиток будет проскальзывать по роликам.

Практика расчета электроприводов показывает, что допустимы известные отклонения от расчетного i_0 без существенного увеличения продолжительности переходного процесса. Чтобы оценить значение допустимых отклонений, необходимо определить, насколько изменится ускорение $\frac{d\omega_M}{dt}$ механизма при различных передаточных числах редуктора. Для конкретных значений M_A, M_C, J_A и J_M по /1.3/ нужно построить зависимость $d\omega_M/dt = f(i)$.

На рис. 1.2 показана такая функция, рассчитанная для электропривода нажимного устройства обжимной клетки рельсобалочного стана с двумя электродвигателями постоянного тока / $P_H = 100$ кВт, $E_H = 0,25$ В, $U_H = 220$ В, $n_H = 475$ об/мин, $J_A = 25,1$ Дж.с⁻²/.

Величины, входящие в расчетное уравнение /1.3/, имеют следующие значения: $M_A = 6867$ Н.м, $M_C = 4709$ Н.м, $J_M = 26$ Дж.с². В результате расчета получено максимальное ускорение $(\frac{d\omega_M}{dt})_{max} = 31,5$ 1/с² и соответствующее ему $i_0 = 1,75$.

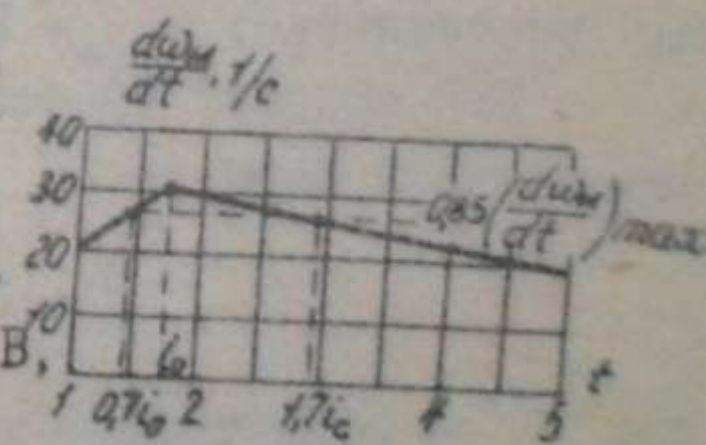


Рис. 1.2. Зависимость ускорения механизма от передаточного числа редуктора

Согласно кривой на рис. 1.2 видно, что отклонения от i_0 в сторону увеличения последнего возможны значительно большие, чем в сторону уменьшения. Изменение передаточного числа в пределах /0,7...1,7/ вызывает уменьшение ускорения только на 15%.

Расчетное определение приближает проектировщика к окончательному решению вопроса о выборе передаточного числа редуктора. Возможные отклонения от расчетного i_0 определяют в каждом отдельном случае в зависимости от конкретных технико-экономических соображений.

1.3. Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы

Большое число производственных механизмов работает в продолжительном режиме /режим S1 по ГОСТ-183-74/ с неизменной или с малоизменяющейся нагрузкой и без регулирования скорости. Примерами таких механизмов могут служить вентиляторы, насосы, конвейеры и т.п. В этом случае выполняется расчет мощности, потребляемой рабочей машиной, и по каталогу выбирается ближайший больший по мощности двигатель. В необходимых случаях вносятся поправка, учитывающая изменение температуры окружающей среды. В режиме S1 двигатель работает с редкими пусками, поэтому пусковые потери на учитываются при расчете мощности двигателя, проверяется только достаточность пускового момента, развиваемого двигателем [1; 2].

Например, расчетная мощность двигателя для привода вентилятора, кВт:

$$P = \frac{V k 10^{-3}}{\eta_v \eta_{пер}}, \quad /1.11/$$

где V - производительность вентилятора, м³/с; k - напор, Н/м²; η_v - КПД вентилятора; $\eta_{пер}$ - КПД передач между двигателем и вентилятором.

Для привода насоса расчетная мощность двигателя определяется по аналогичной формуле:

$$P = \frac{V \rho H g 10^{-3}}{\eta_{нас} \eta_{пер}}, \quad /1.12/$$

где V - подача насоса, м³/с; ρ - плотность перекачиваемой жидкосты, кг/м³; H - расчетная высота подъема жидкости /включая высоту всасывания, м; $\eta_{нас}$ - КПД насоса; $g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с².

Если температура окружающей среды отличается от стандартной /40 °С/, то рассчитанная по условиям статической нагрузки мощность будет либо недостаточной, либо избыточной. В этом случае следует

внести в расчет поправку, учитывающую реальные условия работы двигателя.

При номинальной нагрузке двигателя и стандартной температуре окружающей среды установившийся перегрев машины равен допустимому значению:

$$\tau_{уст} = \tau_{доп} = \frac{Q_n}{A} = \frac{\dot{Q}_{пост} + \dot{Q}_{пер.ном}}{A} = \frac{\dot{Q}_{пер.ном}}{A} (a+1), \quad /1.13/$$

где Q_n - номинальные потери в двигателе за единицу времени, Дж/с; $\dot{Q}_{пост}$ - постоянные потери, не зависящие от нагрузки /потери на трение о воздух и трение в подшипниках, потери в стали/, Дж/с; $\dot{Q}_{пер.ном}$ - переменные потери в меди обмоток при номинальной нагрузке, Дж/с;

$a = \frac{\dot{Q}_{пост}}{\dot{Q}_{пер.ном}}$ - отношение постоянных потерь к номинальному значению переменных потерь /коэффициент потерь/; A - теплоотдача электрической машины, т.е. количество теплоты, рассеиваемое ее поверхностью в 1 с при разности температур машины и окружающей среды 1 °С, Дж/(°С·с).

Примерные значения коэффициентов потерь для различных электродвигателей при номинальной нагрузке указаны в табл. 1.4.

Таблица 1.4
Коэффициенты потерь для электродвигателей

| Тип двигателей | Двигатели | | |
|-------------------|--|-----------------------------------|-----|
| | тихоходные /n < 1000 об/мин/ | быстроходные /n > 1000 об/мин/ | |
| Постоянного тока: | | | |
| | параллельного возбуждения | 1,0 | 1,5 |
| | последовательного возбуждения | 0,5 | 0,9 |
| Асинхронные: | общего назначения с КЗ ротором | 0,5 | 0,7 |
| | краново-металлургические с КЗ ротором* | 0,4...0,5 | - |
| | краново-металлургические: | | |
| | 1-У1 габаритов | 0,45...0,6 | - |
| | УП габарита | 0,9...1,0 | - |
| Синхронные | 1,0 | 2,0 | |

* Меньшие значения коэффициента относятся к двигателям меньшей мощности.

Если температура окружающей среды отличается от стандартной на $\pm \Delta T$, то неизменное значение допустимого нагрева изоляции будет получено при новом значении допустимого перегрева, который соответствует работе двигателя с мощностью и потерями, отличающимися от номинальных, а именно:

$$\tau_{доп} \pm \Delta T = \frac{Q}{A} = \frac{Q_{пост} + Q_{пер}}{A} \quad /1.14/$$

В данном случае ток двигателя отличается от номинального ($I = \chi I_n$), а переменные потери $Q_{пер} = \chi^2 Q_{пер.ном}$. Соотношение /1.14/ для продолжительного режима работы может быть записано так:

$$\tau_{доп} \pm \Delta T = \frac{Q_{пост} + \chi^2 Q_{пер.ном}}{A} = \frac{Q_{пер.ном}}{A} (\alpha + \chi^2), \quad /1.15/$$

где χ - коэффициент загрузки двигателя по току при отклонении температуры окружающей среды от стандартной.

Разделив /1.15/ на /1.13/, получим

$$\frac{\tau_{доп} \pm \Delta T}{\tau_{доп}} = \frac{\alpha + \chi^2}{\alpha + 1}, \quad /1.16/$$

откуда

$$\chi = \sqrt{1 \pm \frac{\Delta T}{\tau_{доп}} (\alpha + 1)}. \quad /1.17/$$

Мощность двигателя с поправкой на изменение температуры окружающей среды

$$P = \chi P_n. \quad /1.18/$$

При вычислении коэффициента χ по /1.17/ необходимо брать знак "+" под радикалом в том случае, если температура окружающей среды на ΔT меньше стандартной. Тогда $\chi > 1$. В противном случае /повышение температуры окружающей среды/ $\chi < 1$. При $\Delta T = 0$ коэффициент $\chi = 1$.

Важность введения указанной поправки проиллюстрируем следующим примером.

Если $\alpha = 2$ /быстроходная синхронная машина/, $\tau_{доп} = 65$ °C /изоляция класса/ и $\Delta T = 16$ °C /перегрев в машинном зале прокатного цеха/, то $\chi \approx 0,5$. В этом случае только половина номинальной мощности двигателя расходуется на преодоление полезной нагрузки, а половина - на потери холостого хода.

Поправка на изменение температуры окружающей среды должна быть учтена при расчетах мощности двигателей, работающих не только в режиме *S1*, но и в других режимах.

1.4. Выбор мощности двигателя при перемежающихся режимах работы

В тех случаях, когда электропривод работает в продолжительных режимах с переменной нагрузкой /так называемые перемежающиеся режимы *S6...S8*/, мощность электродвигателя определяется в следующем порядке. Для заданного режима работы механизма предварительно выбирают электродвигатель по статической нагрузке или по данным аналогичных установок. Затем строят ступенчатую нагрузочную диаграмму $P_i = f(t)$ с учетом параметров выбранного электродвигателя /рис.1.3/, по которой рассчитывают требуемую мощность и сопоставляют ее с мощностью предварительно выбранного электродвигателя. Таким образом, расчет сводится к проверке предварительно выбранного электродвигателя на термическую устойчивость, которая может быть выполнена различными методами.

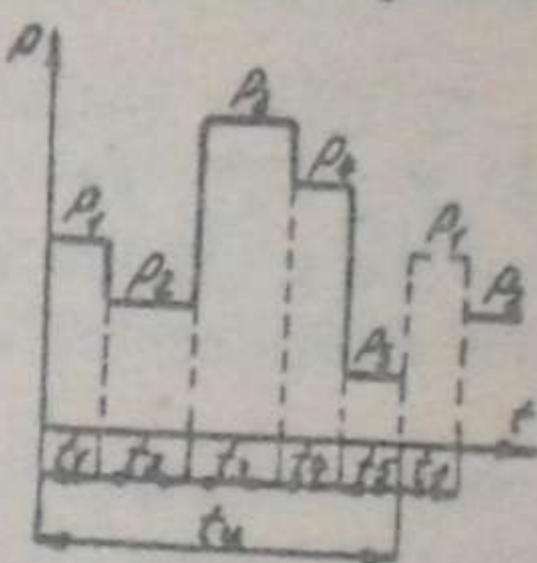


Рис.1.3. График циклической ступенчатой нагрузки

1.4.1. Метод средних потерь

Сущность метода заключается в определении средних потерь в двигателе при продолжительной переменной нагрузке $Q_{ср}$ и сопоставлении их с потерями при длительной номинальной нагрузке Q_n . При $Q_{ср} = Q_n$ установившийся перегрев двигателя равен максимально допустимому перегреву, т.е. предварительный выбор двигателя сделан правильно.

Рассмотрим порядок выбора и проверки двигателя по методу средних потерь применительно к графику циклической ступенчатой нагрузки на рис.1.3. Для наиболее часто встречающихся на практике графиков нагрузки предварительно выбирают электродвигатель мощностью

$$P_n = (1,1 - 1,3) P_{ср}, \quad /1.19/$$

где $P_{ср}$ - средняя мощность, определяемая из графика нагрузки.

Далее определяют потери в выбранном электродвигателе соответственно для каждого участка графика нагрузки:

$$Q_x = P_x \frac{1 - \eta_x}{\eta_x}. \quad /1.20/$$

Здесь P_x - мощность на валу электродвигателя; η_x - КПД электродвигателя при данной нагрузке.

Средние потери за период цикла нагрузки

$$Q_{cp} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n}{t_n} \quad /1.21/$$

Величина средних потерь сравнивается с номинальными потерями электродвигателя, определяемыми следующим образом:

$$Q_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \quad /1.22/$$

Правильно выбранный электродвигатель должен удовлетворять условию $Q_{cp} \leq Q_n$. Для расчета потерь необходима кривая КПД электродвигателя при различной нагрузке: $\eta_x = f(P_x)$. При отсутствии этой кривой в каталоге ее можно построить с использованием формулы [1]

$$\eta_x = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1\right) \frac{\alpha/x + \chi}{\alpha + 1}} \quad /1.23/$$

где χ и α - коэффициент соответственно нагрузки электродвигателя по току и потерь в электродвигателе /см. табл. 1.4/.

Средние потери по /1.21/ определяют для электродвигателей с самовентиляцией, работающих с постоянной частотой вращения, близкой к номинальной, а также для электродвигателей с принудительной вентиляцией. При использовании метода средних потерь для расчета мощности электродвигателей с самовентиляцией, работающих с переменной частотой вращения /периоды пуска, торможения, пауз/, в /1.21/ необходимо внести поправки, учитывающие влияние ухудшения условий вентиляции машины, так как уменьшается теплоотдача в окружающую среду и увеличивается нагрев двигателя, а также поправочный коэффициент $\beta = A_0/A$ - коэффициент ухудшения условий охлаждения двигателя в периоды пауз, равный отношению теплоотдачи неподвижного двигателя к его теплоотдаче при вращении с номинальной частотой. Средние потери с учетом поправочного коэффициента будут

$$Q_{cp} = \frac{Q_n t_n + Q_y t_y + Q_r t_r}{\frac{1 + \beta}{2} (t_n + t_r) + t_y + \beta t_0} \quad /1.24/$$

где Q_n, Q_y и Q_r - потери соответственно при пуске, установившемся движении и торможении; t_n, t_y, t_r и t_0 - продолжительность периода соответственно пуска, установившегося движения, торможения и отключения /паузы/.

Коэффициент β для двигателей с различными способами вентиляции имеет следующие значения:

для закрытых электродвигателей

| | |
|--|----------------|
| без искусственного охлаждения | - 0,95...0,98; |
| с независимой вентиляцией | - 0,9...1,0; |
| с наружным охлаждением от собственного вентилятора | - 0,45...0,55; |

для защищенных электродвигателей с самовентиляцией внутренних пространств от собственного вентилятора $\beta = 0,25...0,35$.

Для построения графика потерь в периоды пуска и торможения следует учесть также потери при этих неустановившихся режимах работы. Расчет потерь энергии при пуске и торможении и вывод соответствующих расчетных формул достаточно подробно изложен в [1].

В табл. 1.5 приведены формулы для определения пусковых и тормозных потерь в цепи якоря электродвигателей постоянного тока параллельного возбуждения и в цепи ротора асинхронных электродвигателей. Они получены для случая работы электродвигателя холостую ($M_c = 0$) при постоянном напряжении питающей сети. Потери в стали и механические потери не учтены, так как они значительно меньше потерь в меди в периоды пуска и торможения.

Приведенные в табл. 1.5 формулы не позволяют определить потери в обмотке якоря /ротора/, последовательно с которой включено пусковое или тормозное сопротивление. Они дают представление лишь о суммарных потерях в цепи якоря /ротора/. Эти формулы могут быть использованы для практических расчетов только при определении потерь в роторе асинхронного короткозамкнутого электродвигателя.

Таблица 1.5

Расчетные формулы для определения потерь при пуске и торможении

| Режим работы двигателя | Пределы изменения частоты вращения | | Расчетная формула для определения потерь A_0 . Дж |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---|
| | от | до | |
| Пуск | $\omega_1 = 0$ | $\omega_2 \approx \omega_0$ | $J \frac{\omega_0^2}{2}$ |
| Динамическое торможение | ω_1 | $\omega_2 = 0$ | $J \frac{\omega_1^2}{2}$ |
| Торможение противовключением | $\omega_1 \approx \omega_0$ | $\omega_2 = 0$ | $\frac{3}{2} J \omega^2$ |

Потери в меди статора асинхронного электродвигателя для любого режима работы могут быть определены через соответствующие потери в цепи ротора:

$$A_{ст} = A_p \frac{r_1}{r_2} = A_p \left(\frac{E_{20}}{U_1} \right)^2 \frac{r_1}{r_2}, \quad /1.23/$$

где A_p - потери в цепи ротора; r_1 и r_2 - активные сопротивления фазы обмоток ротора и статора; E_{20} - ЭДС, индуцируемая в неподвижном роторе; U_1 - линейное напряжение питающей сети.

Таким образом, полные потери в цепях асинхронного электродвигателя при переходном процессе

$$A = A_p + A_{ст} = A_p \left(1 + \frac{r_1}{r_2} \right) = A_p \left[1 + \left(\frac{E_{20}}{U_1} \right)^2 \frac{r_1}{r_2} \right]. \quad /1.24/$$

Расчет потерь по /1.24/ используется при определении допустимого числа включений электродвигателя в час.

1.4.2. Метод эквивалентных величин

Метод средних потерь, несмотря на свою точность, не нашел широкого применения из-за громоздкости расчетов, выполнение которых требует подробных данных для определения потерь в электродвигателе при различных нагрузках.

Широкое распространение для практических расчетов получил метод эквивалентных величин, позволяющий с достаточной точностью определить мощность электродвигателя без подробного вычисления потерь в нем.

Метод эквивалентного тока непосредственно вытекает из метода средних потерь. Потери в электродвигателе, соответствующие каждому участку графика непрерывной работы с переменной нагрузкой, могут быть выражены как сумма постоянных и переменных потерь, пропорциональных квадрату тока нагрузки:

$$q_x = q_{пост} + q_{пер} = q_{пост} + \nu I_x^2. \quad /1.25/$$

Средние потери в электродвигателе за цикл, выраженные аналогичным образом,

$$q_{ср} = q_{пост} + \nu I_э^2. \quad /1.26/$$

Используя /1.21/ и подставив в него значения потерь для отдельных участков графика согласно /1.25/, получим

$$q_{ср} = q_{пост} + \nu I_э^2 = \frac{(q_{пост} + \nu I_1^2)t_1 + \dots + (q_{пост} + \nu I_n^2)t_n}{t_ч}, \quad /1.27/$$

Формула /1.27/ показывает, что график работы с переменной нагрузкой может быть заменен расчетным графиком с постоянной нагрузкой, при которой в электродвигателе будет протекать так называемый эквивалентный ток $I_э$, создающий те же самые средние потери $q_{ср}$, что и при реальном графике с переменной нагрузкой. Решив /1.27/ относительно $I_э$ и выполнив ряд преобразований, запишем

$$I_э = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_ч}}. \quad /1.28/$$

В знаменатель /1.27/ входит время цикла с учетом пауз, если они имеются. Поэтому постоянные потери эквивалентного длительного режима /без пауз/ будут больше постоянных потерь при фактическом режиме работы /с паузами/. При выводе /1.28/ сделано допущение о равенстве величины $q_{пост}$ в левой и правой частях /1.27/, что вносит в расчет некоторую погрешность. Получаемое по /1.28/ значение несколько меньше, чем ток эквивалентного длительного режима работы, что, однако, в большинстве случаев не имеет существенного значения для практических расчетов. Эквивалентный ток $I_э$ - среднеквадратичный ток данного режима работы электродвигателя.

Для обеспечения работы электродвигателя без перегрева необходимо, чтобы номинальный ток предварительно выбранного по каталогу электродвигателя был равен эквивалентному току или больше его, т.е. $I_n \geq I_э$.

В общем случае график нагрузки не является ступенчатым, как это полагалось при изложении метода средних потерь и метода эквивалентного тока, а представляется в виде непрерывной функции $I = f(t)$. Поэтому в общем случае для обеспечения работы двигателя без перегрева должно быть выдержано условие

$$I_n \geq I_э = \sqrt{\frac{1}{t_ч} \int_0^{t_ч} i^2 dt}. \quad /1.29/$$

Для выполнения практических расчетов по определению $I_э$ непрерывную функцию $i = f(t)$ следует заменить ступенчатым графиком таким образом, чтобы этот график охватывал ту же площадь, что и действительная непрерывная функция. Это внесет заметную погрешность в расчет для графиков с большими пиками нагрузки. В подобных случаях следует заменить реальный график кусочно-линейной функцией, близко совпадающей с реальной кривой, как это показано на рис.1.4.

Если ток изменяется по трапецеидальному закону /например, участок t_2 на рис.1.4/

$$i = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{t_2} t, \quad /1.30/$$

то эквивалентное значение тока для этого участка согласно /1.29/ выразится следующим образом:

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} i^2 dt}. \quad /1.31/$$

Из /1.30/ находим

$$dt = \frac{t_2}{I_2 - I_1} di.$$

Подставив значение dt в /1.31/, после преобразований получим

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}}. \quad /1.32/$$

Эквивалентное значение тока треугольного графика может быть получено из /1.32/, если принять равным нулю одно из оснований трапеции. В этом случае, например при $I_1 = 0$,

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_2^2}{3}}. \quad /1.33/$$

Если на отдельных участках графика электродвигатель работает с уменьшенной частотой вращения, то как и при расчете по методу средних потерь, необходимо учитывать ухудшение условий охлаждения электродвигателя введением в расчетную формулу /1.28/ поправочного коэффициента β /см. п.1.4.1/.

Недостаток метода эквивалентного тока - необходимость в расчете кривой $i = f(t)$ для предварительно выбранного электродвигателя.

Метод эквивалентного тока применим для определения мощности электродвигателя почти во всех случаях, кроме тех, когда необходимо учитывать изменение "постоянных" потерь. Нельзя применять этот метод также и для короткозамкнутых асинхронных электродвигателей с глубокими пазами или с двойной клеткой, так как сопротивление роторной цепи этих электродвигателей значительно изменяется при пусках и торможениях.

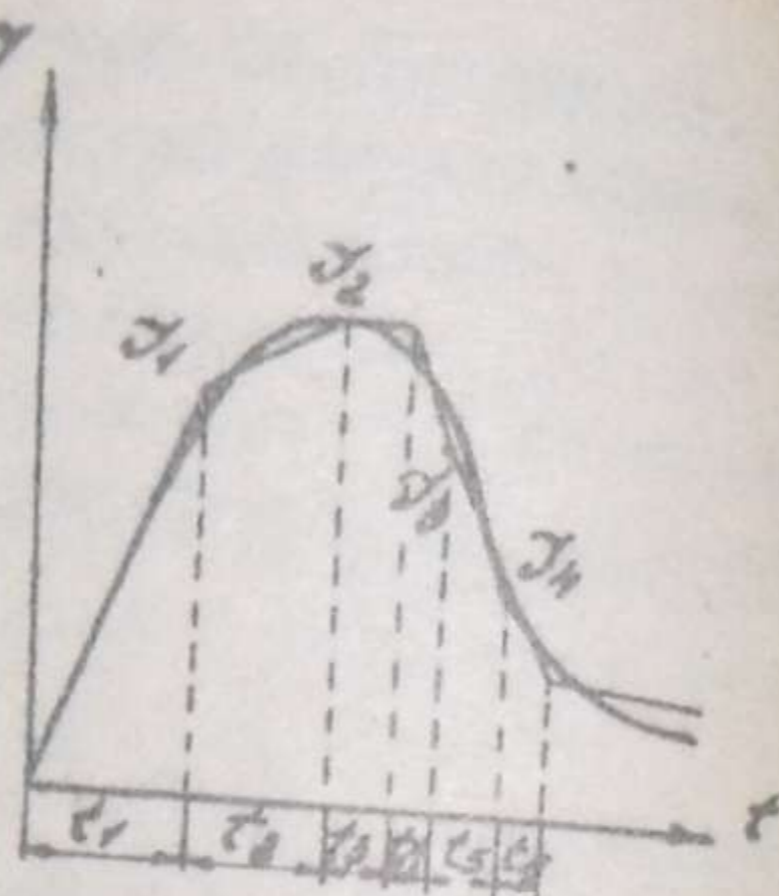


Рис.1.4. Замена функции $I = f(t)$ эквивалентным и кусочно-линейным и ступенчатым графиками

Во всех этих случаях следует применять расчетные методы, основанные на непосредственном определении потерь.

Метод эквивалентного момента позволяет проверить нагрев предварительно выбранного электродвигателя непосредственно по его нагрузочной диаграмме. Для электродвигателей, работающих с постоянным магнитным потоком, момент пропорционален току. Так, для электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением $M = c\Phi I_a$. Для асинхронных электродвигателей с фазным ротором $M = k\Phi I_2 \cos \varphi_2$ /здесь φ_2 - угол сдвига между вектором магнитного потока Φ и вектором тока ротора I_2 /. Коэффициент мощности $\cos \varphi_2 \neq const$ изменяется в зависимости от загрузки электродвигателя. При нагрузке, близкой к номинальной, $\cos \varphi_2$ приближенно может быть принято постоянным и, следовательно, $M = k' I_2^2$. Учитывая пропорциональность момента и тока, /1.28/ можно преобразовать для определения эквивалентного момента, а именно:

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_n}}. \quad /1.34/$$

Если момент не пропорционален току, то /1.34/ пользоваться нельзя /например, для электродвигателей последовательного возбуждения, асинхронных короткозамкнутых электродвигателей в пусковых и тормозных режимах/. Этот метод неприменим также во всех тех случаях, когда невозможно использование метода эквивалентного тока.

Таким образом, метод эквивалентного момента применяется для электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением и для асинхронных электродвигателей с фазным ротором, работающих при нагрузках, близких к номинальным.

Если электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения работает с ослаблением магнитного потока, то в нагрузочную диаграмму следует внести поправки, учитывающие возникающее при этом изменение тока якоря. На рис.1.5 показана тахограмма работы электродвигателя и соответствующий ей график моментов. При разгоне электродвигателя в интервале скоростей $\omega_n \dots \omega_{max}$ ток якоря увеличивается пропорционально ослаблению магнитного потока. Так как при этом пусковой момент электродвигателя $M_n = const$ при любой скорости, то

$$M_n = c\Phi I_a = c\Phi' I_a'$$

откуда $I_a' = I_a \frac{\Phi_n}{\Phi'}$

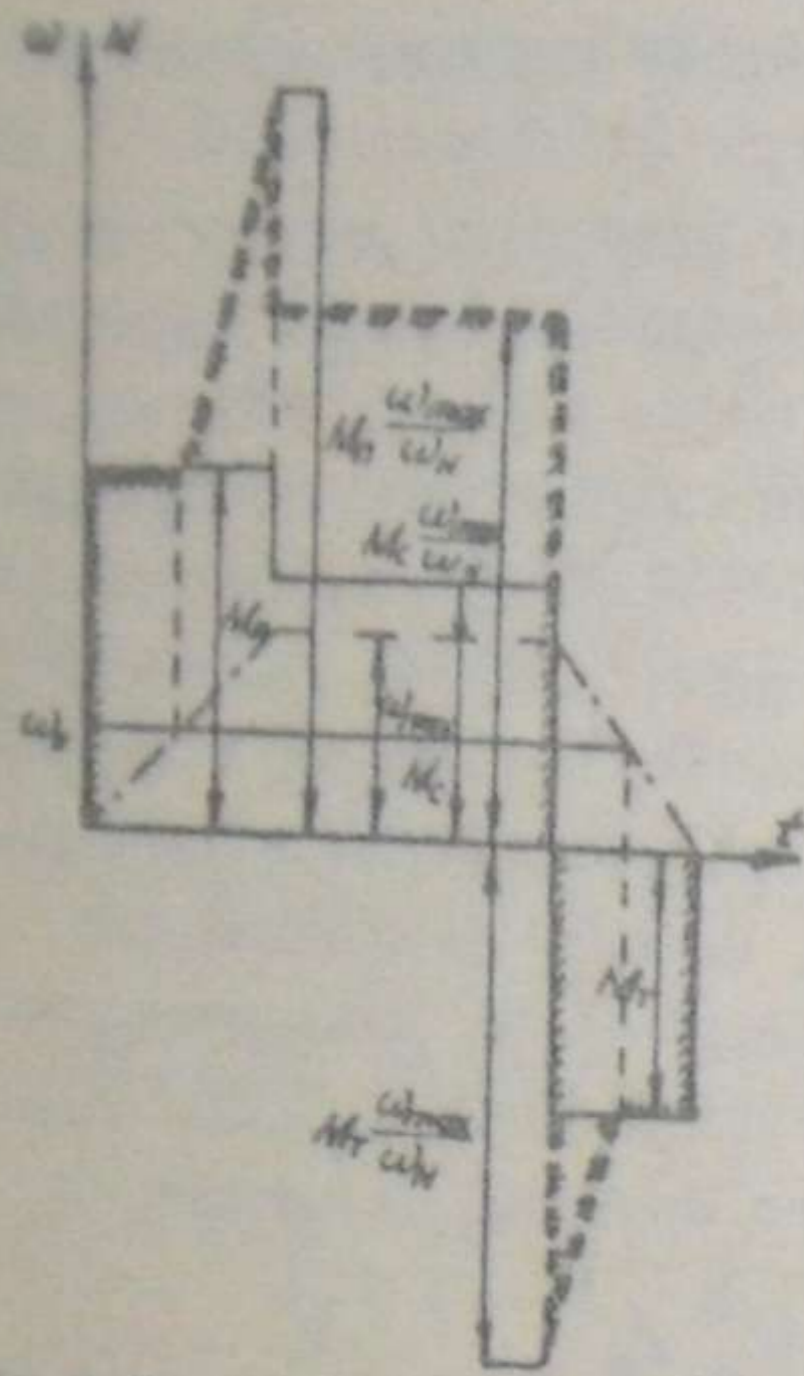


Рис. 1.5. Корректирование нагрузочной диаграммы с независимым возбуждением при ослабленном магнитном потоке

рис. 1.5 пунктиром. График моментов, используемый для определения M_3 , ограничен штриховкой.

Метод эквивалентной мощности применяется для выбора электродвигателя, работающего с малоизменяющейся скоростью ($\omega = const$). При этом мощность электродвигателя $P = M\omega$ будет пропорциональна моменту. Эквивалентная мощность

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_n}} \quad /1.36/$$

Метод эквивалентной мощности нельзя использовать в тех случаях, когда неприменимы методы эквивалентного тока и эквивалентного момента, а также в случае работы электродвигателя с резким изменением скорости /пуск, торможение/. Изменение мощности в пусковых и тормозных режимах, даже при постоянном моменте, не отражает условий нагрева электродвигателя, что может внести в расчет существенную погрешность.

При расчетах методами эквивалентных величин, так же как при расчете методом средних потерь, необходимо вводить поправки на изменение температуры окружающей среды и на ухудшение условий охлаждения двигателя при пусках и торможениях.

Если пренебречь незначительным падением напряжения в цепи якоря и принять $U_N \approx E_N = C\Phi_N \omega_N$ и соответственно $U_N \approx C\Phi \omega_{max}$, то получим

$$I'_я = I_я \frac{\omega_{max}}{\omega_N}$$

Для того чтобы график моментов отражал изменение тока якоря и, следовательно, точнее учитывал нагрев электродвигателя, ординаты моментов на участках работы с ослабленным магнитным потоком необходимо увеличить пропорционально увеличению скорости электродвигателя, т.е. в расчетную формулу для определения M_3 ввести величины, определяемые по соотношению

$$M_{расч} = M_{факт} \frac{\omega_{max}}{\omega_N} \quad /1.35/$$

Скорректированные таким образом участки графика моментов показаны на рис. 1.5 пунктиром. График моментов, используемый для определения M_3 , ограничен штриховкой.

1.5. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы

Для правильного использования электродвигателя при кратковременном режиме работы /режим S2/ необходимо, чтобы за время включения его перегрев достиг допустимого для соответствующего класса изоляции значения. При использовании для кратковременной работы электродвигателей продолжительного режима необходимо обеспечить такую их перегрузку, чтобы перегрев за время включения t_x был бы равен допустимому перегреву $\tau_{доп}$ /рис. 1.6/.

Отношение потерь в электродвигателе при кратковременной перегрузке к номинальным потерям называется коэффициентом тепловой перегрузки

$$P_r = \frac{P_x}{P_N} \quad /1.37/$$

При продолжительном режиме работы с номинальной нагрузкой перегрев электродвигателя достигает предельно допустимой для данного класса изоляции величины:

$$\tau_{доп} = \frac{P_N}{A} \quad /1.38/$$

При кратковременной работе электродвигателя продолжительного режима за время t_x должен быть достигнут тот же предельно допустимый перегрев:

$$\tau_{доп} = \frac{P_x}{A} (1 - e^{-\frac{t_x}{T}}) \quad /1.39/$$

где T - постоянная времени нагрева.

Из /1.38/ и /1.39/ можно найти соотношение для определения t_x в зависимости от тепловой перегрузки. Приравняв эти выражения и решив их относительно t_x , получим

$$t_x = T \ln \frac{P_r}{P_r - 1} \quad /1.40/$$

Зависимость $P_r = f\left(\frac{t_x}{T}\right)$ показана на рис. 1.7.

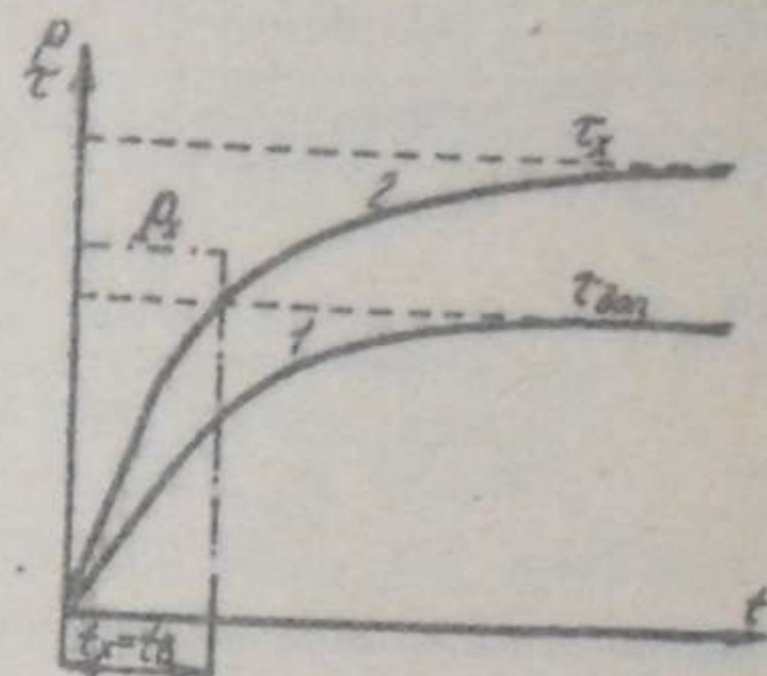


Рис. 1.6. Кривые перегрева при длительном и кратковременном режимах работы двигателя: 1 - при длительной работе с номинальной нагрузкой; 2 - при кратковременной работе с перегрузкой

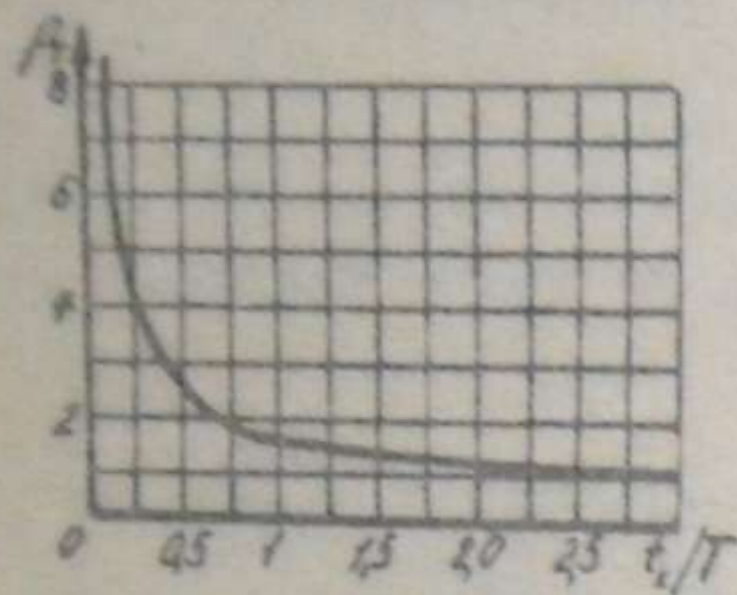


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента тепловой перегрузки от отношения t_x/T

Мощность электродвигателя при кратковременном режиме работы выбирают в такой последовательности [2]:

1. На основании нагрузочной диаграммы предварительно выбирают электродвигатель, мощность которого должна быть меньше максимального пика нагрузки.

2. Для выбранного электродвигателя определяют номинальные потери q_n и потери q_x , соответствующие максимальной кратковременной нагрузке P_x , а именно:

$$q_x = P_x \left(\frac{1 - \eta_x}{\eta_x} \right)$$

3. Согласно найденным значениям потерь вычисляют коэффициент тепловой перегрузки P_T по /1.37/.

4. По кривой $P_T = f\left(\frac{t_x}{T}\right)$ или по /1.40/ рассчитывают величину $\frac{t_x}{T}$ для найденного значения P_T .

5. Для известного значения постоянной времени нагрева находят допустимое время t_x кратковременной работы электродвигателя. Полученное таким образом значение сравнивают с фактическим временем включения t_x , заданным нагрузочной диаграммой. Для правильно выбранного электродвигателя необходимо, чтобы $t_x \geq t_0$ /см. рис. 1.6/. Если $t_x < t_0$ или $t_x > t_0$, то электродвигатель соответственно перегружен или недогружен. В этом случае необходимо принять другой габарит электродвигателя и выполнять проверочный расчет заново.

Изложенная последовательность расчета предполагает известной постоянной времени нагрева T . Однако очень часто, особенно при использовании электродвигателей продолжительного режима работы, постоянная времени нагрева неизвестна. В этом случае проверяется предварительно выбранный электродвигатель на допустимую при заданной продолжительности включения перегрузку по току.

Коэффициент тепловой перегрузки электродвигателя может быть выражен через постоянные и переменные потери следующим образом:

$$P_T = \frac{q_x}{q_n} = \frac{q_{\text{пост}} + \chi^2 q_{\text{пер. ном}}}{q_{\text{пост}} + q_{\text{пер. ном}}} = \frac{a + \chi^2}{a + 1}, \quad /1.41/$$

откуда

$$\chi = \sqrt{P_T + a(P_T - 1)}. \quad /1.42/$$

Если пренебречь постоянными потерями ($a=0$), незначительными по сравнению с переменными потерями при кратковременном режиме, то коэффициент допустимой перегрузки по току

$$\chi = \frac{I_x}{I_n} \approx \sqrt{P_T}. \quad /1.43/$$

Выражение /1.40/ позволяет определить постоянную времени нагрева:

$$T = \frac{t_x}{\ln \frac{q_x}{q_x - q_n}}. \quad /1.44/$$

Формулой /1.44/ можно воспользоваться, например, для крановых электродвигателей переменного тока. Для этих двигателей в каталогах приводятся данные о мощности и КПД при длительном и часовом режимах работы. Эти данные позволяют вычислить q_n и q_x /для $t_x = 1$ ч/.

Для кратковременного режима работы целесообразно применять электродвигатели специальных серий, рассчитанные таким образом, чтобы отдельные части машины, нагреваясь равномерно, к концу рабочего периода имели максимально допустимый перегрев. Для специальных электродвигателей кратковременного режима указывается допустимая длительность непрерывной работы, причем ГОСТ 183-74 установлены следующие значения длительности периода неизменной номинальной нагрузки: 10, 30, 60, 90 мин.

При использовании для кратковременной работы электродвигателей повторно-кратковременного режима можно приближенно считать, что длительности работы в 30 мин соответствует продолжительность включения ПВ = 15%, 60 мин - ПВ = 25%, а 90 мин - ПВ = 40%.

В тех случаях, когда нагрузочная диаграмма кратковременного режима отличается от идеального графика /прямоугольника/, реальная нагрузочная диаграмма должна быть заменена эквивалентным по нагреву прямоугольником.

1.6. Выбор мощности двигателей

при повторно-кратковременных режимах работы

1.6.1. Нагрев двигателя и допустимая тепловая перегрузка

При повторно-кратковременных режимах работы /режимы S3-S5/ перегрев двигателя колеблется в пределах от τ_{min} до τ_{max} /рис. 1.8/, причем для полного использования двигателя необходимо, чтобы $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{доп}}$ для данного класса изоляции обмоток.

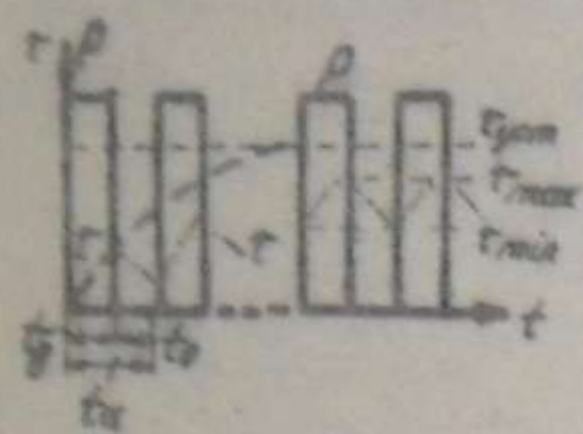


Рис.1.8. Нагрузочная диаграмма и график нагрева при повторно-кратковременном режиме работы двигателя

Установившийся перегрев $\tau_{уст}$ соответствует продолжительной работе с потерями $\varphi_{п.к}$ повторно-кратковременного режима, а перегрев τ_{max} — не-которому эквивалентному длительному режиму с потерями $\varphi_{з.дл}$. Таким образом, в повторно-кратко-временном режиме двигатель может работать с теп-ловой перегрузкой за счет охлаждения в периоды пауз. Коэффициент тепловой перегрузки в этом случае

$$P_T = \frac{\varphi_{п.к}}{\varphi_{з.дл}} = \frac{\tau_{уст}}{\tau_{max}} = \frac{\tau_{уст}}{\tau_{доп}}, \quad /1.45/$$

так как $\tau_{уст} = \frac{\varphi_{п.к}}{A}$ и $\tau_{max} = \frac{\varphi_{з.дл}}{A}$.

Нагрев электродвигателя, как известно из общепринятой теории на-грева электрических машин, протекает по экспоненциальному закону

$$\tau = \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}} + \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad /1.46/$$

В соответствии с /1.46/ за период включения $t_в$ перегрев двига-теля достигнет допустимого значения

$$\tau_{доп} = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t_в}{T}}) + \tau_{min} e^{-\frac{t_в}{T}}. \quad /1.47/$$

Для периода охлаждения $t_о$ из /1.46/ следует /при допущении ра-венства постоянных времени нагрева и охлаждения/*, что

$$\tau_{min} = \tau_{доп} e^{-\frac{t_о}{T}}. \quad /1.48/$$

Заменяя в /1.47/ τ_{min} /1.48/, получим

$$\tau_{доп} = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t_в}{T}}) + \tau_{доп} e^{-\frac{t_о+t_в}{T}},$$

откуда

$$P_T = \frac{\tau_{уст}}{\tau_{доп}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_в}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_о+t_в}{T}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_в}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_в}{T} - \frac{t_о}{T}}}, \quad /1.49/$$

так как $\epsilon = \frac{t_в}{t_о}$ /относительная продолжительность включения/.

* В предположении, что $\beta = 1$. При прак-тических расчетах изменение условий охлажде-ния в периоды пауз, пусков и торможений учи-тывается введением поправочного коэффициента $\beta \neq 1$.

На рис.1.9 показаны кривые $P_T = f(\epsilon)$ при различных отношениях $t_о/T$, построен-ные по уравнению /1.49/, из которых видно, что при $\epsilon > 0,6$ допустимая тепловая перегрузка очень мала. В этом случае двигатель можно выбирать, считая его режим работы продол-жительным (СИ). Допустимая тепловая пере-грузка двигателей возрастает при уменьшении отношения $t_о/T$.

Соотношение /1.49/ после разложения в ряд Маклорена может быть предоставлено следующим образом:

$$P_T = \frac{1 - 1 + \frac{t_в}{\epsilon T} - \frac{1}{2!} \left(\frac{t_в}{\epsilon T}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{t_в}{\epsilon T}\right)^3 - \dots}{1 - 1 + \frac{t_в}{T} - \frac{1}{2!} \left(\frac{t_в}{T}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{t_в}{T}\right)^3 - \dots}. \quad /1.50/$$

При $t_о \ll T$ всеми членами ряда, содержащими отношение $\frac{t_о}{T}$ во вто-рой и более высоких степенях, можно пренебречь. В этом случае

$$P_T = \frac{\varphi_{п.к}}{\varphi_{з.дл}} = \frac{\tau_{уст}}{\tau_{доп}} = \frac{1}{\epsilon}, \quad /1.51/$$

или

$$P_{з.дл} = \epsilon \varphi_{п.к}.$$

Это соотношение используется далее при выборе мощности двигателей.

1.6.2. Выбор двигателя из серии машин, предназначенных для продолжительного режима работы

В этом случае необходимо определить такую фиктивную эквивалент-ную постоянную нагрузку, которая дает тот же тепловой эффект, что и переменная нагрузка по заданному графику повторно-кратковременного режима [2].

Рассмотрим выбор мощности двигателя на примере типичного трех-участкового графика повторно-кратковременного режима /рис.1.10/.

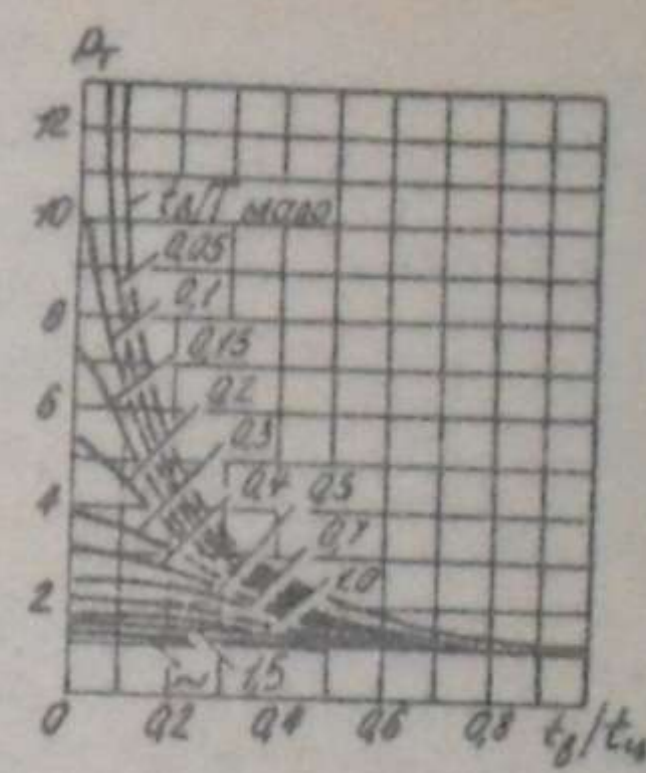


Рис.1.9. Зависимость коэф-фициента тепловой перегрузки от продолжительности включения при раз-личных значениях соотношения $t_о/T$

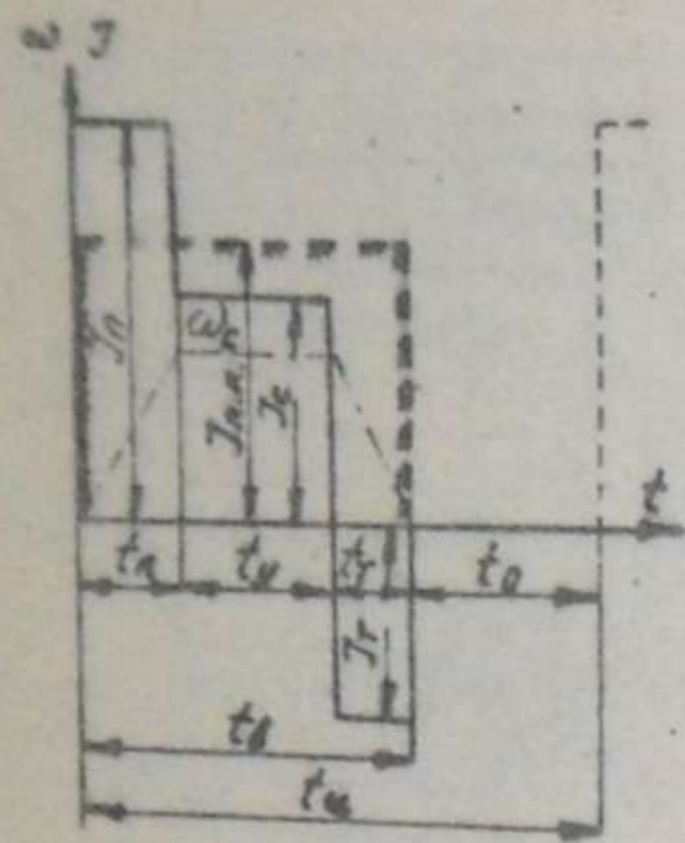


Рис. 1.10. Тахограмма и нагрузочная диаграмма повторно-кратковременного режима работы

имеющего периоды пуска t_n , установившегося движения t_y , торможения t_r и паузы t_0 . Указанным периодам работы соответствуют средние значения пускового I_n и тормозного I_r токов, а также ток статической нагрузки I_c при установившейся скорости ω_c .

Потери Q_u , выделившиеся в двигателе за цикл повторно-кратковременного режима, пропорциональны квадрату постоянного по значению тока $I_{п.к}$:

$$Q_u = (q_{пост} + q_{пер}) t_0 = \left[q_{пост} + q_{пер.ном} \left(\frac{I_{п.к}}{I_n} \right)^2 \right] t_0 = q_{пер.ном} \left[a + \left(\frac{I_{п.к}}{I_n} \right)^2 \right] t_0, \quad /1.52/$$

где $I_{п.к}$ - эквивалентный ток повторно-кратковременного режима, определяемый как среднеквадратичное значение для заданного графика нагрузки без учета времени пауз, т.е.

$$I_{п.к} = \frac{I_n^2 t_n + I_c^2 t_y + I_r^2 t_r}{t_n + t_y + t_r}. \quad /1.53/$$

Таким образом, для определения $I_{п.к}$ фактическая нагрузочная диаграмма заменяется прямоугольным графиком эквивалентного длительного режима /на рис. 1.10 этот график обведен штриховкой/.

Выбираем двигатель, предназначенный для длительного режима, работая в соответствии с графиком рис. 1.10, при перегреве $\tau_{доп}$ /т.е. развивая свою номинальную мощность/ за один цикл может отдать в окружающую среду количество теплоты:

$$Q_{н.ч} = q_n t_n + q_y t_y + q_r t_r + q_0 t_0, \quad /1.54/$$

где $q_n = q_y = q_r$ и q_0 - количество теплоты, отдаваемое за единицу времени на соответствующих участках графика работы.

Учитывая ухудшение условий охлаждения двигателя в периоды пуска, торможения и паузы, количество теплоты, отдаваемое двигателем в окружающую среду, можно выразить так:

$$q_n = q_r = q_y \frac{1+\beta}{2} = q_{пер.ном} (a+1) \frac{1+\beta}{2}; \quad /1.55/$$

$$q_y = q_n = q_{пер.ном} (a+1); \quad /1.56/$$

$$q_0 = q_n \beta = q_{пер.ном} (a+1) \beta, \quad /1.57/$$

где q_n - номинальные потери в двигателе за единицу времени. Соотношение /1.54/ с учетом /1.55/ - /1.57/ может быть представлено следующим образом:

$$Q_{н.ч} = q_{пер.ном} (a+1) \left[\frac{1+\beta}{2} (t_n + t_r) + t_y + \beta t_0 \right]. \quad /1.58/$$

Обозначим относительную продолжительность включения, скорректированную для учета ухудшения условий охлаждения двигателя,

$$\epsilon' = \frac{t_0}{t_0'} = \frac{t_0}{\frac{1+\beta}{2} (t_n + t_r) + t_y + \beta t_0}. \quad /1.59/$$

Тогда

$$Q_{н.ч} = q_{пер.ном} (a+1) \frac{t_0}{\epsilon'}. \quad /1.60/$$

Установившиеся колебания перегрева /при $\tau_{max} = \tau_{доп}$ / для повторно-кратковременного режима будут в том случае, когда потери в двигателе за цикл будут равны количеству теплоты, отдаваемому им в окружающую среду. Это условие записывается в виде уравнения теплового баланса

$$Q_u = Q_{н.ч}. \quad /1.61/$$

Подставив в /1.61/ значения Q_u и $Q_{н.ч}$ из /1.52/ и /1.60/, определим из уравнения теплового баланса номинальный ток I_n двигателя продолжительного режима, работающего с эквивалентной повторно-кратковременной нагрузкой $I_{п.к}$:

$$I_n = I_{п.к} \sqrt{\frac{\epsilon'}{1+a(1-\epsilon')}}. \quad /1.62/$$

Если момент и мощность двигателя пропорциональны току, то выражения, аналогичные /1.62/, можно получить для определения M_n и P_n по значениям $M_{п.к}$ и $P_{п.к}$.

Так как в периоды пуска и торможения мощность на валу двигателя не пропорциональна току /моменту/, а изменяется от нуля до максимума / $P_{п.мак}$ и $P_{т.мак}$ /, то величина $P_{п.к}$ должна определяться по скорректированной нагрузочной диаграмме:

$$P_{п.к} = \sqrt{\frac{\frac{P_{п.мак}^2 t_n}{3} + P_y^2 t_y + \frac{P_{т.мак}^2 t_r}{3}}{t_n + t_y + t_r}}. \quad /1.63/$$

Расчеты можно упростить, если пренебречь постоянными потерями ($\sigma = \frac{I_{\text{пост}}}{I_{\text{пер.ном}}} = 0$) и не учитывать ухудшения условий охлаждения двигателя в период пауз $\beta = 1$. В этом случае $\epsilon' = \epsilon$, и расчетная формула для определения I_N /и аналогичные соотношения для M_N и P_N / принимает вид

$$I_N = I_{\text{п.к}} \sqrt{\epsilon} \quad /1.64/$$

Это же соотношение можно получить из /1.51/ для определения коэффициента тепловой перегрузки. Действительно, так как $q_{\text{п.к}} \equiv I_{\text{п.к}}^2$ и $q_{\text{з.дм}} \equiv I_N^2$, то из /1.51/ следуют соотношение /1.63/ и аналогичные ему для M_N и P_N .

Таким образом, двигатель продолжительного режима для повторно-кратковременной работы выбирается в такой последовательности.

1. На основании расчета статической нагрузки или по данным аналогичных установок предварительно по каталогу выбирается электродвигатель необходимой мощности и скорости.

2. С учетом данных выбранного электродвигателя рассчитывается оптимальное передаточное число редуктора или проверяется целесообразность безредукторного варианта привода.

3. В соответствии с принятой системой управления электроприводом рассчитывается и строится тахограмма и нагрузочная диаграмма электродвигателя $M = f(t)$ или $I = f(t)$.

4. По нагрузочной диаграмме определяется фактическая относительная продолжительность включения $\epsilon = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{н}}}$, а по /1.59/ - ее скорректированное значение, учитывающее условия ухудшения условий охлаждения двигателя.

5. Рассчитанную сложную нагрузочную диаграмму заменяют эквивалентным прямоугольным графиком /без учета времени пауз/, ордината которого равна эквивалентной длительной нагрузке повторно-кратковременного режима /см. рис.1.10/. Таким образом определяется $I_{\text{п.к}}$ по /1.53/ или $M_{\text{п.к}}$ по аналогичной формуле. Значение $P_{\text{п.к}}$ /если нагрузочная диаграмма строится в координатах $P-t$ / вычисляется по /1.63/.

6. По уточненной формуле типа /1.62/ или по упрощенному соотношению типа /1.64/ определяются номинальные данные двигателя продолжительного режима работы / I_N , M_N или P_N /. Если имеются рассчитанные заранее кривые для определения коэффициента тепловой перегрузки /см. рис.1.9/, то номинальные данные, например I_N , можно установить на основании /1.51/ и /1.64/ по выражению

$$I_N = \frac{I_{\text{п.к}}}{\sqrt{P_T}} \quad /1.65/$$

Расчетные значения номинальных данных должны быть меньше или равны аналогичным величинам предварительно выбранного двигателя.

7. Двигатель, удовлетворяющий условиям работы по нагреву, проверяют на перегрузку.

1.6.3. Выбор двигателя из серии машин, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы

Отдельные элементы двигателя продолжительного режима работы /якорь, коллектор, обмотка возбуждения/ имеют различные постоянные времени нагрева. Поэтому работа в повторно-кратковременном режиме вызывает у этих двигателей неодинаковый нагрев отдельных элементов. Например, в двигателях постоянного тока обмотка возбуждения нагревается быстрее, а коллектор и якорь - медленнее. Таким образом, в данном случае полное использование двигателя по нагреву обмотки возбуждения приводит к недогреву якоря, а максимальное использование по нагреву якоря - к перегреву обмотки возбуждения.

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные краново-металлургические двигатели постоянного и переменного тока, двигатели с более равномерным характером нагрева отдельных элементов. Кроме того, конструкция этих машин обеспечивает большую механическую прочность и минимальный момент инерции за счет уменьшения диаметра и увеличения активной длины якоря. Это улучшает динамические свойства машины, необходимые для подъемно-транспортных устройств и механизмов прокатных станов. Мощность краново-металлургических двигателей устанавливается заводом-изготовителем экспериментально и относится к определенной стандартной продолжительности включения /ПВ = 15, 25, 40, 60%/ . Таким образом, указанные в каталоге номинальные данные учитывают условия охлаждения двигателя при повторно-кратковременном режиме со стандартной продолжительностью включения. За номинальное значение продолжительности включения принята величина ПВ = 25% / $\epsilon_N = 0,25$ /. При $\epsilon_N = 0,25$ двигатель, работая при $\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{воп}}$, развивает номинальную мощность повторно-кратковременного режима / $P_{\text{ен}}$ /.

Если фактическое значение ϵ отличается от какого-либо каталожного значения / $\epsilon_k = 0,15; \epsilon_N = 0,25; 0,4; 0,6$ /, то и развиваемая двигателем мощность P_{ϵ} в этом случае не будет равна значениям $P_{\text{ен}}$, P_{ϵ} указанным в каталоге / $P_{\epsilon 15}; P_N = P_{\epsilon 25}; P_{\epsilon 40}; P_{\epsilon 60}$ /. Величина для различных значений ϵ может быть определена по кривой $P_{\epsilon} = f(\epsilon)$, построенной на основании каталожных данных конкретной машины. На рис.1.11 показана /в относительных единицах/ такая усредненная кривая для асинхронных двигателей серии МТ.

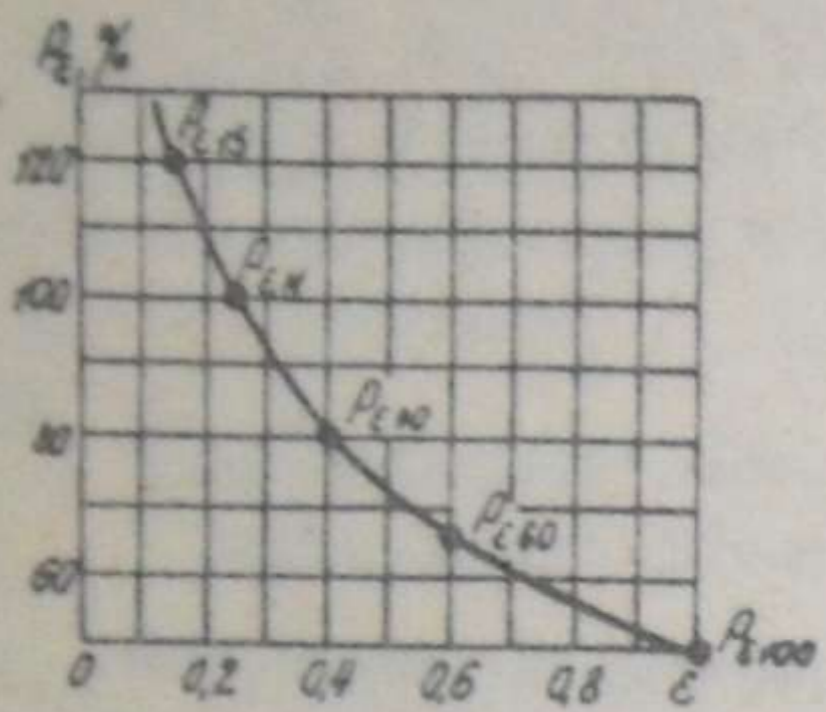


Рис. 1.11. Усредненное значение мощности двигателей повторно-кратковременного режима в зависимости от относительной продолжительности включения

Соотношение между P_e и P_{ek} , а также между соответствующими значениями токов и моментов, пропорциональных мощностям, можно выразить так:

$$\frac{I}{E} = \frac{I_{ek}}{E_{ek}} \xi; \quad M = M_{ek} \xi; \quad P_e = P_{ek} \xi, \quad /1.66/$$

где ξ - пересчетный коэффициент, учитывающий постоянные потери в электродвигателе и ухудшение условий охлаждения в неустойчивых процессах и в периоды пауз.

Значение ξ определяется так [2]:

$$\xi = \sqrt{\frac{(\epsilon_k - \epsilon)(\alpha + 1)}{\epsilon \left(\frac{\epsilon}{\beta} - \epsilon_k + 1\right)} + 1}. \quad /1.67/$$

Упрощенную формулу для определения пересчетного коэффициента ξ можно получить из условия равенства потерь за цикл при фактическом и каталожном режимах работы без учета ухудшения условий охлаждения ($\beta = 1$). Уравнение равенства потерь в этом случае имеет вид

$$Q_{пер.ном} (\alpha + 1) t_{ц} \epsilon_k = Q_{пер.ном} (\alpha + \xi) t_{ц} \epsilon. \quad /1.68/$$

Решив /1.68/ относительно ξ , получим

$$\xi = \sqrt{(\alpha + 1) \frac{\epsilon_k - \alpha}{\epsilon}}. \quad /1.69/$$

Выражение /1.69/ может быть получено также и из /1.67/, если принять здесь $\beta = 1$ и пренебречь малыми второго порядка ($\epsilon^2 \approx 0$ и $\epsilon \epsilon_k \approx 0$). Соотношения /1.66/ и /1.69/ показывают, что при увеличении ϵ развиваемая двигателем мощность P_e уменьшается. Если $\alpha = 1$ /двигатель серии МТ/, $\epsilon_k = 0,25$ и $\epsilon = 0,5$, то по /1.68/ $\xi = 0$ и, следовательно, $P_e = 0$, т.е. в этом случае двигатель нагревается до максимально допустимой температуры при холостом ходе за счет постоянных потерь. Но это не соответствует действительности, так как из экспериментальной кривой на рис. 1.11 видно, что при $\epsilon = 0,5$ двигатель может развивать мощность $P_e \approx 0,7 P_{ен}$. Таким образом, /1.69/ можно использовать только для приближенных расчетов при близких значениях ϵ и ϵ_k , так как она не учитывает ухудшения условий охлаждения двигателя при неустойчивых процессах и в периоды пауз.

Выражение для ξ можно упростить, если пренебречь постоянными потерями ($\alpha = 0$) и принять $\beta = 1$. В этом случае из /1.69/ следует, что

$$\xi = \sqrt{\frac{\epsilon_k}{\epsilon}}. \quad /1.70/$$

Эта упрощенная формула получила наибольшее распространение в практике расчета мощности электродвигателей. Она дает примерно то же значение коэффициента ξ , что и /1.67/ при $\alpha = 0,7$ и $\beta = 0,25$ /см. табл. 1.4 и значения β в п. 1.4.1/. Кроме того, при $\epsilon < \epsilon_k$ коэффициент ξ , определяемый по /1.70/, несколько меньше, чем вычисленный по /1.67/, что обеспечивает расчет электродвигателя с небольшим запасом мощности.

Таким образом, выбор и проверочный расчет мощности двигателя для рассматриваемой задачи необходимо производить в такой последовательности.

1-5. Выполняются расчеты, аналогичные рассмотренным в п. 1.6.2.

6. По кривым $P_e = f(\epsilon)$, $M_e = f(\epsilon)$ или $I_e = f(\epsilon)$, построенным по каталожным данным серийных машин, из которых предварительно выбран двигатель, определяются I_e , M_e или P_e , соответствующие фактическому значению ϵ , рассчитанному для реальной нагрузочной диаграммы.

7. Если нет кривых $I_e = f(\epsilon)$, $M_e = f(\epsilon)$, $P_e = f(\epsilon)$, то по /1.67/ /1.69/ или /1.70/ определяется пересчетный коэффициент ξ для ближайшего значения ϵ_k по отношению к фактической величине ϵ .

8. По /1.66/ находят I_e , M_e или P_e , при этом I_{ek} , M_{ek} или P_{ek} принимаются соответствующие принятому в п. 7 значению ϵ_k .

9. Выполняется проверка предварительно выбранного двигателя по нагреву. Двигатель работает без перегрева, если выполняется условие

$$I_{п.к} \leq I_e; \quad M_{п.к} \leq M_e \quad \text{или} \quad P_{п.к} \leq P_e. \quad /1.71/$$

10. В заключение двигатель проверяется на перегрузку по току и моменту /см. подразд. 1.1/.

При расчете коэффициента ξ по /1.69/ для учета условий охлаждения двигателя в неустойчивых режимах и в периоды пауз можно воспользоваться скорректированным значением относительной продолжительности включения (ϵ') по /1.59/. Если для расчета ξ по /1.69/ используется фактическое значение ϵ , то ухудшение условий охлаждения надо учесть введением поправочного коэффициента при определении $I_{п.к}$ по /1.53/ или соответствующих значений $M_{п.к}$ и $P_{п.к}$.

1.7. Выбор электродвигателя по допустимому числу включений в час

Некоторые электроприводы механизмов прокатных станков /например, сбрасыватели, кантующие муфты и др./ работают в тяжелом режиме частых включений. Нагрев электродвигателя в этом случае существенно зависит от потерь энергии при пуске и торможении. Поэтому требуется проверка предварительно выбранной мощности электродвигателя по значению допустимых потерь. Решение этой задачи может быть сведено к определению допустимого для электродвигателя числа включений в час при заданных статической и динамической нагрузках. В такой постановке решение задачи наиболее целесообразно для электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, для которых применение других методов затруднено или невозможно.

Допустимое число включений в час определяется из уравнения теплового баланса, дающего соотношение между энергией потерь в электродвигателе и количеством энергии, рассеиваемой им в окружающую среду в течение одного рабочего цикла.

Расчет допустимого числа включений в час ($Z_{доп}$) несколько различается у асинхронных двигателей, предназначенных для продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы. Однако в любом случае проверяется правильность предварительно выбранного двигателя по условию

$$Z_{доп} \geq Z_T, \quad /1.72/$$

где Z_T - число включений двигателя в час, необходимое для осуществления какого-либо технологического процесса.

1.7.1. Расчет $Z_{доп}$ для асинхронных короткозамкнутых двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы

Если асинхронный двигатель продолжительного режима будет работать с номинальной скоростью в режиме **S5**, то при каком-то числе циклов пуска и торможения двигателя в час перегрев его обмоток достигает допустимого значения. Это и определит величину $Z_{доп}$. Мощность потерь, отдаваемых двигателем в окружающую среду при работе с номинальной /или близкой к ней/ скоростью, будет ΔP_H , за периоды пуска и торможения - $\Delta P_H \frac{1+\beta}{2}$, а во время пауз - $\beta \Delta P_H$. Потери энергии, выделяющиеся в двигателе за один цикл повторно-кратковременного режима, состоят из потерь при пуске и торможении $(\Delta A_n + \Delta A_T)$, а также

из потерь при установившейся скорости $(\Delta P t_y)$. После ряда пиков температура двигателя установится, и будет справедливо следующее уравнение теплового баланса [1]:

$$\Delta A_n + \Delta P t_y + \Delta A_T = \frac{1+\beta}{2} (t_n + t_T) \Delta P_H + t_y \Delta P_H + \beta t_0 \Delta P_H, \quad /1.73/$$

где t_n , t_T , t_y и t_0 - время соответственно пуска, торможения, установившегося режима и остановки /паузы/.

Если учесть, что $Z_{доп} = 3600 / t_c$, $t_0 = t_c (1-\epsilon)$ и $t_y = t_c \epsilon - (t_n + t_T)$, где t_c - время одного цикла, то, подставив эти соотношения в /1.73/ и решив его относительно $Z_{доп}$, получим

$$Z_{доп} = 3600 \frac{(\Delta P_H - \Delta P) \epsilon + \Delta P_H \beta (1-\epsilon)}{\Delta A_n + \Delta A_T - (t_n + t_T) [\Delta P + (1+\beta) \frac{\Delta P}{2} - \Delta P_H]} \quad /1.74/$$

Соотношение /1.74/ значительно упрощается, если учесть, что потери, выраженные третьим слагаемым знаменателя, составляют примерно 3% суммы $A_n + A_T$ потерь за периоды пуска и торможения и что, как правило, двигатели работают с нагрузкой, близкой к номинальной ($\Delta P \approx \Delta P_H$). В этом случае

$$Z_{доп} = 3600 \frac{\Delta P_H \beta (1-\epsilon)}{0,97 (\Delta A_n + \Delta A_T)} \quad /1.75/$$

Для режима **S4** расчетные формулы для определения $Z_{доп}$ получаются как частный случай из /1.74/ и /1.75/ для режима **S5**, если принять $\Delta A_T = 0$ и $t_T = 0$.

1.7.2. Расчет $Z_{доп}$ для асинхронных короткозамкнутых двигателей, предназначенных для повторно-кратковременного режима работы

При выводе /1.74/ из уравнения теплового баланса /1.73/ в основу положены номинальные потери ΔP_H независимо от типа машины /продолжительного или повторно-кратковременного режима работы/ и номинального значения ϵ_H . Поэтому /1.74/ правильна только для продолжительного режима работы.

Далее приводится предлагаемый автором [3] вывод уточненной формулы для определения $Z_{доп}$ для асинхронных короткозамкнутых двигателей любого режима работы. При этом необходимо исходить из количества, которое рассеивает в окружающую среду электродвигатель повторно-кратковременного режима при длительной работе. Эти потери в дальнейшем будем обозначать $\Delta P_{дл}$.

В табл. 1.6 указаны потери энергии в электродвигателе и энергия, рассеиваемая в окружающую среду за различные периоды рабочего цикла. Уравнение теплового баланса электродвигателя за рабочий цикл записывается следующим образом:

$$\Delta A_n + \Delta A_r + (P_{\text{пост}} + \chi^2 P_{\text{пер. н}}) t_y =$$

$$= \Delta P_{\text{эл}} \frac{1+\beta}{2} (t_n + t_r) + \Delta P_{\text{эл}} t_y + \Delta P_{\text{эл}} \beta (t_n - t_r), \quad /1.76/$$

где χ - коэффициент загрузки двигателя по току; t_n - время включения двигателя за цикл работы.

Таблица 1.6

Баланс потерь в электродвигателе за рабочий цикл

| Периоды рабочего цикла | Энергия потерь в электродвигателе | Энергия, рассеиваемая в окружающую среду |
|-------------------------|--|--|
| Пуск | ΔA_n | $\Delta P_{\text{эл}} \frac{1+\beta}{2} t_n$ |
| Установившееся движение | $(P_{\text{пост}} + \chi^2 P_{\text{пер. н}}) t_y$ | $\Delta P_{\text{эл}} t_y$ |
| Торможение | ΔA_r | $\Delta P_{\text{эл}} \frac{1+\beta}{2} t_r$ |
| Остановка /пауза/ | 0 | $\Delta P_{\text{эл}} \beta (t_n - t_r)$ |

Число циклов работы электродвигателя в час

$$Z = \frac{3600}{t_n} \quad /1.77/$$

Для электродвигателей повторно-кратковременного режима работы целесообразно выразить через номинальные потери по известной формуле

$$\Delta P_{\text{эл}} = \epsilon_n \Delta P_{\text{ен}}, \quad /1.78/$$

где ϵ_n - номинальная относительная продолжительность включения электродвигателя.

Подставив значение t_n из /1.77/ и $\Delta P_{\text{эл}}$ из /1.78/ в /1.76/ и решив уравнение теплового баланса электродвигателя относительно $Z = Z_{\text{доп}}$ после преобразований получим

$$Z_{\text{доп}} = 3600 \frac{[(1-\beta)\epsilon + \beta]\epsilon_n - \frac{\alpha + \chi^2}{\alpha + 1} \epsilon}{\frac{\Delta A_n + \Delta A_r}{\Delta P_{\text{ен}}} - \left(\frac{\alpha + \chi^2}{\alpha + 1} - \frac{1-\beta}{2} \epsilon_n\right)(t_n + t_r)} \quad /1.79/$$

Расчеты, выполненные по /1.74/ и /1.79/ для двигателей продолжительного режима работы, дают почти совпадающие результаты. Для двигателей повторно-кратковременного режима расчет по /1.79/ дает хорошее совпадение с экспериментальными данными, а расчет по /1.74/ приводит к значительному /более чем в 2 раза/ завышению величины $Z_{\text{доп}}$ [3].

2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1. Определение времени движения электропривода при треугольной тахограмме

Расчет эквивалентного тока /момента/ электродвигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме по треугольной тахограмме, требует предварительного определения продолжительности пуска и торможения при каждом перемещении механизма. Так как подобные перемещения за цикл могут быть весьма многочисленны и различны /например, для нажимных устройств обжимных клеток/, то для упрощения всех расчетов целесообразно предварительно построить кривую, выражающую зависимость времени движения $t = t_n + t_r$ в функции суммарного пути S , проходимого механизмом за периоды пуска и торможения. Примерный вид такой кривой показан на рис. 2.1.

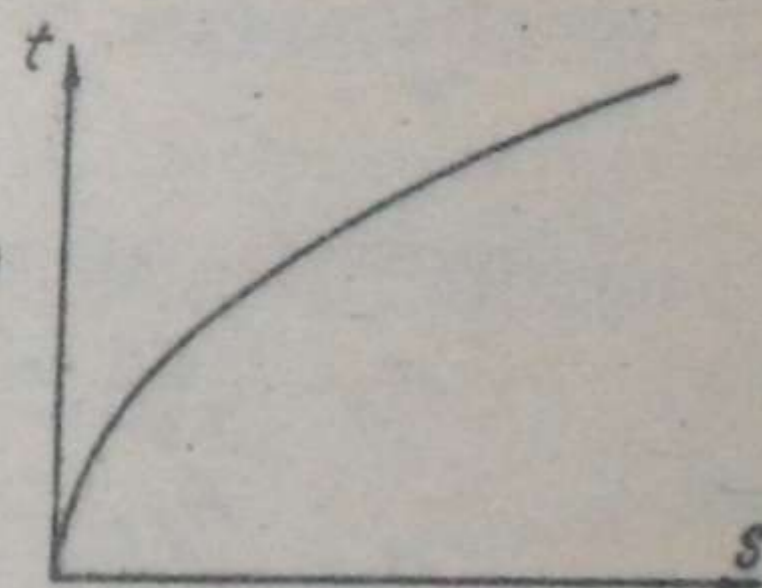


Рис. 2.1. Зависимость $t = f(S)$ для механизма, работающего по треугольной тахограмме

Время соответственно разгона механизма до скорости v при пуске и торможения от этой скорости до нуля

$$t_n = \frac{v}{a_n}; \quad t_r = \frac{v}{a_r}; \quad /2.1/$$

где a_n и a_r - ускорение и замедление механизма при пуске и торможении привода.

При заданных статической и динамической нагрузках на валу электропривода, принятых значениях среднего пускового и тормозного моментов предварительно выбранного электродвигателя величины a_n и a_r будут постоянными.

Суммарный путь, пройденный механизмом за периоды пуска и торможения:

$$S = S_n + S_r = \frac{a_n t_n^2}{2} + \frac{a_r t_r^2}{2}, \quad /2.2/$$

Задаваясь различными скоростями перемещения механизма в пределах от нуля до установившейся скорости v_y , определяют величины t_n, t_r, S_n и S_r , необходимые для построения кривой $t = f(S)$.

Линейные ускорения и замедления механизма находят из уравнения движения электропривода с использованием так называемого спрямляющего числа ν , устанавливающего связь между скоростью электродвигателя и линейной скоростью рабочего механизма:

$$\nu = \frac{\omega_a}{v_m}. \quad /2.3/$$

С учетом /2.3/ динамический момент на валу электродвигателя записывается следующим образом:

$$M_j = J \frac{d\omega_a}{dt} = J \nu \frac{dv_m}{dt} = J \nu a. \quad /2.4/$$

Из /2.4/ находим

$$a = \frac{M_j}{J \nu}. \quad /2.5/$$

Соответственно для периодов пуска и торможения

$$a_n = \frac{M_{jn}}{J \nu}; \quad M_{jn} = M_n - M_c; \quad /2.6/$$

$$a_r = \frac{M_{jr}}{J \nu}; \quad M_{jr} = M_r + M_c. \quad /2.7/$$

Спрямяющее число для некоторых механизмов определяется следующим образом:

для нажимного устройства с шагом винта h и передаточным числом редуктора i

$$\nu = \frac{2\pi i}{h}; \quad /2.8/$$

для рольганга с диаметром ролика d_p

$$\nu = \frac{2i}{d_p}; \quad /2.9/$$

для манипулятора с диаметром начальной окружности реечной шестерни

$$\nu = \frac{2i}{d_w}; \quad /2.10/$$

Расчет кривой $t = f(S)$ по приведенным соотношениям можно свести в простейшую таблицу.

В практике проектирования возникает необходимость быстрого построения и перестроения вспомогательных кривых $t = f(S)$ для различных условий пуска и торможения. Описанный способ расчета этих кривых несколько громоздок и требует относительно больших затрат времени. Рассмотрим более простой метод построения кривых $t = f(S)$ по исходным значениям M_n, M_r, M_c, J и ν [4].

На рис.2.2 показана треугольная тахограмма работы механизма с ускорением a_n и замедлением a_r , построенная для случая разгона до установившейся скорости v_y . Суммарное перемещение механизма за периоды разгона и торможения в этом случае будем называть критическим ($S_{кр}$). Оно равно площади тахограммы, т.е.

$$S_{кр} = \frac{v_y \cdot t_{кр}}{2}. \quad /2.11/$$

Проведя отрезок DE параллельно BC , получим треугольник, представляющий тахограмму работы механизма при разгоне до скорости $v_i < v_y$, причем в этом случае путь, пройденный механизмом, определится как площадь тахограммы ODE :

$$S_i = \frac{v_i \cdot t_i}{2}. \quad /2.12/$$

Из отношения $\frac{S_i}{S_{кр}}$ можно определить закон изменения $t_i = f(S_{кр})$.

Так как $\triangle OBC \sim \triangle ODE$, то

$$\frac{v_i}{v_y} = \frac{t_i}{t_{кр}}. \quad /2.13/$$

Из /2.11/ - /2.13/ получим

$$\frac{S_i}{S_{кр}} = \frac{v_i t_i}{v_y t_{кр}} = \frac{t_i^2}{t_{кр}^2}, \quad /2.14/$$

откуда

$$t_i^2 = \frac{t_{кр}^2}{S_{кр}} S_i = \frac{2t_{кр}^2}{v_y t_{кр}} S_i = \frac{2t_{кр}}{v_y} S_i.$$

Так как $t_{кр} = t_{п.кр} + t_{т.кр}$, то

$$t_i^2 = 2 \left(\frac{t_{п.кр}}{v_y} + \frac{t_{т.кр}}{v_y} \right) S_i = 2 \left(\frac{1}{a_n} + \frac{1}{a_r} \right) S_i. \quad /2.15/$$

Выражение /2.15/ представляет собой уравнение параболы с параметром

$$p = \frac{1}{a_n} + \frac{1}{a_r}. \quad /2.16/$$

Подставив в /2.16/ значения a_n и a_r из /2.6/ и /2.7/, получим

$$p = \frac{2Jv}{M_{jn}} + \frac{2Jv}{M_{jt}} = 2Jv \frac{M_{jn} + M_{jt}}{M_{jn} M_{jt}}.$$

Назовем $M_{jэ} = \frac{2M_{jn} M_{jt}}{M_{jn} + M_{jt}}$ эквивалентным динамическим моментом привода. Тогда параметр параболы так:

$$p = \frac{2Jv}{M_{jэ}}. \quad /2.17/$$

Таким образом, парабола $t = f(S)$ описывается уравнением

$$t_i^2 = \frac{4Jv}{M_{jэ}} S_i. \quad /2.18/$$

Построение кривой $t = f(S)$ по уравнению /2.18/ показано на рис.2.3.

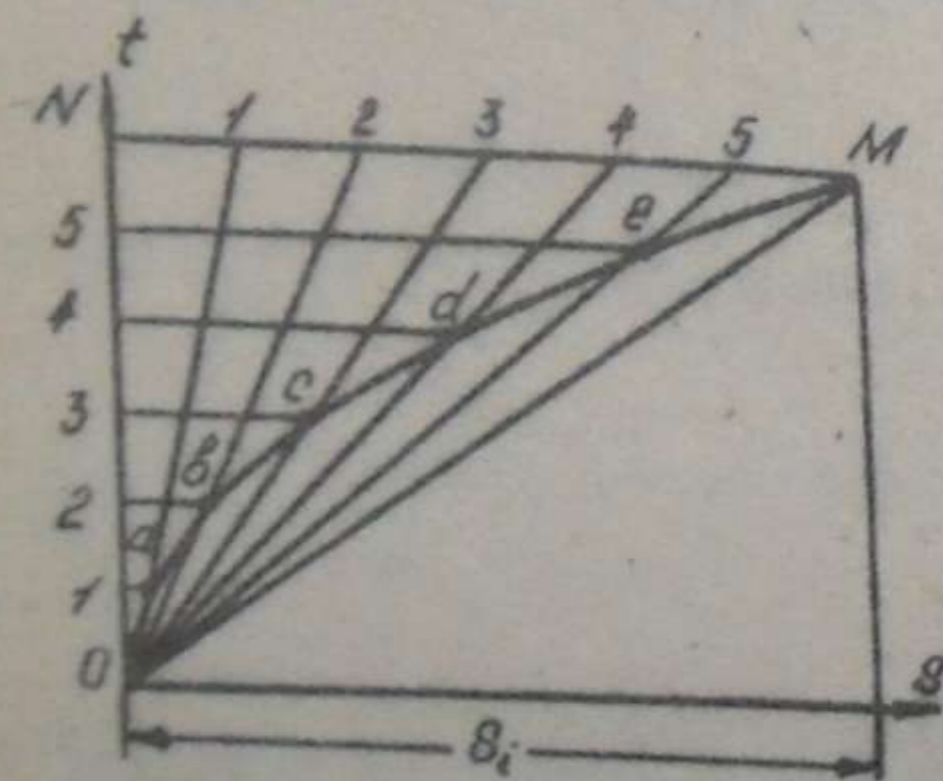


Рис.2.3. Построение кривой $t = f(S)$ по заданным координатам одной точки

Вначале по /2.18/ определяем время перемещения t_i для любого значения S_i /целесообразнее всего определить $t_{кр}$ для критического перемещения $S_{кр}$ /. Найденную точку отмечаем на координатной системе $t-S$ /точка M на рис.2.3/. Из точки M проведем прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с осью ординат в точке N.

Отрезки ON и NM поделим на равное число частей. Из точек 1, 2, 3 и т.д. на отрезке ON проведем прямые, параллельные OS, а точки 1, 2, 3 и т.д. на отрезке NM соединим с центром

координат. Пересечения одноименных прямых дадут точки a, b, c и т.д. искомой параболы $t = f(S)$.

По кривой $t = f(S)$ и тахограмме при разгоне до скорости v_y можно легко определить время пуска и торможения электропривода при перемещении механизма на любую величину S_i , как это показано на рис.2.4. Для заданного перемещения S_i по кривой $t_i = f(S)$ определяем суммарное время движения $t_i = t_{ni} + t_{ri}$ /отрезок OE/. Из точки E проведем прямую ED параллельно стороне CB тахограммы. Из точки D на ось t опустим перпендикуляр, делящий отрезок OE на две части, соответствующие времени пуска (t_{ni}) и времени торможения (t_{ri}) электропривода.

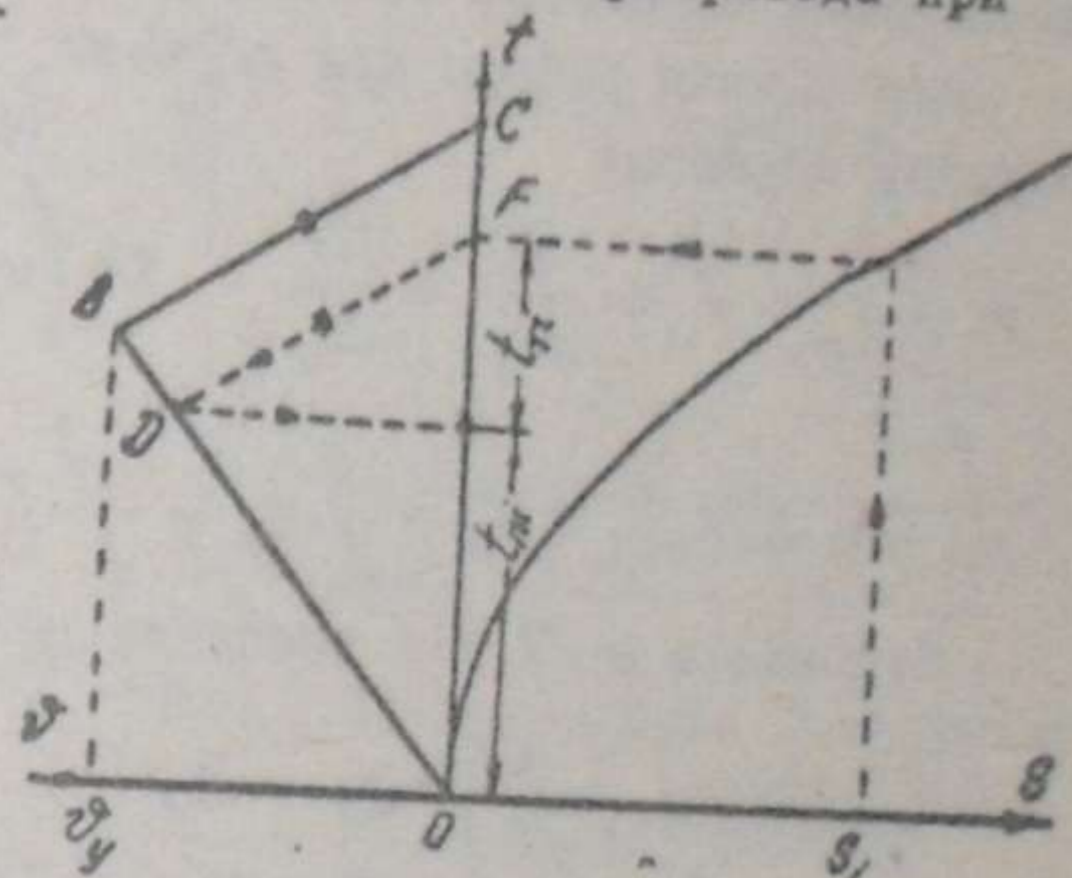


Рис.2.4. Определение времени пуска и торможения электропривода для заданного перемещения S_i по тахограмме и кривой $t = f(S)$

Время движения, определяемое указанным методом, используется при расчетах эквивалентного тока или момента предварительно выбранного двигателя.

2.2. Метод эквивалентных ускорений

Расчет эквивалентного тока, момента или мощности электродвигателей, работающих по программе заданных перемещений, может быть выполнен с использованием описанного в подразд.2.1 метода построения вспомогательных кривых $t = f(S)$ для определения времени движения. Этот способ пригоден только для треугольных тахограмм. В случае работы электропривода по трапецидальной тахограмме расчет еще более усложняется, особенно тогда, когда необходимо выполнить несколько расчетных вариантов, требующих построения серии вспомогательных кривых.

Рассмотрим разработанный автором метод определения эффективной нагрузки электродвигателя непосредственно по величине перемещений без построения вспомогательных кривых, что значительно упрощает и сокращает вычислительные операции. Этот метод дает возможность быстро выполнить ряд вариантных расчетов по аналитическим формулам [4].

Эквивалентное ускорение. При работе на треугольной тахограмме при $a_n = a_r = a$ справедливы следующие соотношения, вытекающие из законов равноускоренного движения:

$$t = 2\sqrt{\frac{S}{a}}; \quad S = \frac{v^2}{a}; \quad v = \sqrt{Sa}, \quad /2.19/$$

где S - полное перемещение механизма за период включения; v - максимальная скорость, достигаемая при данном перемещении.

Для случая работы при $a_n \neq a_r$ величины t и S определяются следующим образом:

$$t = t_n + t_r = \frac{v}{a_n} + \frac{v}{a_r} = v \left(\frac{a_n + a_r}{a_n a_r} \right); \quad /2.20/$$

$$S = S_n + S_r = \frac{v^2}{2} t_n + \frac{v^2}{2} t_r = \frac{v^2}{2} t. \quad /2.21/$$

Подставив в /2.21/ значение t из /2.20/, получим

$$S = \frac{v^2}{2} \left(\frac{a_n + a_r}{a_n a_r} \right); \quad v = \sqrt{\frac{2Sa_n a_r}{a_n + a_r}}. \quad /2.22/$$

Заменяя в /2.20/ значение v по /2.22/, после преобразований запишем

$$t = \sqrt{\frac{2S(a_n + a_r)}{a_n a_r}}. \quad /2.23/$$

Из сравнения /2.19/, /2.22/ и /2.23/ для определения t , S и v при $a_n \neq a_r$ и $a_n \neq a_r$ можно сделать вывод, что при расчетах механизмов, работающих с неравными ускорениями и замедлениями, можно пользоваться простыми формулами, в которых различные величины a_n и a_r формально заменены некоторым эквивалентным ускорением a_3 .

Сопоставление приведенных формул показывает, что значение эквивалентного ускорения представляет собой частное от деления квадрата среднегеометрического ускорения на среднеарифметическое:

$$a_3 = \frac{a_n a_r}{\frac{a_n + a_r}{2}}. \quad /2.24/$$

Таким образом, для общего случая работы по треугольной тахограмме при $a_n \neq a_r$ расчеты могут выполняться по формулам

$$t = 2\sqrt{\frac{S}{a_3}}; \quad S = \frac{v^2}{a_3}; \quad v = \sqrt{Sa_3}. \quad /2.25/$$

Критическое перемещение, т.е. перемещение за периоды пуска и торможения при достижении механизмом установившейся скорости v_y .

$$S_{кр} = \frac{v_y^2}{a_3}. \quad /2.26/$$

Расчет времени включения электропривода. Рассмотрим наиболее общий случай работы механизма по заданной программе перемещений, когда $a_n \neq a_r$, $I_n \neq I_r$, и тахограмма состоит из треугольных и трапециевидальных участков /рис.2.5/. При этом для некоторых перемещений механизма $S < S_{кр}$, а для остальных $S > S_{кр}$.

Для треугольного участка согласно /2.25/ суммарное время работы

$t_i = 2\sqrt{\frac{S_i}{a_3}}$, а для нескольких треугольных участков

$$\sum t_{ii} = \frac{2}{\sqrt{a_3}} \sum \sqrt{S_i}. \quad /2.27/$$

Продолжительность периодов пуска и торможения для трапециевидального участка составит

$$t_n + t_r = \frac{2}{\sqrt{a_3}} \sqrt{S_{кр}}, \quad /2.28/$$

а время работы с установившейся скоростью

$$t_y = \frac{S - S_{кр}}{v_y}. \quad /2.29/$$

Таким образом, полное время работы для трапециевидального участка тахограммы

$$t_2 = t_n + t_r + t_y = \frac{2}{\sqrt{a_3}} \sqrt{S_{кр}} + \frac{S - S_{кр}}{v_y}, \quad /2.30/$$

а для m участков

$$\sum t_{2i} = \frac{2m}{\sqrt{a_3}} \sqrt{S_{кр}} + \frac{\sum S_i - m S_{кр}}{v_y}. \quad /2.31/$$

Суммарное время включения электропривода за цикл с несколькими треугольными и m трапециевидальными тахограммами

$$\sum t_i = \sum t_{ii} + \sum t_{2i} = \frac{m S_{кр} + \sum S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}{v_y}, \quad /2.32/$$

причем в этом выражении для определения $\sum S_i$ учитываются только те перемещения, для которых $S_i > S_{кр}$, а для определения $\sum \sqrt{S_i}$ суммирование производится для перемещений $S_i < S_{кр}$.

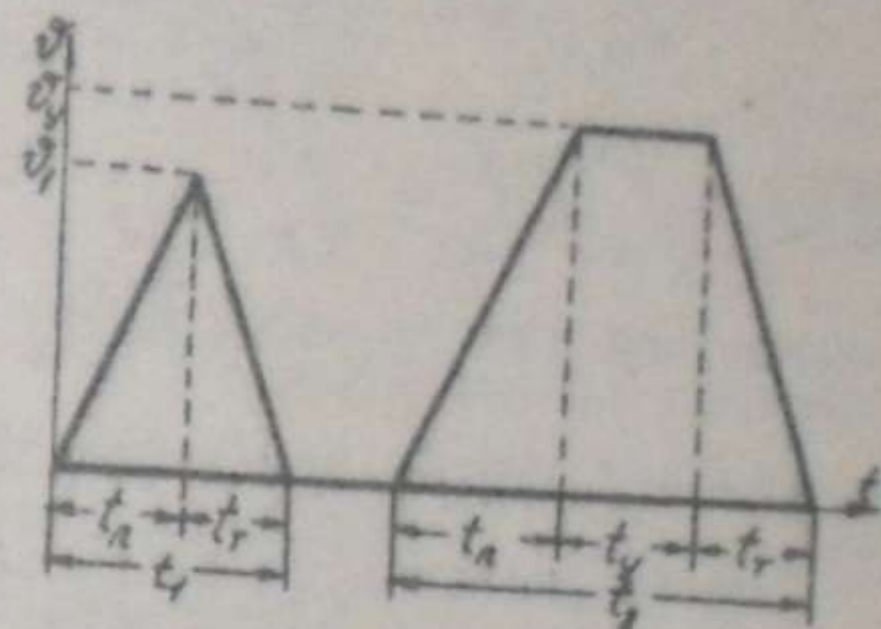


Рис.2.5. Тахограмма с треугольными и трапециевидальными элементами

Расчет эквивалентной нагрузки. Эквивалентный ток повторно-кратковременного режима

$$I_{н.к} = \frac{\sum I^2 t_i}{\sum t_i} = \frac{\sum I^2 t_{1i} + \sum I^2 t_{2i}}{\sum t_i}, \quad /2.33/$$

где $\sum I^2 t_{1i} = I_n^2 \sum t_{ni} + I_r^2 t_{2i}$ - эффективная нагрузка при работе с треугольной тахограммой; $\sum I^2 t_{2i} = I_n^2 \sum t_{ni} + I_r^2 \sum t_{ri} + I_c^2 \sum t_{yi}$ - эффективная нагрузка при работе с трапецидальной тахограммой.

Для треугольных участков тахограммы суммарное время работы электропривода за периоды пуска $\sum t_{ni}$ и торможения $\sum t_{ri}$ определяется по перемещениям следующим образом:

$$\sum t_{ni} = \frac{\sqrt{a_n}}{a_n} \sum \sqrt{S_i}; \quad \sum t_{ri} = \frac{\sqrt{a_r}}{a_r} \sum \sqrt{S_i}. \quad /2.34/$$

С учетом этих выражений величину $\sum I^2 t_{1i}$ после преобразований представим в виде

$$\sum I^2 t_{1i} = \frac{2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}{v_y (a_n + a_r)} (a_r I_n^2 + a_n I_r^2). \quad /2.35/$$

Для m трапецидальных участков тахограммы суммарное время работы электропривода в период соответственно пусков и торможений составит:

$$\sum t_{ni} = m \frac{v_y}{a_n}; \quad \sum t_{ri} = m \frac{v_y}{a_r}, \quad /2.36/$$

а суммарное время работы с установившейся скоростью -

$$\sum t_{yi} = \frac{\sum S_i - m S_{кр}}{v_y}. \quad /2.37/$$

Эффективную нагрузку электропривода в этом случае с учетом /2.36/ и /2.37/ после преобразований определим следующим образом:

$$\sum I^2 t_{2i} = \frac{2m S_{кр}}{v_y (a_n + a_r)} (a_r I_n^2 + a_n I_r^2) + \frac{I_c^2}{v_y} (\sum S_i - m S_{кр}). \quad /2.38/$$

Подставив в /2.33/ значения $\sum I^2 t_{1i}$ из /2.35/ и $\sum I^2 t_{2i}$ из /2.38/, а также значение $\sum t_i$ из /2.32/, получим окончательную расчетную формулу для определения эквивалентного тока повторно-кратковременного режима работы с заданной программой перемещений:

$$I_{н.к} = \sqrt{\frac{2}{a_n + a_r} (a_r I_n^2 + a_n I_r^2) (\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i} + m S_{кр}) + I_c^2 (\sum S_i - m S_{кр})}{m S_{кр} + \sum S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}. \quad /2.39/$$

В частном случае, когда $I_n = I_r = I$ /а это наиболее типичный случай для современных систем управления электроприводом, имеющим регулятор тока с единой установкой для пуска торможения/, расчетная формула для $I_{н.к}$, полученная из /2.39/, принимает вид

$$I_{н.к} = \sqrt{\frac{2I^2 (\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i} + m S_{кр}) + I_c^2 (\sum S_i - m S_{кр})}{m S_{кр} + \sum S_i + 2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}}. \quad /2.40/$$

Время движения электропривода для этого частного случая составит

$$\sum t_i = \frac{m S_{кр} + \sum S_i}{v_y}. \quad /2.41/$$

На основании общей расчетной формулы /2.39/ можно получить более простые зависимости для ряда других частных случаев, например для случая работы с тахограммой, состоящей только из треугольных элементов, для случая, когда $a_n = a_r$, и т.д. [4]. Приведем расчетные формулы только для случая, когда $a_n \neq a_r$, $I_n \neq I_r$, и тахограмма работы привода состоит из треугольных элементов. При этих условиях

$$I_{н.к} = \sqrt{\frac{a_r I_n^2 + a_n I_r^2}{a_n + a_r}}; \quad /2.42/$$

$$\sum t_i = \frac{2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}{v_y}. \quad /2.43/$$

Таким образом, эквивалентный ток электродвигателя при работе его по тахограмме с треугольными и трапецидальными элементами может быть определен достаточно просто и быстро по выведенным аналитическим формулам, если предварительно рассчитаны ускорения /см. подразд. 2.1/,

критическое перемещение механизма, а также $\sum S_i$ при $S_i > S_{кр}$ и $\sum \sqrt{S_i}$ при $S_i < S_{кр}$. Если тахограмма содержит только треугольные элементы /что часто встречается при малых перемещениях механизма/, то расчет еще более упрощается, так как в этом случае эквивалентный ток электро-двигателя не зависит от суммарного перемещения механизма, а определяется значениями ускорений, замедлений и принятыми значениями пускового и тормозного токов.

Выбор мощности двигателя по методу эквивалентных ускорений можно эффективно использовать для позиционных механизмов, работающих по заданной программе малых перемещений /например, для нажимных устройств прокатных станов/, особенно в тех случаях, когда необходимо выполнить ряд вариантных расчетов при изменении исходных данных, чтобы не строить каждый раз заново нагрузочную диаграмму.

Насмотря на преимущество метода эквивалентных ускорений, заключающееся в расчете по аналитическим формулам без построения нагрузочных диаграмм, он все же является методом последовательных приближений, так как все расчеты выполняются для предварительно выбранного двигателя.

2.3. Метод средних перемещений

Рассмотрим разработанный автором метод средних перемещений для расчета эквивалентной нагрузки повторно-кратковременного режима [5]. Этот упрощенный метод базируется на методе эквивалентных ускорений.

Эквивалентный момент повторно-кратковременного режима работы двигателя, когда $a_n \neq a_r$ и $M_n \neq M_r$ /общий случай/, а тахограмма состоит из треугольных элементов, запишем по аналогии с /2.42/ так:

$$M_{п.к} = \sqrt{\frac{a_r M_n^2 + a_n M_r^2}{a_n + a_r}} \quad /2.44/$$

Подставив в /2.44/ значения a_n и a_r из /2.6/ и /2.7/ и перейдя к относительным значениям моментов, получим

$$M_{п.к*} = \sqrt{\frac{(M_{r*} + M_{с*})(M_{п*})^2 + (M_{п*} - M_{с*})(M_{r*})^2}{M_{п*} + M_{r*}}} \quad /2.45/$$

В позиционных электроприводах механизмов прокатных станов статическая нагрузка не оказывает существенного влияния на нагрев двигателя. Статический момент обычно составляет /0,3...0,5/ M_n .

Анализ соотношения /2.45/ показывает, что даже при больших значениях M_c /до $M_{с*} = 0,8$ / и существенных расхождениях $M_{п*}$ и M_{r*} на $\pm 0,5$ эквивалентный момент $M_{п.к*}$ двигателя изменяется до 5%. В частном

случае, когда $M_{п*} = M_{r*} = M_{п.к*}$, статическая нагрузка, как видно из /2.45/, вообще не влияет на нагрев двигателя.

Для позиционных электроприводов механизмов прокатных станов значения $M_{п*}$ и M_{r*} выбираются либо равными, либо близкими по значению. Поэтому при определении $M_{п.к*}$ таких электроприводов, работающих по треугольной тахограмме, с достаточной точностью можно принимать $M_c = 0$. В этом случае из /2.45/ следует, что

$$M_{п.к*} = \sqrt{M_{п*} M_{r*}} \quad /2.46/$$

Если тахограмма работы электропривода содержит треугольные и трапецеидальные элементы /общий случай/, то эквивалентный момент двигателя

$$M_{п.к} = \sqrt{\frac{\sum M^2 t_{ii} + \sum M^2 t_{zi}}{\sum t_i}} \quad /2.47/$$

где $\sum M^2 t_{ii}$, $\sum M^2 t_{zi}$ - эффективная нагрузка двигателя при работе соответственно по треугольным и трапецеидальным тахограммам; $\sum t_i$ - время движения привода за цикл.

Указанное малое влияние статической нагрузки позволяет без большого ущерба для точности расчета не учитывать участки с установившейся скоростью движения для трапецеидальных элементов тахограмм работы привода. Справедливость такого подхода для получения упрощенной методики проверки двигателя на нагрев доказана на многочисленных числовых расчетах конкретных механизмов.

Из расчетов методом эквивалентных ускорений при $M_c = 0$ на основании /2.35/ и /2.38/ следует:

$$\sum M^2 t_{ii} = \frac{2\sqrt{S_{кр}} \sum \sqrt{S_i}}{v_y (a_n + a_r)} (a_r M_n^2 + a_n M_r^2); \quad /2.48/$$

$$\sum M^2 t_{zi} = \frac{2m S_{кр}}{v_y (a_n + a_r)} (a_r M_n^2 + a_n M_r^2). \quad /2.49/$$

Время движения привода за цикл с треугольными трапецеидальными элементами тахограммы в соответствии с /2.24/, /2.26/, /2.34/ и /2.36/ составляет

$$\sum t_i = \frac{2}{\sqrt{a_0}} (\sum \sqrt{S_i} + m \sqrt{S_{кр}}) + t_v \quad /2.50/$$

Выражение /2.47/ с учетом /2.6/, /2.7/, /2.24/, /2.26/, /2.48/, /2.49/ после преобразований можно представить следующим образом:

$$M_{п.к*} = \sqrt{\frac{\sum \sqrt{S_i} + m \sqrt{S_{кр}}}{\sum t_i}} \sqrt{\frac{2ZV}{M_H} M_{п*} M_{т*} (M_{п*} + M_{т*})}. \quad /2.51/$$

Современный электропривод позиционных механизмов прокатных станков имеет принудительную вентиляцию, так как применение закрытых двигателей с естественным охлаждением оказывается недопустимым по нагреву. Пересчет эквивалентного момента $M_{п.к*}$, найденного для фактической продолжительности включения ϵ , к значению $M_{\epsilon 100*}$, соответствующему работе с $\epsilon = 1$ при принудительной вентиляции двигателя, производится по соотношению

$$M_{\epsilon 100*} = M_{п.к*} \sqrt{\epsilon}. \quad /2.52/$$

Подставляя в /2.52/ значение $M_{п.к*}$ из /2.51/ и учитывая, что $\epsilon = \frac{\sum t_i}{t_u}$, получаем

$$M_{\epsilon 100*} = \sqrt{\frac{\sum \sqrt{S_i} + m \sqrt{S_{кр}}}{t_u}} \sqrt{\frac{2ZV}{M_H} M_{п*} M_{т*} (M_{п*} + M_{т*})}. \quad /2.53/$$

Для многих позиционных механизмов трапецеидальные участки тахограмм либо вообще отсутствуют, либо являются единичными в большом числе программных перемещений. Это дает основание при расчете эквивалентной нагрузки не только полагать $M_c = 0$, но и вычислять эквивалентную нагрузку электропривода по среднему программному перемещению. Иными словами, можно допустить, что

$$\sum \sqrt{S_i} + m \sqrt{S_{кр}} \approx q \sqrt{S_{кр}} + m \sqrt{S_{кр}} = n \sqrt{S_{кр}}, \quad /2.54/$$

где q - число треугольных элементов тахограммы; $n = m + q$ - число включений привода за цикл; $S_{кр}$ - среднее за одно включение.

Для нажимных устройств слябингов и реверсивных толстолистовых станков горячей прокатки величину $S_{кр}$ нужно определять как среднее за один пропуск.

Обозначив относительную величину момента инерции на валу двигателя $\delta = Z/J_A$, J_A - момент инерции двигателя и деталей на его валу/, с учетом /2.54/ можно представить /2.53/ так:

$$M_{\epsilon 100*} = K_T K_Z K_H$$

где $K_T = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 S_{кр}}{t_u^2}}$ - коэффициент, определяемый параметрами технологического процесса; $K_Z = \sqrt[4]{\delta V Z_A / M_H}$ - коэффициент, зависящий от параметров выбранного электропривода и момента инерции движущихся масс рабочей машины; $K_H = \sqrt[4]{2 M_{п*} M_{т*} (M_{п*} + M_{т*})}$ - коэффициент интенсивности пускотормозных режимов электропривода.

Если двигатель по условиям нагрева выбран правильно, то он должен работать с эквивалентным моментом, не превышающим допустимого значения $M_{доп*}$, т.е.

$$M_{доп*} \geq K_T K_Z K_H. \quad /2.56/$$

По /2.56/ можно быстро и достаточно точно определить тепловую нагрузку предварительно выбранного двигателя по технологическим данным и известным параметрам механического оборудования.

В некоторых случаях необходимо также знать суммарное время движения за цикл. Из /2.50/, полагая $t_y \approx 0$ и учитывая допущение /2.54/, после преобразований можно получить, что

$$\sum t_i = \sqrt{\frac{2\pi^2 S_{кр} \delta V Z_A (M_{п*} + M_{т*})}{M_H M_{п*} M_{т*}}} = t_u K_T^2 K_Z \sqrt{\frac{2(M_{п*} + M_{т*})}{M_{п*} M_{т*}}}. \quad /2.57/$$

Рассматриваемым методом возможно также решить задачу о предельной допустимой тепловой нагрузке двигателя. Из /2.56/ определим предельный коэффициент интенсивности пуска и торможения

$$K_{и.пр} = \frac{M_{доп*}}{K_T K_Z}, \quad /2.58/$$

с помощью которого легко найти те значения $M_{п*}$ и $M_{т*}$, которые необходимо реализовать в электроприводе.

В современных системах автоматизированного управления электроприводами механизмов прокатных станков $M_{п*}$ и $M_{т*}$ поддерживаются постоянными на протяжении периодов пуска и торможения. Как уже указывалось, выбираются либо близкими, либо /как правило/ равными друг другу. При $M_{п*} = M_{т*} = M_{пт*} = const$ коэффициент

$$K_H = \sqrt[4]{4(M_{пт*})^3}. \quad /2.59/$$

Из /2.58/ и /2.59/ для условия $K_u = K_{u.пр}$ однозначно определяется значение $M_{пт*}$, при котором электропривод механизма удовлетворяет технологическим требованиям при допустимом нагреве двигателя:

$$M_{пт} = \frac{M_{доп*}}{K_T K_\Sigma} \sqrt[3]{\frac{0,25 M_{доп*}}{K_T K_\Sigma}} \quad /2.60/$$

Подставив сюда приведенные значения K_T и K_Σ , получим

$$M_{пт*} = \sqrt[3]{\frac{0,25 (M_{доп*})^4 t_{ч}^2 M_H}{\pi^2 S_{ср} \nu \delta \gamma_A}} \quad /2.61/$$

Если двигатель должен работать с предельной тепловой нагрузкой, то $M_{доп*} = 1$. Формула /2.61/ поясняет влияние технологических параметров, а также параметров механического и электрического оборудования на максимально допустимую величину $M_{пт}$.

Суммарное время движения привода за цикл при $M_{п*} = M_T = M_{пт*}$ из /2.57/ будет

$$\Sigma t_i = \frac{2 t_{ч} K_T^2 K_\Sigma^2}{\sqrt{M_{пт*}}} \quad /2.62/$$

Выбор мощности двигателей для позиционных механизмов методом средних перемещений проверен многочисленными сравнительными расчетами для различных нажимных устройств обжимных и толстолистовых станов горячей прокатки, для которых он дает достаточно точные результаты.

2.4. Метод предельно допустимого времени работы механизма

Методы эквивалентных ускорений и средних перемещений позволяют определять эквивалентную нагрузку двигателя позиционного электропривода по аналитическим формулам без построения нагрузочных диаграмм, что значительно сокращает время, расходуемое на проектирование.

Однако в ряде случаев правильность выбора мощности электропривода определяется не только допустимой тепловой нагрузкой двигателя, но и возможностью удовлетворить какие-то конкретные технологические требования.

На примере позиционного электропривода нажимного устройства реверсивного прокатного стана доказываемся предложенная А.Б.Зеленовым и В.С.Кочубинским методика расчета мощности двигателя по технологическим требованиям и тепловой нагрузке.

Для такого механизма правильно выбранный электродвигатель должен обрабатывать критическое перемещение $S_{кр}$ за время реверса прокатного стана от скорости выброса металла из валков до скорости захвата металла валками. Расчеты, выполненные для 16 различных станков, показали, что для блюмингов 900...1300, слябингов 1100...1250 время подобного реверса составляет $\Delta t = 2,4...3,5$ с; для клетей дуо и кварто реверсивных толстолистовых станков 2250...3600 $\Delta t = 1,9...3,0$ с. Поэтому электропривод нажимного устройства реверсивного прокатного стана должен обработать перемещение $S_{кр}$ за некоторое заданное технологическое время $\Delta t = 1,9...3,5$ с. Если время движения превысит заданное технологическое время Δt , то электропривод нажимного устройства будет ограничивать производительность прокатного стана, что недопустимо. Время t_i на обработку других программных перемещений $S_i < S_{кр}$ рассчитывать не надо, так как $t_i < \Delta t$, а время пауз между последующими включениями привода нажимного устройства в цикле прокатки возрастает с увеличением длины раската.

Таким образом, решение задачи расчета мощности привода нажимного устройства реверсивного прокатного стана должно учитывать не только допустимый нагрев электродвигателя за время $t_{кр} \leq \Delta t$, но и необходимость работы в требуемом динамическом режиме для обработки критического перемещения $S_{кр}$, причем расчетное технологическое время Δt должно задаваться для конкретного прокатного стана.

Нажимные устройства современных реверсивных прокатных станков имеют редукторы, передаточное число которых определяется с точки зрения оптимизации механизма по быстродействию. Дальнейшие рассуждения по расчету мощности электродвигателя нажимных устройств таких станков основываются на предположении, что передаточное число реального редуктора лежит в пределах /0,7...1,7/ $i_{опт}$, при которых быстродействие электропривода незначительно /на 15%/ отличается от максимального /см. подразд. 1.2/.

При известном передаточном числе редуктора нажимного устройства i номинальная скорость электродвигателя, соответствующая заданной скорости механизма v_M , будет $\omega_H = \nu v_M / i$ - спрямляющее число, устанавливающее связь между скоростью электродвигателя и линейной скоростью рабочего механизма. Например, для нажимного устройства с шагом винта h спрямляющее число $\nu = \frac{2\pi i}{h}$.

Передаточное число по быстродействию передачи /или близкое к ней/ можно определить по соотношению, приведенному в подразд. 1.2 / при $M_{с.мех} \approx 0$ /:

$$M_{с.мех} \approx 0 \quad /:$$

$$i \approx i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_M}{J_A}}$$

Тогда выбираемый для привода электродвигатель должен иметь момент инерции

$$J_A = \frac{J_M}{i^2},$$

а суммарный момент инерции на валу двигателя

$$J_{\Sigma} = J_A + \frac{J_M}{i_{\text{опт}}^2} = \frac{2J_M}{i_{\text{опт}}^2} \quad /2.63/$$

По найденному таким образом значению J_{Σ} и скорости ω_H , соответствующей критическому перемещению $S_{\text{кр}}$, определяется необходимый динамический момент электродвигателя, Дж:

$$M = M_i = \lambda_M M_H = J_{\Sigma} \frac{\omega_H}{\Delta t / 2} \quad /2.64/$$

где λ_M - перегрузочная способность электродвигателя по моменту; $\frac{\Delta t}{2} = \frac{t_{\text{кр}}}{2}$ - время разгона двигателя нажимного устройства /равное времени его торможения/ до установившейся скорости ω_H , необходимой для отработки $S_{\text{кр}}$.

По максимальному времени движения Δt , задаваемому технологическим процессом номинальной скорости ω_H и найденному в соответствии с /2.63/ суммарному моменту инерции J_{Σ} находят необходимую расчетную номинальную мощность электродвигателя, кВт:

$$P_{\text{н.р}} = M_H \omega_H = \frac{4J_M \omega_H^2}{i_{\text{опт}}^2 \lambda_M \Delta t} \cdot 10^{-3} \quad /2.65/$$

Преобразуем /2.65/ с учетом указанного значения спрямляющего числа γ и зависимости $\omega_H = \gamma v_M$:

$$P_{\text{н.р}} = \frac{16 \pi^2 J_M v_M^2}{h^2 \lambda_M \Delta t} \cdot 10^{-3} \quad /2.66/$$

Таким образом, по /2.66/ на основании данных механического оборудования (J_M, h) и известных технологических требований ($v_M, \Delta t$) определяем расчетную номинальную мощность двигателя с известной перегрузочной способностью (λ_M), обеспечивающей перемещение нажимного

устройства за заданное максимально возможное время Δt . При проектировании системы управления установку регулятора тока /момента/ следует выбирать в соответствии с принятым значением λ_M . После выбора двигателя по рассчитанной мощности следует также проверить на оптимальность передаточное число редуктора, что подтвердит возможность использования /2.66/.

Например, для клетки дуо стана 2800 нажимное устройство имеет $i = 11,38$; $J_M = 4354 \text{ Дж}\cdot\text{с}^2$; $v_M = 53 \text{ мм/с}$; $h = 48 \text{ мм}$; $\Delta t = 2,2 \text{ с}$. При $\lambda_M = 2$ номинальная расчетная мощность двигателя в соответствии с /2.66/ составит

$$P_{\text{н.р}} = \frac{16 \pi \cdot 4354 \cdot 0,053^2}{0,048 \cdot 2 \cdot 2,2} = 190,3 \text{ кВт.}$$

На нажимном устройстве действующего толстолистового стана установлены два электродвигателя по 100 кВт с номинальной частотой $n_H = 750 \text{ об/мин}$, момент инерции каждого двигателя $J_A = 10,25 \text{ Дж}\cdot\text{с}^2$. При указанных данных оптимальное передаточное число редуктора

$$i_{\text{опт}} \approx \sqrt{\frac{4354}{2 \cdot 10,25}} \approx 14,57.$$

Фактическое передаточное число составляет $0,78 i_{\text{опт}}$, что лежит в указанных допустимых пределах.

Расчет мощности по /2.66/ не гарантирует двигатель от перегрева при реальном цикле повторно-кратковременного режима. Найдем условия, при выполнении которых расчетная мощность привода не только обеспечивает заданный технологический режим, но и гарантирует работу двигателя без перегрева.

В соответствии с методом средних перемещений /см. подразд. 2.3/ относительное значение пускового /тормозного/ момента двигателя при полном его использовании по нагреву вычисляется по /2.61/.

Определим из /2.61/ номинальную мощность двигателя $P_H = M_H \omega_H$ и сравним ее с расчетной номинальной мощностью $P_{\text{н.р}}$, получаемой по /2.66/. Для этого преобразуем /2.61/, учтя, что $M_H = \frac{\lambda_M M_N}{\lambda_M} = \lambda_M M_N$. Двигатель работает с полной тепловой нагрузкой $\epsilon = \frac{2\pi i}{\Delta t n}$. $S_{\text{кр}} \approx S_{\text{кр}} = v_M \Delta t$ /так как $M_H = M_T$ /. $\gamma = \frac{2\pi i}{h}$.

$$8J_A = J_{\Sigma} = \frac{2J_M}{i^2}$$

После преобразований /2.61/ запишем

$$M_H = \frac{16 \pi^2 J_M v_M \epsilon^2}{k \Delta t i} \lambda_M^3 \quad /2.67/$$

Так как $P_H = M_H \omega_H = M_H v_M = \frac{M_H 2 \pi i v_M}{h}$, то с учетом /2.67/ получим, кВт:

$$P_H = \frac{16 \pi^2 J_M v_M^2}{h^2 \Delta t} 2 \epsilon^2 \lambda_M^3 \cdot 10^{-3} \quad /2.68/$$

Из сравнения /2.66/ и /2.68/ следует, что

$$P_H = P_{H.P.} 2 \epsilon^2 \lambda_M^3 \quad /2.69/$$

При $2 \epsilon^2 \lambda^3 < 1$ номинальная расчетная мощность $P_{H.P.}$ найденная по /2.66/, обеспечивает не только требуемую с точки зрения технологии динамику механизма, но и работу двигателя без перегрева.

При реальных режимах работы электроприводов нажимных устройств реверсивных прокатных станов $\epsilon \approx 0,2 \dots 0,5$, а кратность пускового и тормозного момента лежит в пределах $\lambda_M = 1,5 \dots 2,5$. Таким образом, возможно, что коэффициент $2 \epsilon^2 \lambda^3 < 1$. Поэтому в каждом конкретном случае для гарантии работы двигателя без перегрева при обеспечении перемещения механизма за заданное технологическое время необходимо, чтобы $2 \epsilon^2 \lambda^3 \leq 1$. Например, для приведенного примера нажимного устройства толстолистового стана $\epsilon = 0,28$. В этом случае работе двигателя без перегрева возможна при $\lambda_M \leq 1,85$.



Рис. 2.6. Зависимость $\lambda = f(\epsilon)$

На рис. 2.6 показана кривая $\lambda = f(\epsilon)$, построенная по соотношению $2 \epsilon^2 \lambda^3 = 1$. Эта нелинейная зависимость хорошо иллюстрирует возможность работы по заданной технологии при допустимом перегреве двигателя.

3. НАЖИМНЫЕ УСТРОЙСТВА /МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ ВАЛКОВ/

3.1. Классификация и кинематические схемы

Установка валков прокатного стана необходима для регулирования их взаимного положения, обеспечивающего прокатку профиля заданных размеров, а также для корректировки положения валков по отношению к уровню рольгангов. Расстояние между валками прокатных станов изменяется с помощью специальных установочных механизмов, перемещающих верхний валок. В станах трио есть также механизмы для перемещения среднего валка. Конструкция и тип электропривода установочных механизмов, называемых нажимными устройствами, зависят от значения и скорости перемещения валка, числа этих перемещений в час и относительной продолжительности включения. В табл. 3.1 приведены данные о скорости перемещения верхнего валка для различных прокатных станов [8].

Таблица 3.1

Скорость перемещения верхнего валка различных прокатных станов

| Тип стана | Скорость перемещения верхнего валка, мм/с |
|--|---|
| Блюминг | |
| 1000-1475 | 80...200 |
| 1100 | 50...120 |
| 800-900 | 40...80 |
| трио 700-800 | 30...60 |
| Толсто- и среднелистовые станы: | |
| черновые клетки | 12...25 |
| чистовые клетки | 5...12 |
| Сортовой стан /с постоянным положением калибров/ | 2...5 |
| Трубопрокатный прошивной стан | 1...2 |
| Группы клеток тонколистовых станов горячей прокатки: | |
| черновые | 0,3...0,5 |
| чистовые | 0,1...0,2 |
| Непрерывные и реверсивные станы холодной прокатки | 0,05...0,2 |
| Реверсивные станы холодной прокатки тонкой ленты | 0,01...0,02 |

Для станов с большим ходом верхнего валка принимаются соответственно большие скорости перемещения. В зависимости от скорости перемещения валков и типа привода различают следующие механизмы для установки верхнего валка.

1. Установочные механизмы с ручным приводом /сохранившиеся старые сортовые станы, работающие с постоянным взаимным расположением калибров; небольшие станы для горячей прокатки тонких листов и полос/.

2. Быстроходные установочные механизмы с электроприводом /блужинга, слябинги, универсальные станы, толсто- и среднелистовые станы, некоторые сортовые станы, работающие с постоянным взаимным расположением калибров/. Эти механизмы обеспечивают скорость перемещения верхнего валка $> 0,2 \dots 1,0$ мм/с и применяются для станов с относительно большой высотой подъема верхнего валка, достигающей у современных обжимных станов до значения, превышающего 1500 мм. Поэтому во всех механизмах данного типа верхний валок перемещается с помощью нажимных винтов.

3. Тихоходные установочные механизмы с электроприводом /станы дуго и кварто для холодной и горячей прокатки листов и ленты/. Высота подъема валков для этих механизмов - не более 100...200 мм, а скорость перемещения верхнего валка $< 1,0 \dots 0,2$ мм/с, что вызывается необходимостью получения малого значения отдельного перемещения /до 0,01 мм/ а также точной установки валков. Тихоходные установочные механизмы имеют громоздкие редукторы с передаточным числом 1500...2000. Как правило, электропривод - двухдвигательный, причем предусматривается возможность раздельного движения винтов /между двумя двигателями устанавливается электромагнитная соединительная муфта/, что особенно необходимо для непрерывных листопрокатных станов.

Во время холостого хода стана подушки верхнего валка должны быть постоянно прижаты к нажимным винтам, а винты - к гайкам, чтобы не возникали удары при входе прокатываемого металла в клеть. Поэтому механизмы для установки валков снабжаются специальными уравновешивающими устройствами. Усилие уравновешивания, направленное по оси винта снизу вверх, выбирается таким образом, чтобы оно было на 20...40% больше веса уравновешиваемых деталей /верхний валок, его подушки, нажимные винты, предохранительные станы и др./.

На современных прокатных станах применяется один из четырех способов уравновешивания: а/ пружинное обычное; б/ грузовое; в/ гидравлическое; г/ пружинное с обратными винтами.

Обычное пружинное уравновешивание, которое может применяться при высоте подъема валка не более 50...100 мм, используется очень редко /для сортовых станов с постоянным взаимным расположением калибров/.

Грузовое уравновешивание широко используется для быстроходных установочных механизмов при значительных перемещениях валка. Контргрузы, расположенные под рабочей клетью, с помощью рычагов и штанг передают усилие уравновешивания верхнему валку. Эта система уравновешивания требует некоторого углубления под фундаментом рабочей клетки, однако благодаря простоте конструкции и надежности в работе она получила наибольшее распространение.

На рис.3.1 показана кинематическая схема нажимного устройства блужинга 1000 и даны основные параметры передач. Применение двух электродвигателей вместо одного большей мощности объясняется стремлением понизить суммарный момент инерции привода и тем самым улучшить его динамические свойства, что особенно важно при большой частоте включений в час [1; 2]. Кроме того, двухдвигательный электропривод получается более компактным и надежным, при выходе из строя одного электродвигателя можно продолжать работу с половинной мощностью*. Муфты сцепления позволяют воздействовать двумя электродвигателями на один нажимной винт, что иногда необходимо при его заклинивании.

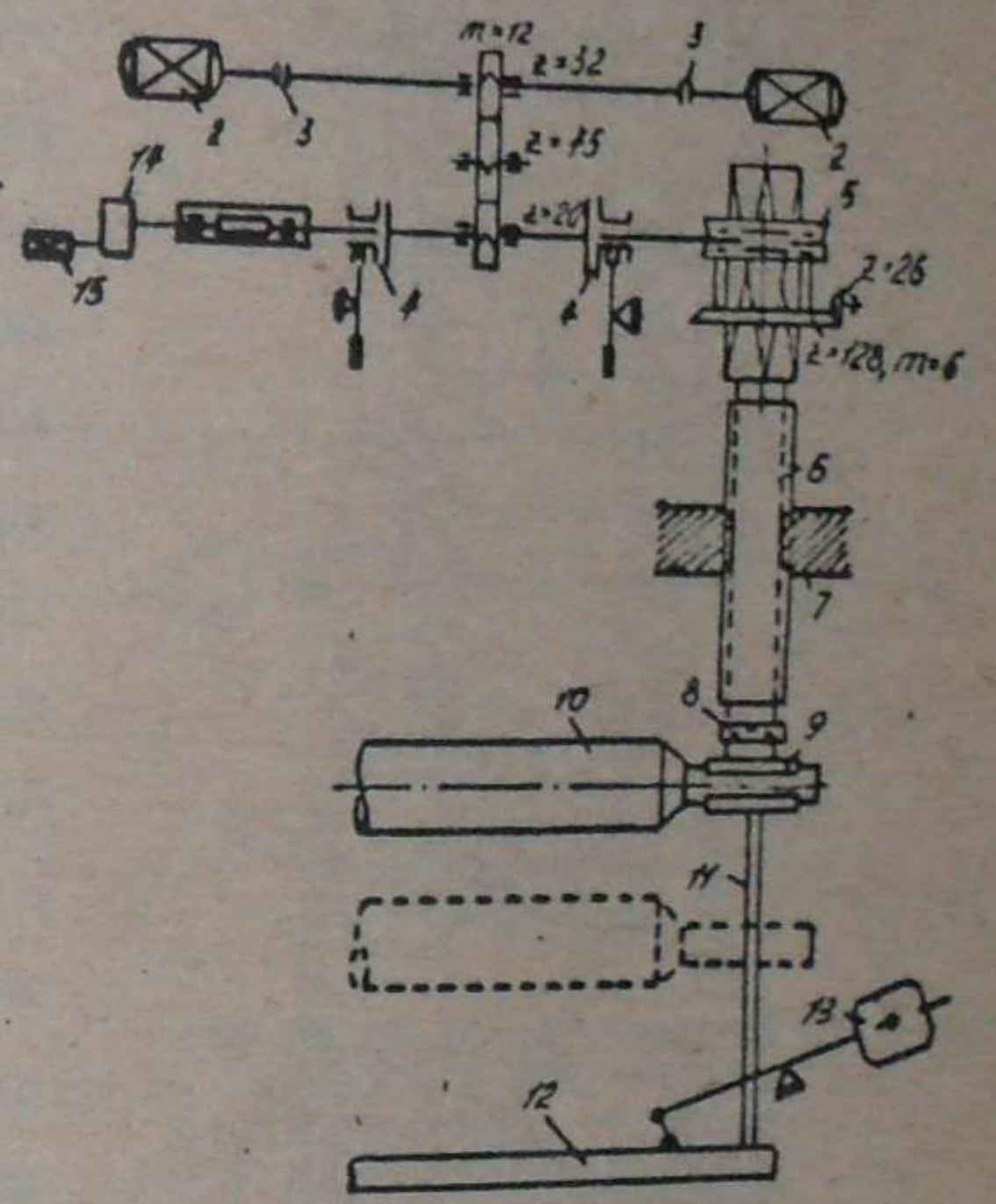


Рис.3.1. Кинематическая схема механизма для установки верхнего валка блужинга 1000: 1 - электродвигатель; 2 - зубчатая муфта; 3 - муфта сцепления; 4 - червячная передача; 5 - нажимной винт; 6 - гайка; 7 - предохранительный стакан и подпятник; 8 - подушка валка; 9 - верхний валок; 10 - штанга уравновешивающего устройства; 11 - траверса; 12 - контргруз; 13 - редуктор командоаппарата; 14 - командоаппарат для ограничения крайнего верхнего положения нажимного винта

* По этим же причинам двухдвигательный электропривод применяется и для других механизмов прокатных станов /рольганги, манипуляторы и др./

Червячный редуктор для передачи вращения нажимным винтам устанавливается только вследствие перекрещивания осей электродвигателей и нажимных винтов. Наличие червячных редукторов снижает КПД всей передачи и делает ее более громоздкой.

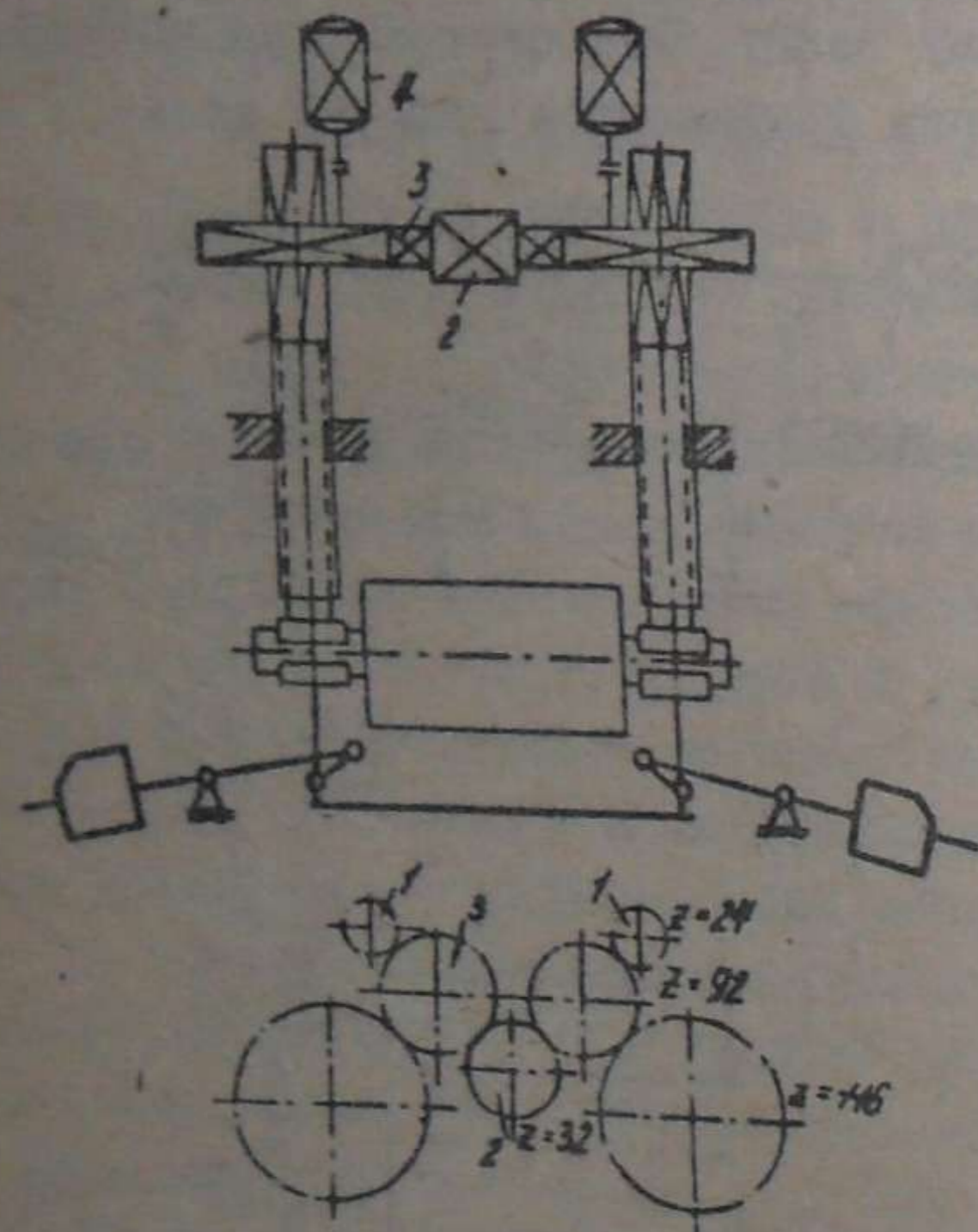


Рис.3.2. Кинематическая схема механизма для установки верхнего горизонтального вала слябинга 1150: 1 - шестерня электродвигателя; 2 - разъединительная шестерня; 3 - промежуточная шестерня; 4 - электродвигатель

Гидравлическое уравнивание реализуется с помощью одного или четырех гидравлических цилиндров, устанавливаемых в верхней части рабочей клетки. На рис.3.3 показан один из вариантов схемы гидравлического уравнивания. Плунжеры гидравлических цилиндров соединяются с траверсой, которая с помощью продольных тяг связана с подушкой верхнего вала. Развиваемое плунжером усилие должно составлять 1,2...1,4 веса уравниваемых деталей. Гидравлические цилиндры сообщаются с воздушным аккумулятором, который предохраняет систему уравнивания от резких гидравлических толчков. Гидравлическое уравнивание получило наибольшее распространение для крупных листопрокатных станков.

Пружинное уравнивание с обратными винтами и пружинами, опирающимися на подвижные гайки, позволяет упростить фундамент под клетью. На рис.3.4 показана кинематическая схема уравнивающего

В последние годы разработан новый механизм установки верхнего вала блюминга 1150, позволяющий осуществить передачу движения от двух вертикальных электродвигателей к нажимным винтам без червячных редукторов /рис.3.2/. Эта схема передачи проще и имеет более высокий КПД. Разделительная шестерня с помощью гидравлического цилиндра может подниматься и выходить из зацепления с промежуточными зубчатыми колесами. При этом выполняется независимое движение нажимных винтов.

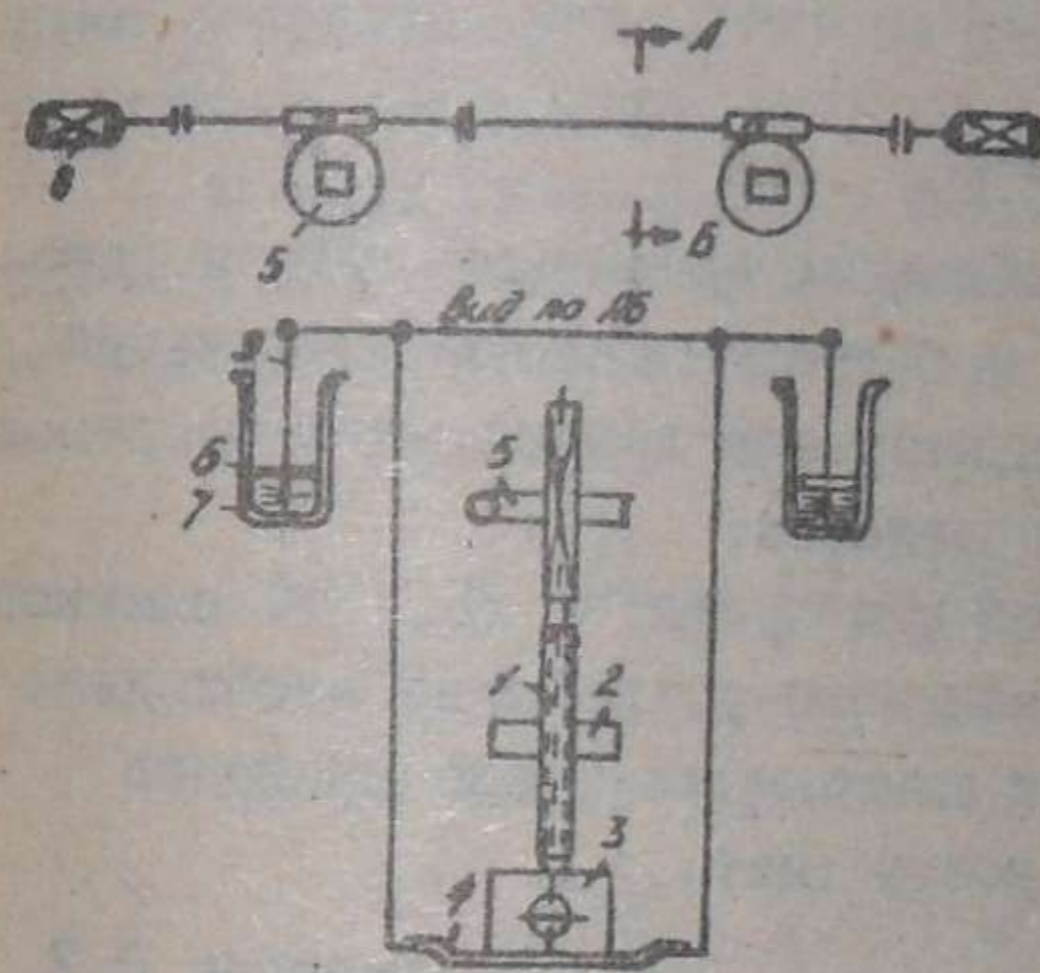


Рис.3.3. Кинематическая схема механизма для установки с гидравлическим уравниванием: 1 - нажимной винт; 2 - гайка; 3 - подушка вала; 4 - бугель; 5 - червячная передача; 6 - плунжер; 7 - гидроцилиндр; 8 - электродвигатель; 9 - траверса системы уравнивания

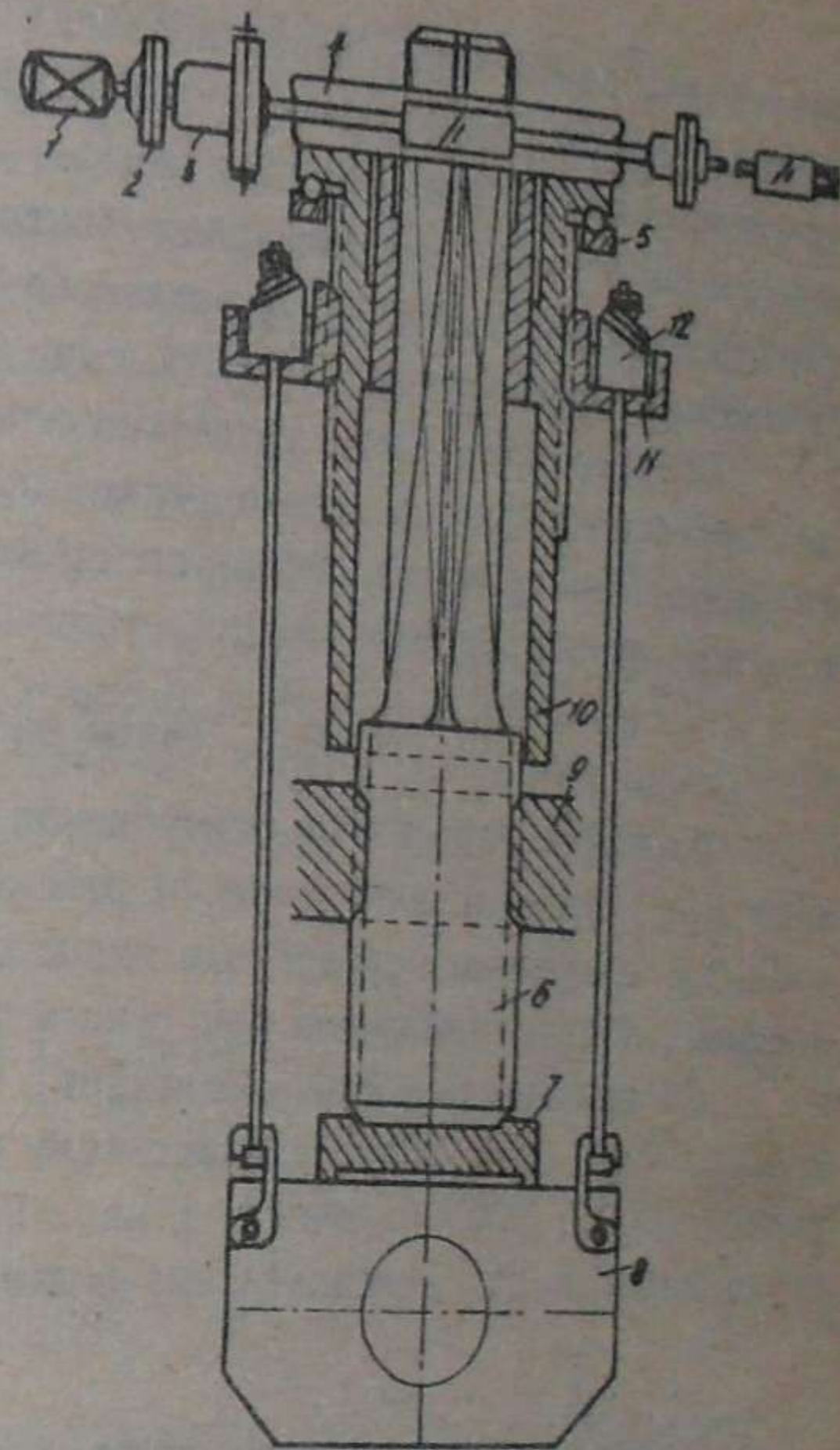


Рис.3.4. Кинематическая схема механизма для установки верхнего вала с пружинным уравниванием при помощи обратных винтов: 1 - электродвигатель; 2 - соединительная муфта; 3 - муфта предельного момента; 4 - червячная передача; 5 - опорный подшипник; 6 - нажимной винт; 7 - предохранительный стакан; 8 - подушка вала; 9 - гайка нажимного винта; 10 - полый обратный винт; 11 - траверса /подвижная опорная гайка/; 12 - уравнивающая пружина

устройства этого типа. Кроме нажимных винтов имеются так называемые обратные винты /полые, с обратным направлением навивки/. Шаг резьбы их равен шагу резьбы нажимных винтов. Это обуславливает равенство поступательных скоростей нажимного винта и подвижной опорной гайки, на которой покоится пружина, удерживающая подушку валка. Усилие уравновешивающих пружин на 20...40% больше веса уравновешиваемых деталей.

Система пружинного уравновешивания с обратными винтами в настоящее время применяется весьма редко, в основном из-за сложности конструкции, значительных потерь на трение в резьбе обратных винтов и большого износа опорных гаек.

3.2. Режим работы

Нажимные устройства реверсивных обжимных прокатных станков работают в повторно-кратковременном режиме с большой частотой включений. В табл. 3.2 приведены усредненные экспериментальные данные электропривода нажимных винтов алюминия при ручном управлении.

Из приведенных данных следует, что при прокатке 45...50 слитков в 13...17 пропусков электродвигателю нажимного устройства необходимо делать 1650...2000 включений в час. При уменьшении числа проходов продолжительность включения еще более возрастает.

Таблица 3.2

Режим работы электропривода нажимных устройств алюминия

| Величина | Число проходов | | | |
|---|----------------|----|----|----|
| | 17 | 15 | 13 | 11 |
| Число включений двигателей на один слиток | | | | |
| Продолжительность включений /ПВ/ двигателей на один слиток, % | 49 | 41 | 34 | 29 |
| | 49 | 56 | 64 | 71 |

В непрерывных и реверсивных станах холодной прокатки, а также в чистовых клетях непрерывных тонколистовых станков горячей прокатки верхний валок в процессе прокатки перемещается. Число включений в час электропривода нажимных устройств этих станков при ручном управлении составляет 150...200, а для станков с системой автоматического регулирования толщины металла воздействием на нажимные винты ПВ = 40...50% и число включений в час составляет до 2000.

3.3. Расчет моментов статических сопротивлений

При вращении нажимных винтов момент статического сопротивления движению создается силами трения: в шлицах и нарезке нажимных винтов, в пятах нажимных винтов, в нарезке обратных винтов /при системе уравновешивания с обратными винтами/, в опорных подшипниках и направляющих, по которым скользят подушки нажимных винтов и траверсы уравновешивающего устройства.

Поскольку верхний валок обычно перемещается во время пауз /металл не прокатывается/, то усилие давления металла на валки при расчете электропривода устройств не учитывается /за исключением нажимных устройств листопрокатных станков горячей и холодной прокатки/.

Момент статического сопротивления, отнесенный к валу электродвигателя, определяется для различных направлений движения верхнего валка по следующим соотношениям, Н·м:

при опускании верхнего валка

$$M_c = 1,1 (M_B + M'_B + M_{н.т}) \frac{1}{i\eta}; \quad /3.1/$$

при подъеме верхнего валка

$$M_c = 1,1 (M_B + M'_B + M_{н.т}) \frac{1}{i\eta}; \quad /3.2/$$

где M_B, M'_B - момент трения в нарезке двух соответственно нажимных и обратных винтов [$M_B (M'_B)$ при опускании и $M_B (M'_B)$ при подъеме верхнего валка], Н·м; $M_{н.т}$ - момент трения в пятах нажимных винтов, Н·м; i - передаточное число редуктора; η - КПД передач.

Коэффициент 1,1 учитывает трение подушек о направляющие, трение в опорных подшипниках и прочие неучтенные сопротивления.

Момент трения в нарезках нажимных и обратных винтов определяется следующим образом:

$$M_B = \left[P_y - g(m_B + 2m_{н.в}) \right] \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho + d) \cdot 10^{-3}; \quad /3.3/$$

$$M_B = \left[P_y - g(m_B + 2m_{н.в}) \right] \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho - d) \cdot 10^{-3}; \quad /3.4/$$

$$M'_B = \left[P_y + g m_{тр}^2 \right] \frac{d'_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho' - d') \cdot 10^{-3}; \quad /3.5/$$

$$M'_B = \left[P_y + 2g m_{тр} \right] \frac{d'_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho' + d') \cdot 10^{-3}; \quad /3.6/$$

где P_y - усилие, действующее на нажимные винты;

$$P_y = (1,2 \dots 1,4) g \sum m; \quad /3.7/$$

m_B - масса верхнего вала с подушками, опорными стаканами и другими деталями, кг; $m_{н.в}$ - масса нажимного винта, кг; $m_{тр}$ - масса траверсы, движущейся по обратному винту и служащей опорой для пружины системы уравновешивания /см. рис.3.4/, кг; g - ускорение свободного падения / $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ /; $\sum m$ - суммарная масса уравновешиваемых деталей, кг:

$$\sum m = m_B + 2 m_{н.в}; \quad /3.8/$$

d_{cp}, d'_{cp} - средний диаметр нарезки соответственно нажимного и обратного винта, мм; α, α' - угол подъема винтовой линии нарезки соответственно нажимного и обратного винта; ρ, ρ' - угол трения в нарезке соответственно нажимного и обратного винта:

$$\operatorname{tg} \rho = \mu; \quad \operatorname{tg} \rho' = \mu'. \quad /3.9/$$

Коэффициент трения в резьбе при нормальных условиях смазки при $\rho = \rho' = 5^\circ 40'$ равен 0,1 /трение стали по бронзе/.

Если нажимной или обратный винт имеет не прямоугольную, а трапециевидную нарезку, то необходимо учитывать угол скоса резьбы β . В этом случае расчет ведется по приведенному коэффициенту трения

$$\mu_{пр} = \frac{\mu}{\cos \beta}. \quad /3.10/$$

Момент трения в пятах нажимных винтов*

$$M_{н.т} = (P_y - g m_B) \frac{d_n}{3} \mu_n \cdot 10^{-3}, \quad /3.11/$$

где d_n - диаметр пяты, мм; μ_n - коэффициент трения в пяте, принимаемый равным 0,12...0,18 /трение стали по чугуну/.

Если механизм установки верхнего вала не имеет системы уравновешивания с обратными винтами, то /3.1/ и /3.2/ соответственно упрощаются ($\uparrow M'_c = 0$ и $\downarrow M'_c = 0$).

Для некоторых расчетов, например для определения оптимального передаточного числа редуктора, пользуются значением среднего момента статического сопротивления

$$M_c = \frac{\uparrow M_c + \downarrow M_c}{2}. \quad /3.12/$$

* Для самотормозящих нажимных винтов, т.е. при $\alpha < \rho$.

3.4. Расчет динамических моментов и ускорений

Динамический момент на валу электродвигателя нажимного устройства определяется из уравнения движения, Н·м:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} = M \mp M_c, \quad /3.13/$$

где J - суммарный момент инерции, приведенный к валу электродвигателя, Н·м·с²; M - момент, создаваемый на валу двигателя, Н·м; M_c - момент статического сопротивления, приведенный к валу двигателя и равный $\uparrow M_c$ или $\downarrow M_c$ при движении валков соответственно вверх или вниз, Н·м.

Ускорение электродвигателя из /3.13/, $1/\text{с}^2$:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M \mp M_c}{J}. \quad /3.14/$$

Линейное ускорение или замедление нажимных винтов (a), необходимое при расчете электропривода /см. подразд.2.2/, определяется следующим образом. При установившемся движении механизма нажимной винт делает один оборот за время, с:

$$t = \frac{2\pi}{\omega_B}, \quad /3.15/$$

где ω_B - угловая скорость нажимного винта, с⁻¹.

За это же время, двигаясь со скоростью v_B (мм/с), нажимной винт совершит линейное перемещение, равное шагу нарезки h :

$$t = \frac{h}{v_B}. \quad /3.16/$$

Приравняв /3.15/ и /3.16/, получим, мм/с:

$$v = \frac{h}{2\pi} \omega_B. \quad /3.17/$$

Следовательно, линейное ускорение нажимного винта

$$a = \frac{dv_B}{dt} = \frac{h}{2\pi} \frac{d\omega_B}{dt}. \quad /3.18/$$

Подставив в /3.18/ значение ускорения электродвигателя из /3.14/, получим для периода соответственно пуска и торможения следующие расчетные формулы для определения линейного ускорения и замедления нажимных винтов, мм/с²:

$$a_n = \frac{h}{2\pi i} \frac{M_n - M_c}{J}; \quad /3.19/$$

$$a_T = \frac{k}{2\pi i} \frac{M_T + M_C}{Z}$$

/3.20/

где M_C и M_T - соответственно пусковой и тормозной момент электродвигателя, Н·м.

3.5. Пример расчета мощности электродвигателей нажимного устройства с грузовым уравниванием

3.5.1. Исходные данные

Кинематическая схема нажимного устройства обжимной клетки 800 раль-собакочного стана изображена на рис.3.5. Нажимные винты перемещаются от двух электродвигателей постоянного тока. Данные механической части нажимного устройства: общее передаточное число редукторов $i = i_1 i_2 = 0,535 \cdot 6 = 3,2$; общий КПД редукторов $\eta = 0,72$; максимальная скорость перемещения нажимных винтов $v_s = 100$ мм/с; средний диаметр нажимного винта $d_{cp} = 272,7$ мм; шаг нажимного винта $h = 235$ мм; угол подъема винтовой линии нажимного винта $\alpha = 2^\circ 40'$; угол трения в нарезке нажимного винта /резьба прямая/ $\rho = 5^\circ 40'$; коэффициент трения в пяте $\mu_n = 0,15$; масса нажимного винта $m_{н.в} = 1600$ кг; масса верхнего вала с подушками, стаканами и др. $m_s = 26800$ кг; усилие

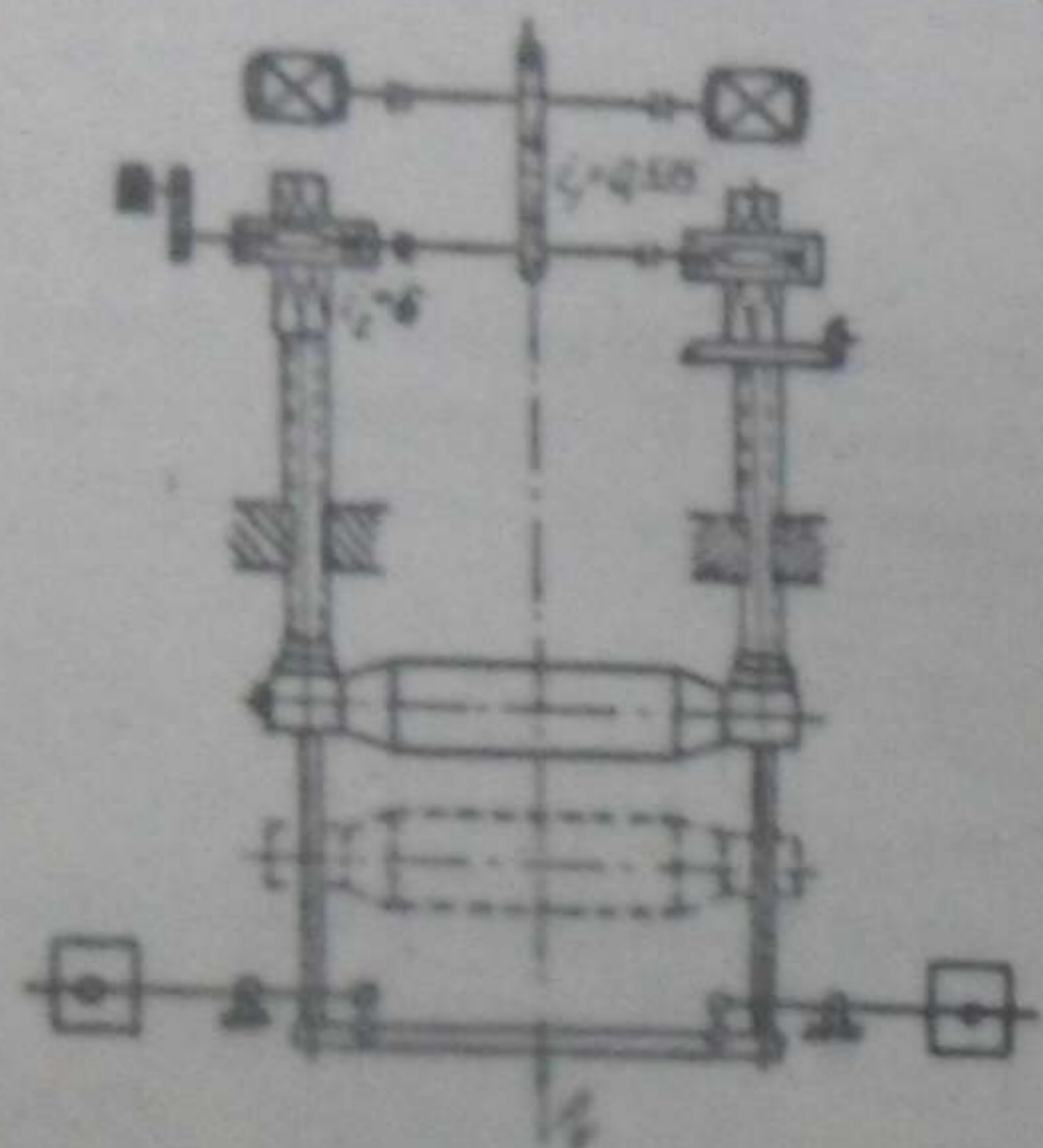


Рис.3.5. Кинематическая схема нажимного устройства обжимной клетки 800 раль-собакочного стана

уравнивания /на два винта/ $P_y = 392400$ Н; максимальный ход винта $H = 780$ мм.

Нажимное устройство при наиболее тяжелом режиме работает по программе перемещений, приведенной в табл.3.3. Цикл прокатки $t_{ц} = 37$ с.

Для рассматриваемого нажимного устройства предварительно выбраны два электродвигателя постоянного тока со следующими данными:

100 кВт, $\eta = 25\%$, 220 В, 500 А, 475 об/мин, $M_{max}/M_n = 2,8$, $GD^2 = 100,5$ кг·м², возбуждение - параллельное, исполнение - закрытое. Суммарный момент инерции всех движущихся частей механизма, приведенный к валу электродвигателей, составляет $Z = 126$ Н·м·с². Суммарный момент инерции вращающихся деталей на оси электродвигателей /якоря двух электродвигателей, две муфты, востерая цилиндрического редуктора/ $Z_A = 70,75$ Н·м·с².

Программа перемещений нажимного устройства

Таблица 3.3

| Пропуск, после которого следует перемещение | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-----|----|-----|----|----|
| Направление движения | ↓ | ↑ | ↓ | ↓ | ↑ |
| Перемещение верхнего вала, мм | 45 | 88 | 70 | 58 | 85 |
| Допустимое время перемещения /пауза между пропусками/, с | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 10 |

3.5.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Момент статических сопротивлений, приведенный к валу электродвигателей, составит:

а/ при опускании верхнего вала

$$M_C = 1,1 \left[(P_y - g(m_s + 2m_{н.в})) \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho + \alpha) + (P_y - g m_s) \frac{d_n}{3} \mu_n \right] \frac{10^{-3}}{i \eta} = 1,1 \left[(392400 - 981(26800 + 2 \cdot 1600)) \frac{272,7}{2} \operatorname{tg}(5^\circ 40' + 2^\circ 40') + (392400 - 981 \cdot 26800) \frac{235}{3} \cdot 0,15 \right] \cdot \frac{10^{-3}}{3,2 \cdot 0,72} = 1657,9 \text{ Н·м}$$

б/ при подъеме верхнего вала

$$M_C = 1,1 \left[(P_y - g(m_s + 2m_{н.в})) \frac{d_{cp}}{2} \operatorname{tg}(\rho - \alpha) + (P_y - g m_s) \frac{d_n}{3} \mu_n \right] \frac{10^{-3}}{i \eta} = 1,1 \left[(392400 - 981(26800 + 2 \cdot 1600)) \frac{272,7}{2} \operatorname{tg}(5^\circ 40' - 2^\circ 40') + (392400 - 981 \cdot 26800) \cdot \frac{235}{3} \cdot 0,15 \right] \frac{10^{-3}}{3,2 \cdot 0,72} = 1054,6 \text{ Н·м}$$

и/или средний статический момент

$$M_c = \frac{1M_c + 1M_c}{2} = \frac{1657,9 + 1054,6}{2} = 1356,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

3.5.3. Определение оптимального передаточного числа редуктора

Оптимальное передаточное число редуктора определяется по /1.6/ - /1.8/. Величины, входящие в эти выражения, имеют следующие числовые значения:

$$M_{cm} = M_c i \eta = 1356,3 \cdot 3,2 \cdot 0,72 = 3126 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$\frac{Z_M}{Z_A} = \frac{(Z - Z_A) i^2}{Z_A} = \frac{(126 - 70,75) 3,2^2}{70,75} = 8.$$

Принимаем, что в периоды пуска и торможения на валу двигателей действует вращающий момент, равный $2 \cdot 2 M_M$ /для всех двигателей/, т.е. $M_A = 8046 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Подставив эти числовые значения в указанные формулы, получим

$$i_{01} = \frac{M_{cm}}{2M_A} + \sqrt{\left(\frac{M_{cm}}{2M_A}\right)^2 + \frac{Z_M}{Z_A}} = \frac{3126}{0,72 \cdot 8046} + \sqrt{\left(\frac{3126}{0,72 \cdot 8046}\right)^2 + 8} = 3,42;$$

$$i_{02} = \frac{-M_{cm}}{M_A} + \sqrt{\left(\frac{M_{cm}}{M_A}\right)^2 + \frac{Z_M}{Z_A}} = \frac{-3126 \cdot 0,72}{8046} + \sqrt{\left(\frac{3126 \cdot 0,72}{8046}\right)^2 + 8} = 2,56;$$

$$i_0 = \frac{i_{01} + i_{02}}{2} = \frac{3,42 + 2,56}{2} = 3,0.$$

Фактическое передаточное число редуктора для рассчитываемого механизма равно 3,2, что несколько больше. Однако это не вызовет существенного ухудшения работы механизма, так как незначительное отклонение от i_0 в сторону большего не оказывает заметного влияния на уменьшение ускорения механизма /см. рис.1.2/.

3.5.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Для проверки мощности предварительно выбранного электродвигателя может быть использован метод эквивалентных ускорений. В табл.3.4 приведены исходные данные и расчетные формулы для определения ускорений и критических перемещений, необходимые для дальнейших вычислений.

Таблица 3.4
Расчет ускорений и критического перемещения нажимного устройства

| Исходные данные для расчета | Расчетная величина и формула | Опускание нажимных винтов | Подъем нажимных винтов |
|---|--|---------------------------|------------------------|
| $h = 40 \text{ мм}$ $i = 3,2$ $M_M = 8046 \text{ Н}\cdot\text{м}$ | Линейное ускорение нажимных винтов, $\text{мм}/\text{с}^2$: $a_n = \frac{h}{2\pi i} \frac{M_M - 11M_c}{Z}$ | 100,5 | 110,4 |
| $1M_c = 1657,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$ $1M_c = 1054,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ $M_T = 8046 \text{ Н}\cdot\text{м}$ | Линейное замедление нажимных винтов, $\text{мм}/\text{с}^2$: $a_r = \frac{h}{2\pi i} \frac{M_T + 11M_c}{Z}$ | 153,3 | 143,8 |
| $Z = 126 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ | Эквивалентное линейное ускорение нажимных винтов, $\text{мм}/\text{с}^2$: $a_z = \frac{2a_n a_r}{a_n + a_r}$ | 121,4 | 124,9 |
| $v_0 = 100 \text{ мм}/\text{с}$ | Критическое перемещение нажимных винтов, мм : $S_{кр} = \frac{v_0^2}{a_z}$ | 82,4 | 80,1 |

Как следует из табл.3.4, критическое перемещение нажимных винтов больше любого программного перемещения. Следовательно, электропривод рассчитываемого нажимного устройства при данном графике работы никогда не разгоняется до установившейся скорости, а работает лишь в режиме пусков и торможений. Нагрев электродвигателя в основном определяется в этом случае пусковыми и тормозными токами. Расчет относительной продолжительности включения электродвигателя для заданной программы перемещений нажимного устройства приведен в табл.3.5.

Таблица 3.5
Расчет времени работы и относительной продолжительности
включения нажимного устройства

| Расчетные величины и формулы | Перемещения нажимных винтов S_i, S_{up} | | | | |
|---|---|--------------|-------------|--------------|-------|
| | при опускании | | при подъеме | | |
| | S_i | $\sqrt{S_i}$ | S_i | $\sqrt{S_i}$ | |
| Номер | 1 | 45 | 6,71 | - | - |
| пропуска при прокат- ке | 2 | - | - | 88 | 9,38 |
| | 3 | 70 | 8,37 | - | - |
| | 4 | 58 | 7,62 | - | - |
| | 5 | - | - | 85 | 9,22 |
| Суммарное перемещение ΣS_i , мм | | 173 | - | 173 | - |
| $\Sigma \sqrt{S_i}$ | | - | 22,70 | - | 18,60 |
| Эквивалентное ускорение /см. табл.3.4; a_3 , мм/с ² / | | 121,4 | - | 124,9 | - |
| Суммарное время работы привода за периоды пуска и торможения $\Sigma t_i = \frac{2}{a_3} \Sigma \sqrt{S_i}$ | | 4,12 | - | 3,33 | - |
| Относительная продолжительность включения привода $\epsilon = \frac{\Sigma t_i}{t_n}; \Sigma t_i = 7,45$ с; $t_n = 37$ с | | - | 0,2 | - | - |

Поскольку для электропривода нажимного устройства выбран электро-
двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, то сила тока
его якоря пропорциональна электромагнитному моменту. В периоды пуска и
торможения $I_a = I_r = 2 I_n = 2 \cdot 500 = 1000$ А.
Эквивалентный ток коротко-кратковременного режима электродвига-
теля при $I_a = I_r = I_{a,r}$ и $S < S_{up}$ в соответствии с /2.42/ будет $I_{\epsilon} =$
 $= I_{a,r} = 1000$ А.

В рассматриваемом примере эквивалентный ток на весь цикл работы

$$I_{\epsilon} = I_{\epsilon 20} = I_{\epsilon} = I_{\epsilon} = 1000 \text{ А.}$$

Эквивалентный ток, пересчитанный для ПВ = 25%,

$$I_{\epsilon 25} = I_{\epsilon 20} \sqrt{\frac{\epsilon_{20}}{\epsilon_{25}}} = 1000 \sqrt{\frac{0,2}{0,25}} = 896 \text{ А.}$$

что больше допустимого тока $I_n = 500$ А.

Приведенный расчет показывает, что применение выбранного электро-
двигателя закрытого исполнения с естественной вентиляцией недопустимо,
так как в этом случае электродвигатель перегреется. Поэтому необходи-
ма принудительная вентиляция. При ПВ = 100% и принудительной вентиляции
выбранный электродвигатель допускает ток $I = 0,9 I_n = 450$ А. Экви-
валентный ток, пересчитанный для $\epsilon = 1$,

$$I_{\epsilon 100} = I_{\epsilon 20} \sqrt{\frac{\epsilon_{20}}{\epsilon_{100}}} = 1000 \sqrt{\frac{0,2}{1,0}} = 448 \text{ А} \approx 0,896 I_n.$$

Таким образом, при принудительной вентиляции выбранный электро-
двигатель будет загружен практически полностью и удовлетворит услови-
ям работы с точки зрения нагрева.

Кроме проверки электродвигателя по условиям нагрева необходимо
рассчитать время, затрачиваемое на перемещение нажимных винтов. Ре-
зультаты этого расчета, выполненного по /2.27/, сведены в табл.3.6.

Таблица 3.6

Время перемещения нажимных винтов

| Номер пропуска, после которого следует переме- щение верхнего вала | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|------|------|------|------|------|
| Значение и направление пе- ремещения S_i , мм | ↓45 | ↑88 | ↓70 | ↑58 | ↑85 |
| Расчетное время перемещения $t_i = \frac{2}{a_3} \sqrt{S_i}$, с | 1,22 | 1,68 | 1,52 | 1,36 | 1,65 |
| Допустимое время перемеде- ния /см. табл.3.3/, с | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 10 |

Вычисленное время работы привода не превышает допустимого зна-
чения паузы между пропусками. Следовательно, при выбранном

электродвигателе нажимное устройство не лимитирует работу главного привода и обеспечивает требуемую производительность прокатного стана.

Выполним теперь расчет потребной мощности электропривода, воспользовавшись приведенным в подразд. 2.4 методом предельно-допустимого времени работы механизма. Двигатели, мощность которых вычисляется по этому методу, работают с максимальной допустимой тепловой нагрузкой, если $2\epsilon^2 \lambda^3 = 1$. Тогда для расчета потребной мощности двухдвигательного электропривода в рассматриваемом примере можно воспользоваться /2.68/, принимая предельно допустимое время работы $\Delta t = \frac{\sum t_i}{n}$, где n - число программных перемещений. Для сравнения двух способов расчета воспользуемся данными табл. 3.5, т.е. примем для расчета $\sum t_i = 7,45$ с, $n = 5$. Тогда $\Delta t = 1,5$ с, необходимая мощность двух двигателей составит

$$P_{\epsilon} = \frac{16\pi^2 F_M V_M^2}{h^2 \Delta t} 2\epsilon^2 \lambda^3 \cdot 10^{-3} = \frac{16\pi^2 \cdot 566 \cdot 100^2}{40^2 \cdot 1,5} = 1 \cdot 10^{-3} = 372 \text{ кВт.}$$

При пересчете на ПВ = 100% при принудительной вентиляции двигателя получим

$$P_{\epsilon 100} = P_{\epsilon 20} \sqrt{\frac{\epsilon_{20}}{\epsilon_{100}}} = 372 \sqrt{0,2} = 166,3 \text{ кВт.}$$

Предварительно выбранные два двигателя мощностью по 100 кВт каждый при ПВ = 100% могут развивать без перегрева мощность, равную $0,9 \cdot 2 \cdot 100 = 180$ кВт. Таким образом, электропривод будет загружен примерно на 92,4% /166,3 · 100 / 180/, что практически совпадает с результатом, полученным по методу эквивалентных ускорений /89,6%/.

4. МАНИПУЛЯТОРЫ

4.1. Классификация и кинематические схемы

Манипулятор - механизм, предназначенный для перемещения прокатываемого металла параллельно валкам и направления его в тот или иной калибр валков. Линейки манипулятора используются для выпрямления металла при искривлении его в процессе прокатки [8].

В табл. 4.1 приведены данные о скоростях перемещения линеек манипуляторов различных обжимных реверсивных станов.

Таблица 4.1
Скорость перемещения линеек манипуляторов и усилие на линейках

| Диаметр валков, мм | Максимальное усилие на линейках $\times 10^4$, Н | Скорость перемещения линеек, м/с |
|--------------------|---|----------------------------------|
| 1000...1150 | 40...1000 | 1 |
| 800...900 | 25...80 | 0,7...0,8 |
| 700...800 | 12...25 | 0,4...0,7 |

Линейки манипуляторов обжимных станов располагаются перед и за рабочей клетью. Приводы правых и левых линеек соответственно за и перед клетью имеют механическую связь,

обеспечивающую согласованное движение манипулятора. В зависимости от расположения привода различают два основных типа конструкций манипуляторов: европейский и американский. Для манипуляторов первого типа /европейского/ привод левых и правых линеек располагается по обе стороны рольганга

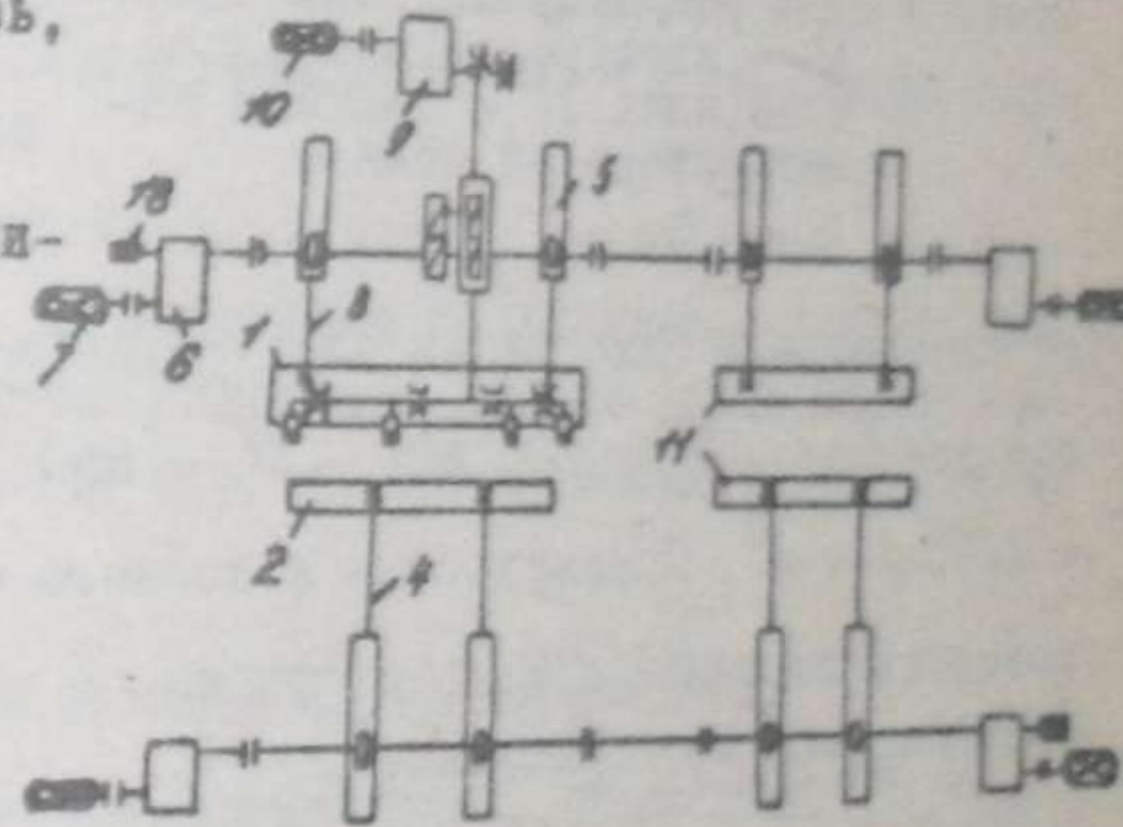


Рис. 4.1. Кинематическая схема манипулятора европейского типа: 1 - левая линейка перед станом /с кантовочным механизмом/; 2 - правая линейка перед станом; 3 - толкающая штанга левой линейки; 4 - толкающая штанга правой линейки; 5 - зубчатая рейка; 6 - редуктор манипулятора; 8 - командопарат; 9 - редуктор кантователя; 10 - электродвигатель кантователя; 11 - линейка манипулятора за станом

/рис. 4.1/. Конструкция такого манипулятора проста, но требует много места. В последнее время подобные манипуляторы почти не применяются. Для манипуляторов второго типа /американского/ привод левых и правых линеек располагается с одной стороны рольганга /со стороны привода рабочих валков/, как это показано на рис. 4.2.

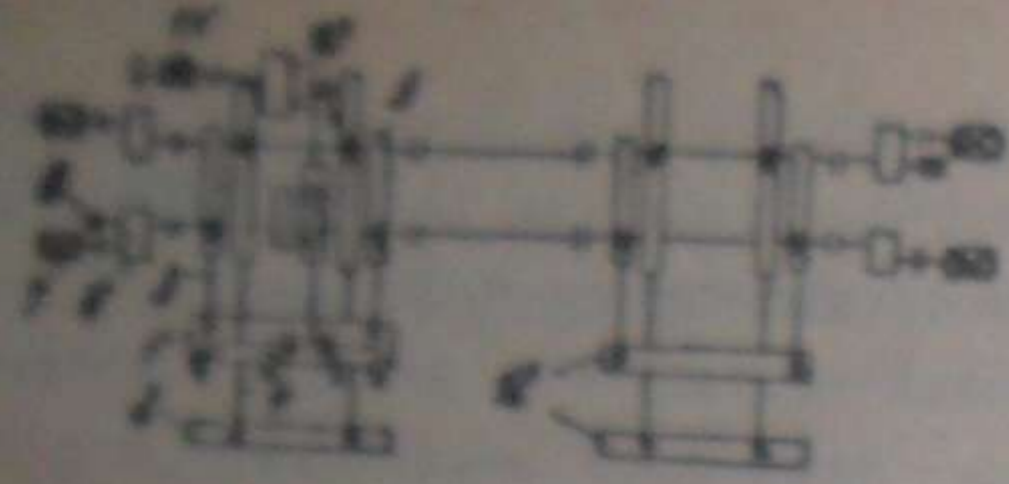


Рис. 4.2. Кинематическая схема манипулятора американского типа: 1 - левая линейка перед станом /с кантушкой механизмом/; 2 - правая линейка перед станом; 3 - передняя толкающая штанга; 4 - передняя тянущая штанга; 5 - зубчатая рейка; 6 - редуктор манипулятора; 7 - электродвигатель манипулятора; 8 - командоаппарат; 9 - редуктор кантователя; 10 - электродвигатель кантователя; 11 - линейки манипулятора за станом

Конструкция манипулятора этого типа несколько сложнее, но он имеет меньшие габаритные размеры и удобнее при эксплуатации. Для новых блюмингов и слябингов конструкция манипулятора с односторонним расположением привода - типовая. Наиболее современная конструкция манипулятора разработана УЗТМ для слябинга 1150. Этот манипулятор, кинематическая схема которого показана на рис. 4.3, имеет безредукторный электропривод линейки

от специальных тихоходных электродвигателей, имеющих следующие паспортные данные: $P_n = 520$ кВт, $U_n = 660$ В, $n_n = 30$ об/мин, $F_n = 6275$ Н·м·с². Преимущества подобного манипулятора - простота и надежность механической конструкции, а также динамические свойства безредукторного электропривода.

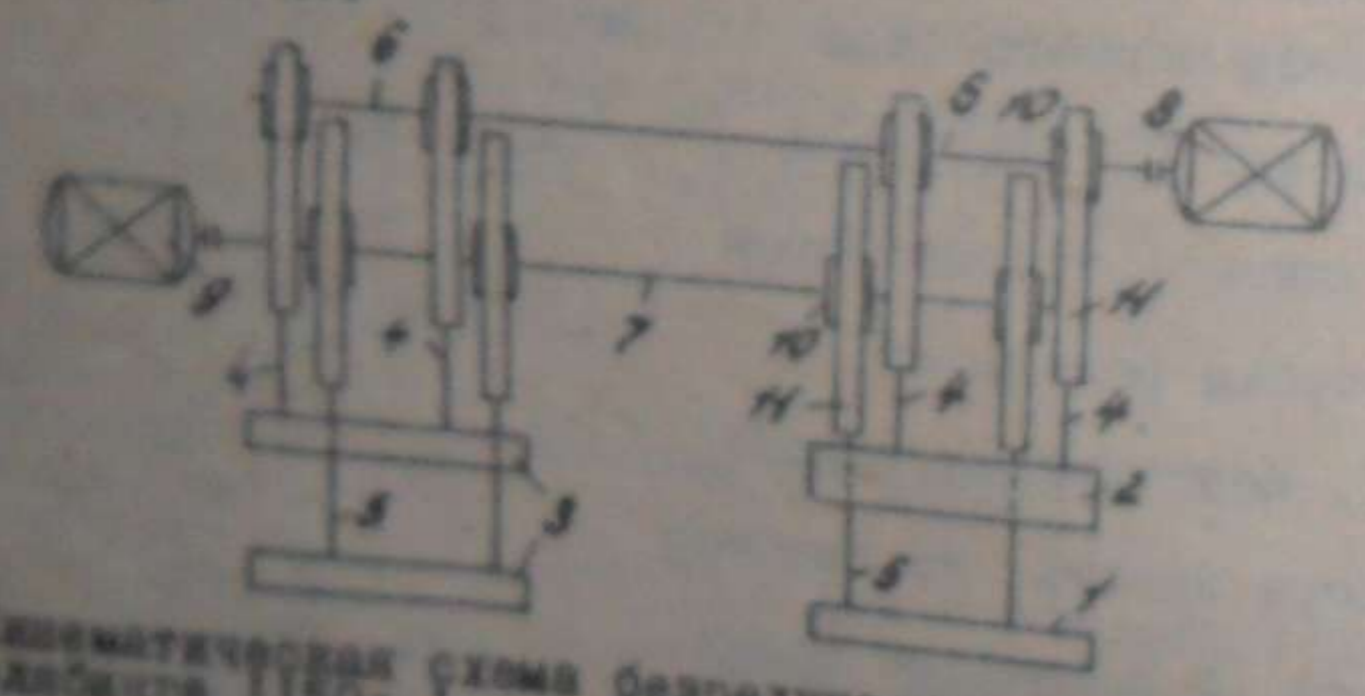


Рис. 4.3. Кинематическая схема безредукторного манипулятора слябинга 1150: 1 - левая линейка перед станом; 2 - правая линейка перед станом /с кантушкой механизмом/; 3 - левая линейка за станом; 4 - толкающие штанги правых линеек; 5 - тянущие штанги левых линеек; 6 - передаточный вал привода правых линеек; 7 - передаточный вал привода левых линеек; 8 - электродвигатель правых линеек; 9 - электродвигатель левых линеек; 10 - вестерки; 11 - зубчатая рейка

В настоящем разделе рассматриваются только манипуляторы обжимных станков.

4.2. Режим работы

Манипулятор относится к механизмам, работающим с большим числом включений в час, причем фактическая частота включений электропривода, как правило, больше того расчетного значения, которое можно определить на основании известной технологии работы манипуляторов для какой-либо конкретной программы прокатки.

Теоретически трудно заранее определить число проходов линейками прокатываемого металла при его искривлении и число дополнительных включений электропривода толчками при отработке малых перемещений линеек.

Для современных манипуляторов обжимных реверсивных станков число включений электропривода составляет примерно 1500, а в некоторых случаях 2000...2200 в час.

Программные перемещения линеек и их число, необходимые для расчета электропривода, определяют на основании калибровки прокатных валков и учета технологии работы стана /кантовка слитка перед определенными проходами, правка искривленных слитков линейками манипулятора и т.д./.

4.3. Расчет моментов статических сопротивлений

Суммарный момент статических сопротивлений, приведенный к валу электродвигателя,

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3 \quad /4.1/$$

где M_1, M_2 - момент, необходимый для перемещения соответственно линеек манипулятора и слитка вдоль роликов рольганга; M_3 - момент, необходимый для правки искривленной полосы.

Статические моменты и мощности электродвигателей манипулятора рассчитывают для одной пары линеек /правых или левых/, причем для расчета необходимо брать ту пару, которая несет на себе электропривод и механизм кантователя. Обычно толкающие штанги этих линеек имеют больший вес, чем тянущие штанги второй пары линеек.

Составляющие момента статического сопротивления определяют следующим образом:

$$M_1 = M_1' + M_1'' = \frac{\sum m_1 g d_w \mu_1}{2i\eta} + \frac{\sum m_2 g f \cdot 10^{-2}}{i\eta} \quad /4.2/$$

где M_1, M_1'' - момент, необходимый для преодоления соответственно трения скольжения линеек манипулятора по направляющим и трения качения зубчатых реек по бандажам реечных шестерен, Н·м; $\Sigma m_1, \Sigma m_2$ - суммарная масса деталей, приходящаяся на трущиеся поверхности соответственно ползунов, линеек и катящихся по бандажам реечных шестерен, кг; d_w - диаметр реечной шестерни, м; μ_1 - коэффициент трения скольжения линеек о направляющие; при стальных направляющих и бронзовых вкладышах на ползунах линеек $\mu_1 = 0,15$; f - коэффициент трения качения реек по бандажам реечных шестерен, равный 0,1 см; i - передаточное число редуктора; η - КПД редуктора.

Для кинематической схемы на рис.4.2 величины Σm_1 и Σm_2 выражаются следующим образом:

$$\Sigma m_1 = m_{n1} + m_{n2} + m_k + \frac{2}{3} (\Sigma m_{ш2} + \Sigma m_{ш3}); \quad /4.3/$$

$$\Sigma m_2 = \frac{2}{3} \Sigma m_{ш2}; \quad /4.4/$$

где m_{n1}, m_{n2} - масса левой линейки соответственно за и перед клетью, кг; m_k - масса кантователя с электроприводом, кг; $\Sigma m_{ш2}$ - суммарная масса толкающих штанг левых линеек манипулятора, кг; $\Sigma m_{ш3}$ - масса штанги и катуна кантователя, кг.

Коэффициент $2/3$ учитывает, что только часть массы штанг приходится на трущиеся и катящиеся поверхности.

Момент, необходимый для перемещения слитка по роликам рольганга, Н·м:

$$M_2 = \frac{f m_{сл} d_w \mu_2}{2i\eta}; \quad /4.5/$$

где $m_{сл}$ - масса прокатываемого слитка, кг; μ_2 - коэффициент трения скольжения слитка по роликам рольганга /табл.4.2/.

Таблица 4.2

| Характеристика условий работы | Сталь /материал слитка/ | |
|--|-------------------------|---------|
| | холодная | горячая |
| Среднее значение для скорости: 5...10 м/с | 0,1 | 0,15 |
| до 5 м/с | 0,15 | 0,2 |
| Предельное значение для трогания | 0,15 | 0,3 |

Момент, необходимый для правки искривленного слитка, Н·м:

$$M_3 = \frac{P d_w}{2i\eta}; \quad /4.6/$$

где P - усилие, которое должны развивать линейки для совершения работы по исправлению изогнутого слитка, Н.

Это усилие приближенно определяется так:

$$\frac{P l}{4} = 6_s S; \quad /4.7/$$

где l - длина искривленной полосы или линеек манипулятора /рис.4.4/, мм; 6_s - предел текучести прокатываемого металла, Н/мм²; S - пластический момент сопротивления сечения прокатываемого металла, мм³.

При практических расчетах необходимое значение усилия P принимается для манипуляторов различных станов в соответствии с табл.4.1.

Для определения динамических моментов, а также при расчете оптимального передаточного числа редуктора момент M_3 не учитывается.

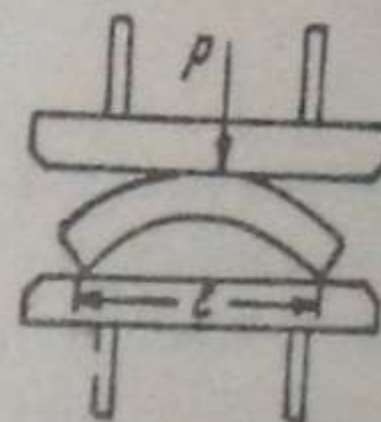


Рис.4.4. Правка искривленной полосы линеек манипулятора

4.4. Расчет динамических моментов и ускорений

Динамический момент на валу электродвигателей манипулятора определяется из уравнения движения, как это делалось для нажимных устройств /см. подразд.3.4/:

$$M_j = J \frac{d\omega}{dt} = M + M_c,$$

откуда угловое ускорение электродвигателя, 1/с:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M + M_c}{J}.$$

Линейное ускорение или замедление линеек манипулятора

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d_w}{2i} = \frac{d\omega}{dt}; \quad /4.8/$$

Подставляя в /4.8/ значение ускорения замедления $\frac{d\omega}{dt}$ и учитывая действие пускового момента M_n или момента электрического торможения M_T , получаем для периода соответственно пуска и торможения следующие расчетные формулы определения линейного ускорения и замедления линеек манипулятора, мм/с²:

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|----|-----|-----|-------------------|---|
| 14K | II | 180 | 250 | 95-250-500-90-100 | 5 |
| 15 | IV | 190 | 190 | 95-100 | 5 |
| 16K | IV | 140 | 200 | 95-300-500-80-100 | 2 |
| 17 | V | 150 | 150 | 2170 | 5 |

Всего включений за цикл - 54.
 Продолжительность цикла прокатки - 128 с.
 Число вращений в час электропривода левых линеек - 1520.

Примечание. Буква "K" в таблице означает кантовку после соответствующего прохода.
 Моменты инерции механизма и привода левых линеек приведены в табл. 4.4.

Моменты инерции электропривода и механизма манипулятора Таблица 4.4

| Элементы электропривода | Момент инерции, отнесенный к валу двигателя, Н·м·с ² |
|---|---|
| Входы двух электродвигателей | 50,25 |
| Быстроходные валы редукторов с сидьями на них шестернями | 18 |
| Вращающиеся детали, движущиеся со скоростью, отличной от скорости электродвигателей | 3,7 |
| Поступательно движущиеся детали манипулятора / без слитка / | 20,4 |
| Суммарный момент инерции левых линеек манипулятора и электропривода / без слитка / | 92,35 |
| Прокатываемый слиток | 1,3 |
| Суммарный момент инерции манипулятора со слитком | 93,65 |

4.5.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Расчетные массы Σm_1 и Σm_2 в соответствии с /4.3/ и /4.4/ имеют следующие значения: $\Sigma m_1 = 66962$ кг; $\Sigma m_2 = 18443$ кг.
 Составляющие суммарного момента статического сопротивления определяются по /4.2/, /4.5/, /4.6/ и имеют следующие значения:

$$M_1 = \frac{\Sigma m_1 g d_{ш} \mu_1}{2i\eta} + \frac{\Sigma m_2 g f \cdot 10^2}{i\eta} = \frac{66962 \cdot 9,81 \cdot 0,756 \cdot 0,05}{2 \cdot 23,3 \cdot 0,9} + \frac{18443 \cdot 9,81 \cdot 0,1 \cdot 10^2}{23,3 \cdot 0,9} = 1775,6 \text{ Н·м};$$

$$M_2 = \frac{g m_{сл} d_{ш} \mu_2}{2i\eta} = \frac{9,81 \cdot 5000 \cdot 0,756 \cdot 0,3}{2 \cdot 23,3 \cdot 0,9} = 264,9 \text{ Н·м};$$

$$M_3 = \frac{\rho d_{ш}^3}{2i\eta} = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0,756}{2 \cdot 23,3 \cdot 0,9} = 17658 \text{ Н·м}.$$

Статический момент, необходимый для перемещения линеек и слитка по рольгангу:

$$M_{пер} = M_1 + M_2 = 1775,6 + 264,9 = 2040,5 \text{ Н·м}.$$

Суммарный статический момент

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3 = 1775,6 + 264,9 + 17658 = 19698,5 \text{ Н·м}.$$

Относительная статическая нагрузка электродвигателей при перемещении слитка с установившейся скоростью будет

$$\lambda = \frac{M_{пер}}{2M_H} = \frac{2040,5}{2 \cdot 2011,1} = 0,507.$$

Относительная статическая нагрузка электродвигателей при пружинении металла с давлением 100 т составит

$$\lambda' = \frac{M_c}{2M_H} = \frac{19698,5}{2 \cdot 2011,1} = 4,9.$$

что значительно больше допустимой величины $\lambda / \frac{M_{max}}{M_H} = 2,8$, поэтому действительное значение давления при правке металла будет снижено для рассматриваемых электродвигателей до значения, соответствующего допустимому моменту, т.е.

$$M'_3 = 2M_{max} - M_{пер} = 5640,8 - 2040,5 = 9241,1 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$P' = \frac{2i\eta}{d_w} M'_3 = \frac{2 \cdot 23 \cdot 0,9}{0,756} \cdot 9241,1 = 510120 \text{ Н}.$$

4.5.3. Определение оптимального передаточного числа редуктора

Большинство программных перемещений линеек манипулятора происходит при скоростях двигателя $n < n_n$. Поэтому необходимо проверить правильность выбора передаточного числа редуктора, установив отклонение принятого передаточного числа i от оптимального i_0 , найденного из условия минимального времени разгона и замедления манипулятора. Величина i_0 определяется по /1.6/ - /1.8/. Величины, входящие в эти выражения, имеют следующие значения:

$$M_M = M_{пер} i \eta = 2040,5 \cdot 23,3 \cdot 0,9 = 42789,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

/момент M_3 , необходимый для правки полосы, не учитывается/;

$$Z_M = \frac{(\sum Z - Z_A) i^2}{Z_A} = \frac{(93,65 - 68,25) \cdot 23,3^2}{68,25} = 202.$$

Принимаем, что в периоды пуска и торможения средний момент, развиваемый двигателем, равен $1,5 M_n$. Таким образом, при двухдвигательном приводе манипулятора

$$M_A = 2 \cdot 1,5 M_n = 2 \cdot 1,5 \cdot 2011,1 = 6033,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Подставив числовые значения в указанные формулы, получим

$$i_0' = \frac{M_M}{\eta M_A} + \sqrt{\left(\frac{M_M}{\eta M_A}\right)^2 + \frac{Z_M}{Z_A}} = \frac{42789,3}{0,9 \cdot 6033,3} +$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{42789,3}{0,9 \cdot 6033,3}\right)^2 + 202} = 24,13;$$

$$i_0'' = \frac{2M_M}{M_A} + \sqrt{\left(\frac{2M_M}{M_A}\right)^2 + \frac{Z_M}{Z_A}} = \frac{2 \cdot 42789,3}{6033,3} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 42789,3}{6033,3}\right)^2 + 202} = 9,14;$$

$$i_0 = \frac{i_0' + i_0''}{2} = \frac{24,13 + 9,14}{2} \approx 16,64.$$

Фактическое передаточное число $i = 23,3$ больше оптимального. Однако увеличение передаточного числа редуктора по сравнению с i_0 даже на 40% не окажет существенного влияния на ускорение электропривода /см. подразд. 1.2/.

Найденная величина $i_0 = 16,64$ - оптимальна только для принятого в расчете электродвигателя. Для безредукторного электропривода манипулятора со специальными тихоходными электродвигателями /см. рис. 4.3/ оптимальное передаточное число $i_0 = 1$.

4.5.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Мощность электродвигателя по нагреву проверяется методом эквивалентных ускорений.

В табл. 4.5 приведены исходные данные и расчеты ускорений и критического перемещения, необходимые для дальнейших вычислений. Расчеты выполнены с допущением, что движение линеек манипулятора всегда происходит со слитком. Это допущение не вносит заметного искажения в окончательный результат расчета.

Из табл. 4.5 видно, что максимальное критическое перемещение линеек манипулятора при $v_{max} = 1,614 \text{ м/с}$ /генератор, питающий электродвигателя, работает с двойным напряжением 440 В/ больше любого возможного программного перемещения, указанного в табл. 4.3. Следовательно, привод рассчитываемого манипулятора никогда не разгоняется до установленной скорости, а работает в режиме пусков и замедлений, причем для большинства перемещений электродвигатели работают при напряжении 220 В.

Таблица 4.5

Расчет ускорений и критического перемещения линеек манипулятора

| Исходные данные для расчета | Расчетная величина и формула | Числовое значение расчетной величины |
|---|---|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| $d_w = 756 \text{ мм}$ $i = 23,3$ $M_n = M_T = M_A = 6033,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$ | Линейное ускорение линеек $a_n = \frac{d_w}{2i} \frac{M_n - M_c}{Z}$ | 621,7 мм/с ² |

| 1 | 2 | 3 |
|--|--|-------------------------|
| $M_c = M_{кр} = 2040,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ $J = 93,65 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ $v = 0,807 \text{ м/с}$ $v_{max} = 1,614 \text{ м/с} = 2v$ | Линейное замедление леек $a_T = \frac{d_{ш}}{2i} \frac{M_T + M_c}{J}$ | $1398,6 \text{ мм/с}^2$ |
| | Эквивалентное линейное ускорение леек $a_э = \frac{2a_n a_T}{a_n + a_T}$ | $925,6 \text{ мм/с}^2$ |
| | Критическое перемещение леек при основной частоте вращения электродвигателя $S_{кр} = \frac{v^2}{a_э}$ | $703,6 \text{ мм}$ |
| | Критическое перемещение леек при максимальной скорости вращения электродвигателя $S_{кр max} = \frac{v_{max}^2}{a_э}$ | 2814 мм |

Для определения времени работы электропривода воспользуемся вспомогательной кривой $t = f(S)$, метод построения которой изложен в подразд. 2.1. Спрямляющее число ν , необходимое для построения $t = f(S)$, в соответствии с /2.10/ составит:

$$\nu = \frac{2i}{d_{ш}} = \frac{2 \cdot 23,3}{756} = 0,0616 \text{ л/мм.}$$

Динамические моменты при пуске и торможения:

$$M_{jn} = M_n - M_c = 6033,3 - 2040,5 = 3992,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$M_{jT} = M_T + M_c = 6033,3 + 2040,5 = 8073,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Эквивалентный динамический момент привода

$$M_{jэ} = \frac{2M_{jn} M_{jT}}{M_{jn} + M_{jT}} = \frac{2 \cdot 3992,8 \cdot 8073,8}{3992,8 + 8073,8} = 5343,2 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Параметр параболы $t = f(S)$ по /2.17/

$$p = \frac{2J\nu}{M_{jэ}} = \frac{2 \cdot 93,65 \cdot 0,0616}{5343,2} = 0,0216 \text{ с}^2/\text{мм.}$$

Уравнение параболической кривой

$$t_i^2 = 2pS_i.$$

/4.11/

При максимальном перемещении леек 2170 мм /см. табл. 4.3/ время перемещения, найденное по /4.11/, составит 3,06 с. По координатам $S_i = 2170 \text{ мм}$ и $t_i = 3,06 \text{ с}$ выбран масштаб кривой $t = f(S)$ и построена парабола, показанная на рис. 4.6.

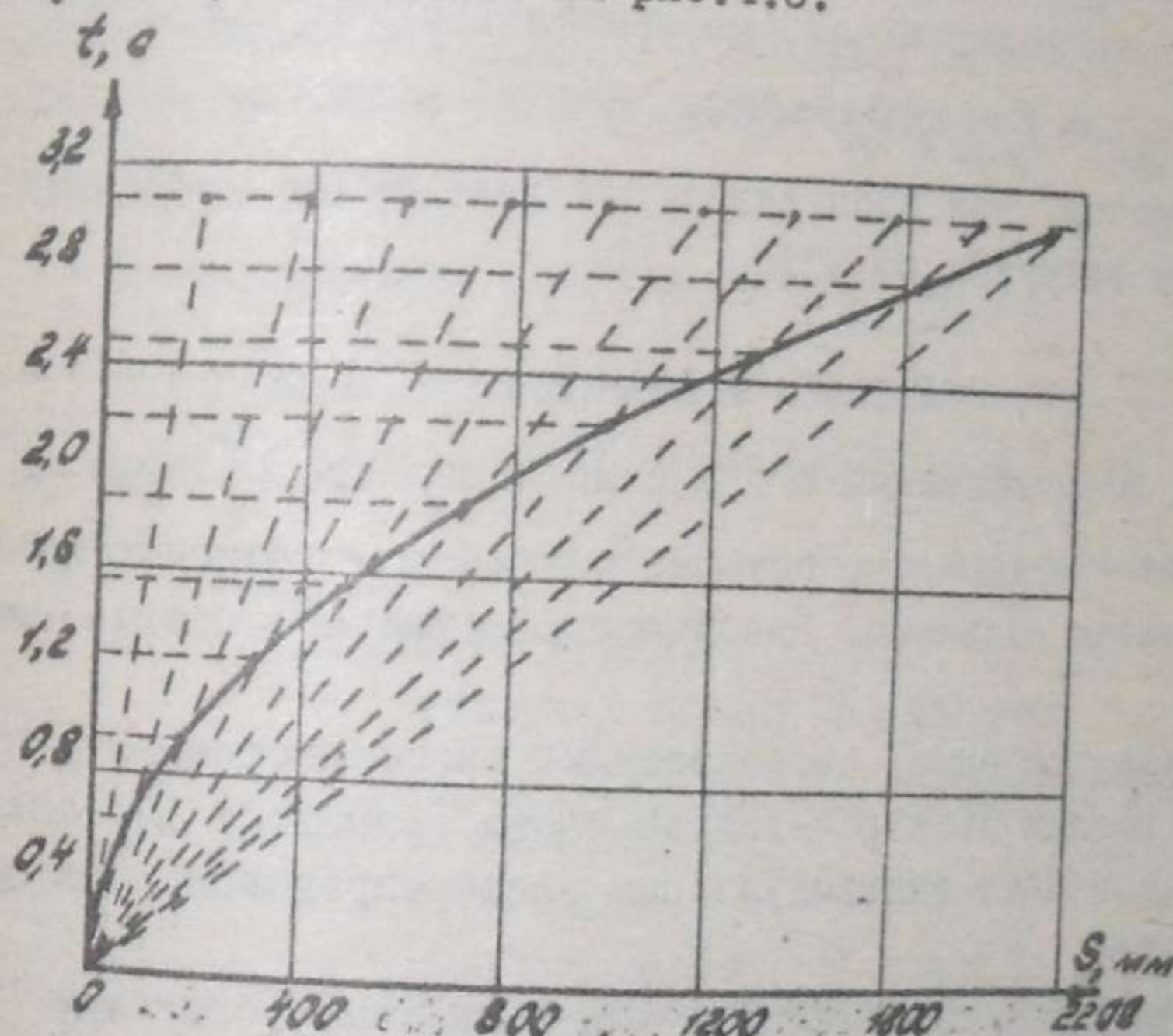


Рис. 4.6. Зависимость $t = f(S)$ для блюминга 1150

По кривой $t = f(S)$ /см. рис. 4.6/ и заданным в табл. 4.3 программным перемещениям найдены значения времени работы электропривода для каждого из этих перемещений, а также суммарное время работы электропривода $\sum t_i = 52,4 \text{ с}$. Относительная продолжительность включения

$$\epsilon = \frac{\sum t_i}{t_n} = \frac{52,4}{128} = 0,41.$$

Эквивалентная сила тока электродвигателя определяется по /2.42/ для случая $a_n \neq a_T$:

$$I_{эч} = I_n = I_T,$$

$$I_{\epsilon 41} = 1,5 I_H = 1,5 \cdot 500 = 750 \text{ А.}$$

Эквивалентная сила тока, приведенная к ПВ = 25%,

$$I_{\epsilon 25} = I_{\epsilon 41} \sqrt{\frac{\epsilon_{41}}{\epsilon_{25}}} = 750 \sqrt{\frac{0,41}{0,25}} = 750 \text{ А,}$$

что больше допустимого значения $I_H = 500 \text{ А.}$

Расчет показывает, что применение выбранных электродвигателей с естественной вентиляцией недопустимо из-за перегрева машин. Необходима принудительная вентиляция электродвигателей, при применении которой допустимая сила тока при ПВ = 100% составляет 0,9 $I_H = 450 \text{ А.}$ Эквивалентный ток электродвигателя, пересчитанный для $\epsilon = 1$,

$$I_{\epsilon 100} = I_{\epsilon 41} \sqrt{\epsilon_{41}} = 674 \sqrt{0,41} = 431 \text{ А.}$$

Таким образом, при принудительной вентиляции выбранный электродвигатель будет загружен на 96%.

5. РОЛЬГАНГИ И СТАНИННЫЕ РОЛИКИ

5.1. Классификация и основные параметры рольгангов

Рольганги - механизмы, которые служат для транспортирования металла вращающимися роликами. Различают следующие основные типы рольгангов [6; 8].

1. Рабочие основные, расположенные непосредственно у прокатной клетки. Первые ролики этих рольгангов часто размещают в станине рабочей клетки стана и снабжают индивидуальным электроприводом /так называемые станинные ролики/.

2. Рабочие вспомогательные, или раскатные, служащие продолжением основных рабочих рольгангов. Раскатные рольганги включаются в работу, когда длина прокатываемой полосы становится больше длины основных рабочих рольгангов.

3. Транспортные /подводящие и отводящие/, предназначенные для передачи металла от одного механизма к другому. Один и тот же рольганг может одновременно быть подводящим и отводящим /например, рольганг между ножницами и станом/. Рольганг, который расположен в начале стана и служит для приема металла, называется также приемным.

Разновидность транспортных - печные рольганги, устанавливаемые непосредственно в проходных нагревательных печах. Привод и подшипники этих рольгангов располагаются вне печи; ролики делаются пустотелыми для охлаждения их водой.

4. Пакетировочные с косыми роликами, используемые для одновременного перемещения металла вдоль и поперек рольганга, собирания полос в плоские пачки перед и за ножницами, передачи металла на холодильники.

5. Передвижные, служащие для перемещения металла в двух направлениях - по роликам рольганга, а также в направлении передвижения самого рольганга, встроенного в какой-либо механизм стана и двигающегося вместе с ним.

Эти рольганги встраиваются в передвижные столы рельсобалочных и трубосварочных станков, подъемно-качающиеся столы станков трио, параллельно подъемные столы для загрузки металла в нагревательные печи и т.д.

Диаметр ролика с целью снижения веса должен выбираться минимально возможным по условиям прочности. Данные о диаметрах роликов рольгангов, применяемых для различных прокатных станков, приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1

Характеристика роликов рольгангов

| Диаметр роликов, мм | Тип рольгангов |
|---------------------|--|
| | Рабочие рольганги: |
| 600 | броневых станков и слябингов |
| 500 | слябингов, крупных блюмингов и толстолистовых станков |
| 450 | блюмингов |
| 400 | малых блюмингов и рельсобалочных станков. Транспортные рольганги слябингов и крупных блюмингов |
| 350 | Рольганги среднелистовых станков. Транспортные рольганги блюмингов и рельсобалочных станков |
| 300 | Рабочие и подводящие рольганги среднелистовых и тонколистовых станков |
| 250 | Рольганги мелкосортных станков. Отводящие рольганги среднесортных и тонколистовых станков |
| 200 | Рольганги у холодильников мелкосортных станков |
| 150 | Рольганги проволочных станков |

Длина бочки роликов рабочих рольгангов равна или несколько больше длины бочки валков стана. у транспортных рольгангов длина бочки роликов на 150...250 мм больше ширины транспортируемой полосы. При транспортировке раскаленных слитков длина бочки роликов на 300...500 мм больше ширины слитка для предохранения подшипников рольганга от перегрева.

Шаг роликов выбирается таким, чтобы металл лежал не менее чем на двух роликах. Чтобы слитки при транспортировке не ударялись о ролики, шаг последних не должен превышать расстояния от центра тяжести слитка до его широкого торца. Длинные полосы при транспортировке не должны искривляться под действием собственного веса. В связи с этим шаг роликов следует ограничивать примерно следующими значениями: крупносортовых станов - 1,2...1,6 м; среднесортных станов - 0,9...1,0 м; тонколистовых станов - 0,5...0,7 м.

Скорость роликов рабочих и отводящих рольгангов на 5...10% выше скорости прокатки. Для рольгангов, подводящих металл к печам или к стану, скорость составляет 1,5...2,5 м/с; для транспортных рольгангов она выбирается в соответствии с заданной производительностью в пределах 1,5...12 м/с.

5.2. Режим работы электроприводов рольгангов

Режим работы электроприводов рольгангов определяется их назначением и типом стана. В табл. 5.2 приведены данные о числе включений в час и относительной продолжительности включения электроприводов некоторых рольгангов.

Таблица 5.2

Режим работы электропривода рольгангов

| Тип рольгангов | ПВ, % | Число включений в час |
|---|----------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Рольганг опрокидывателя алюминга | 3...6 | 45 |
| Приемный рольганг алюминга | 4...8 | 90 |
| Рабочие рольганги: алюминга | 60 | 1000...1200 |
| толстолистового стана | 40 | 350 |
| рельсобалочного стана | 75...100 | 350...450 |
| Раскатные рольганги: перед клетью рельсобалочного стана | 60...80 | 30...110 |
| за клетью рельсобалочного стана | 50...80 | 175...450 |
| Транспортный рольганг под горячей ревки рельсобалочного стана | 80...90 | 200 |
| Задвижной рольганг правой машины | 70...80 | 350...500 |
| Рольганг: перед ножницами | 15...80 | 540 |
| за ножницами алюминга | 50 | 550 |

При выборе типа электропривода рольганга необходимо детальное изучение технологического процесса /для определения действительной нагрузки/ и режима работы рольгангов, а также необходимого диапазона регулирования скорости роликов, точности остановки, плавности регулирования и других специфических условий работы.

Рольганги выполняются с групповым или с индивидуальным электроприводом, а также с холостыми роликами.

При групповом электроприводе секция рольганга, состоящая из 3...10, а иногда и большего числа роликов, имеет общий электропривод от одного или двух электродвигателей через конические или цилиндрические шестерни и трансмиссионный вал. Групповой электропривод применяется в основном для рольгангов, работающих в тяжелом режиме с частыми дусками или реверсами /например, для рабочих и подводящих рольгангов обжимных клетей/. Для этих станов начальная длина слитка и длина раската в первых проходах близки к значению шага рольганга, вследствие чего на один ролик приходится почти вся масса прокатываемого металла. Это вызывает необходимость применения группового электропривода, имеющего по сравнению с индивидуальным намного меньшую установленную мощность электродвигателей и меньшую стоимость. Кинематические схемы рольгангов с групповым электроприводом показаны на рис. 5.1.

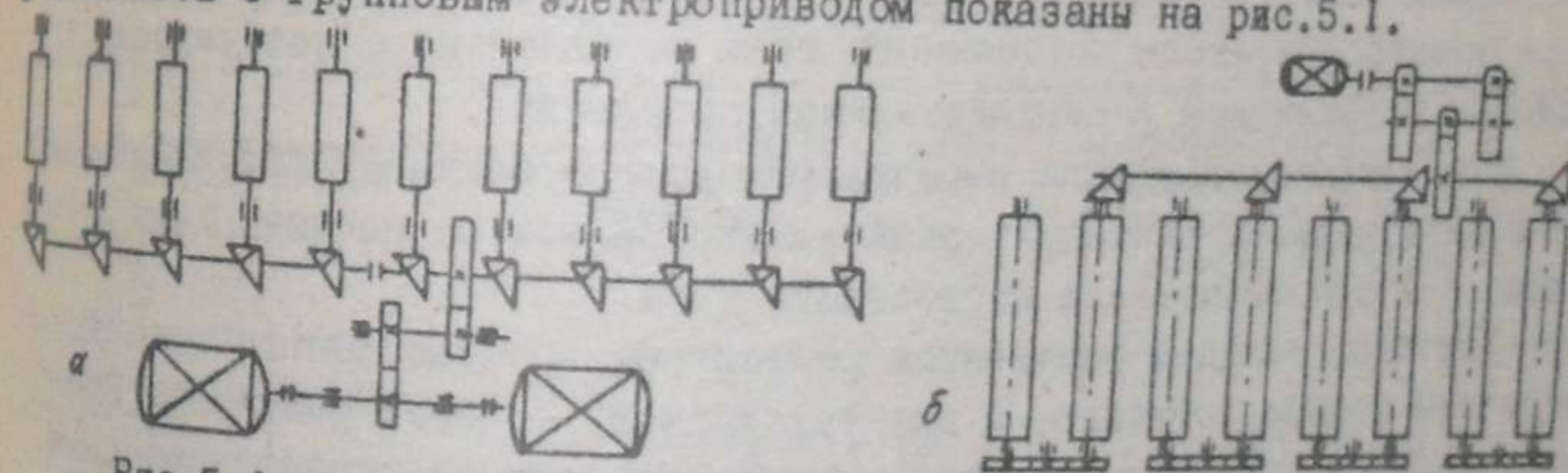


Рис. 5.1. Кинематические схемы рольгангов с групповым приводом: а - рабочий рольганг алюминга; б - рабочий рольганг клетки дуо толстолистового стана

Для рольгангов с групповым электроприводом, не требующих регулирования скорости и имеющих частоту включений в час не более 500, используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором. Электропривод подобного типа применяется для рольгангов обжимных клетей трио, приемных рольгангов алюминга, загрузочных и приемных рольгангов печей, а также для некоторых рольгангов, транспортирующих тяжелые заготовки.

При необходимости регулирования скорости роликов используются электродвигатели постоянного тока, питающиеся от отдельного генератора или от тиристорного преобразователя, что обеспечивает широкий

диапазон регулирования скорости изменением напряжения на якоре, а также сокращение времени переходных процессов.

При индивидуальном электроприводе рольгангов каждый ролик приводится в движение отдельным электродвигателем. Подобный электропривод применяется для станинных роликов, а также для транспортных рольгангов, перемещающих длинные полосы металла, когда масса проката сосредоточивается на большое число роликов.

Рольганги с индивидуальным электроприводом стоят дороже, однако это компенсируется простотой конструкции, удобством изготовления и большей эксплуатационной надежностью. У рольгангов с индивидуальным электроприводом возможна замена приводных электродвигателей без остановки рольганга или без снижения его скорости, допускается работа рольганга при выходе из строя одного или нескольких электродвигателей.

Для индивидуального электропривода роликов рольгангов применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели специальной конструкции с большой перегрузочной способностью. Питание этих электродвигателей производится от преобразователей частоты с диапазоном регулирования 10...60 Гц. Частота, а следовательно, и скорость изменяются одновременно на всех электродвигателях нескольких секций рольганга.

Кроме того, для индивидуального электропривода рольгангов применяются электродвигатели постоянного тока параллельного возбуждения с групповым управлением и регулированием напряжения.

В последнее время для рабочих рольгангов обжимных станков используют индивидуальный безредукторный электропривод со специальными тихоходными электродвигателями постоянного тока.

Для тихоходных рольгангов ролики обычно соединяются с электродвигателем непосредственно, а для тихоходных - через редуктор. Выбор редукторного или безредукторного индивидуального электропривода роликов - задача технико-экономического расчета, основанного на сравнении этих двух типов электропривода с точки зрения капитальных затрат и эксплуатационных показателей.

5.3. Расчет моментов статических сопротивлений

Для определения нагрузки на электродвигатели рольгангов необходимо рассчитать следующие моменты статических сопротивлений: 1/ момент холостого хода M_x ; 2/ момент транспортирования металла по роликам $M_{тр}$; 3/ момент буксования роликов по транспортируемому металлу $M_б$; 4/ момент дополнительных статических сопротивлений $M_{дп}$ / моменты трения металла о боковые обрамления рольганга, дополнительного статического сопротивления при транспортировании заготовки с концом, загнутым вниз/.

Момент холостого хода роликов

$$M_{х.р} = \frac{9,81 Z_p m_p d_w \mu_w}{2 i \eta_x}, \quad /5.1/$$

где Z_p - число роликов секции рольганга с групповым электроприводом; m_p - масса одного ролика, кг; d_w - диаметр шейки ролика, м; μ_w - коэффициент трения скольжения в подшипниках ролика; i - передаточное число редуктора; η_x - КПД редуктора при холостом ходе.

Рольганги современных станов оснащены подшипниками качения; подшипники скольжения применяются иногда на рольгангах действующих станов старых конструкций.

В табл. 5.3 приведены значения коэффициентов трения скольжения в подшипниках роликов для различных условий работы, а в табл. 5.4 - КПД зубчатых редукторов рольгангов при номинальной нагрузке. Значения КПД, приведенные в табл. 5.4, могут быть приняты и при уменьшении нагрузки до 75% номинальной. При уменьшении нагрузки до 5...10% номинальной, т.е. при холостом ходе, указанные значения КПД должны быть уменьшены в 2 раза, т.е. $\eta_x = 0,5 \eta_n$.

Таблица 5.3

Коэффициенты трения в подшипниках роликов

| Тип подшипников | Нормальные условия работы подшипников | Воздействие на подшипники высоких температур транспортируемого металла |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Скольжения с бронзовыми вкладышами | 0,06...0,08 | 0,09...0,12 |
| Качения* | 0,005...0,007 | 0,007...0,01 |

Таблица 5.4

КПД зубчатых редукторов рольгангов при номинальной нагрузке

| Тип подшипников редуктора | Класс точности | |
|---------------------------|----------------|------|
| | 2 | 3 |
| Качения | 0,98 | 0,95 |
| Скольжения | 0,96 | 0,93 |

* Для подшипников качения коэффициент трения дается приведенным к подшипникам скольжения.

При определении холостого хода необходимо также учитывать потери в электродвигателе. Момент холостого хода электродвигателя

$$M_{х.д} = (0,05 \dots 0,1) M_H.$$

Таким образом, полный момент холостого хода рольганга

$$M_x = M_{х.р} + M_{х.д}.$$

/5.2/

Момент транспортирования металла по роликам, Н·м:

$$M_{тр} = \frac{9,81 m_M \left(\frac{d_M}{2} \mu_M + f \cdot 10^{-2} \right)}{i \eta_{тр}},$$

/5.3/

где m_M - масса металла, приходящаяся на секцию рольганга, кг; f - коэффициент трения качения металла по роликам /для холодного металла $f = 0,1$ см, а для горячего $f = 0,15$ см/; $\eta_{тр}$ - КПД редуктора при транспортировании металла по рольгангу.

Поскольку транспортирование слитка по рольгангу дает обычно незначительное увеличение статической нагрузки на электропривод по сравнению с нагрузкой холостого хода, то можно принять

$$\eta_{тр} \approx \eta_x = 0,5 \eta_H.$$

/5.4/

Полный статический момент при транспортировании металла по рольгангу и при отсутствии буксования и добавочных сопротивлений

$$M_{с.т} = M_x + M_{тр}.$$

/5.5/

Для рольгангов с групповым электроприводом величина m_M обычно принимается равной массе слитка $m_{сл}$. Однако для рольгангов с индивидуальным электроприводом или с групповым электроприводом, но при длинных полосах транспортируемого металла, величина m_M имеет несколько неопределенное значение, так как зависит от количества точек соприкосновения металла с роликами рольганга. При этом существенным является степень искривления прокатываемого металла, точность установки рольганга по уровню и т.д. Изменение величины m_M имеет большое значение, так как определяет статическую нагрузку на электродвигатели.

В табл.5.5 приведены значения относительной массы металла, приходящегося на один ролик рольганга с индивидуальным электроприводом.

Таблица 5.5

Относительная масса металла на один ролик рольганга

| Характеристика проката | $K = m_M / m_{сл}$ |
|---|--|
| Раскат сечением свыше 1000 мм ² и длиной менее трех шагов роликов | 0,75 |
| Полосы сечением более 2000 мм ² и длиной свыше трех шагов роликов | 0,5 |
| Полосы сечением более 2000 мм ² и длиной свыше четырех шагов роликов | 0,3 |
| Тонкие полосы и мелкосортный прокат длиной более девяти шагов роликов | Масса металла на длине утроенного шага роликов |

При расчете статической нагрузки на электропривод рольганга определяется момент, необходимый для транспортирования слитков максимальной массы $M_{ст.т. max}$ и минимальной массы $M_{ст.т. min}$. Статический момент при транспортировании слитка минимальной массы необходим для определения так называемого предельно-оправдываемого момента.

Момент пробуксовки роликов по металлу определяется для выбора электродвигателей рольгангов по перегрузочной способности. Двигатели рольгангов должны развивать момент, достаточный для пробуксовки роликов рольганга по транспортируемому металлу. Это условие в первую очередь относится к рабочим рольгангам и станинным роликам, а также к рольгангам перед упорами ножиц и пил.

Момент буксования, приведенный к валу электродвигателя, Н·м:

$$M_б = \frac{9,81 m_M d_p \mu_б}{2 i \eta_H},$$

/5.6/

где d_p - диаметр ролика, м; $\mu_б$ - коэффициент трения при буксовании. При определении $M_б$ величина m_M принимается по максимально возможной массе транспортируемого слитка.

Полный момент статического сопротивления при буксовании

$$M_{сб} = M_x + M_б.$$

/5.7/

Коэффициенты трения при буксовании приведены в табл.4.2. Дополнительный момент при транспортировании полосы с загнутым концом определяется для рольгангов с индивидуальным электроприводом роликов. Возникающая в этом случае добавочная нагрузка на ролик показана на схеме сил рис.5.2, где приняты следующие обозначения:

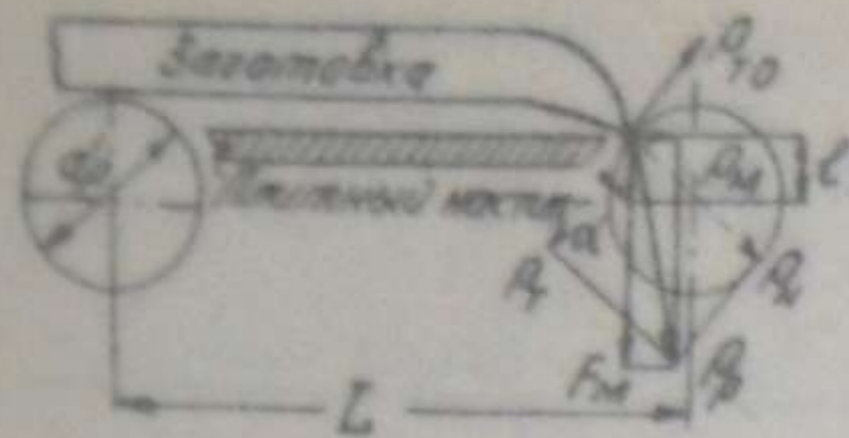


Рис. 5.2. Схема действия сил при транспортировании заготовки с концом, загнутым вниз

действующей силы; l - расстояние между горизонтальной осью ролика и загнутым концом заготовки.

Дополнительный момент при транспортировании заготовки с загнутым концом, Н·м:

$$M_{\alpha 1} = \frac{P_{т.о} d_p}{2i\eta}, \quad /5.8/$$

где $P_{т.о}$ - окружное усилие, необходимое для транспортирования полосы с загнутым вниз концом, Н.

При максимальном изгибе полосы /до уровня плитного настила/ наименьшее значение силы $P_{т.о}$ без учета влияния кинетической энергии, запасенной в транспортируемом металле, определяется следующим образом.

Проецируя действующие силы на направление усилия $P_{т.о}$, запишем

$$P_{т.о} + P_M \sin \alpha - F_M \cos \alpha = 0. \quad /5.9/$$

Учитывая, что $\sin \alpha = \frac{2l}{d_p}$, из /5.9/ получим.

$$P_{т.о} = F_M \sqrt{1 - \left(\frac{2l}{d_p}\right)^2} - P_M \frac{2l}{d_p}. \quad /5.10/$$

Сила P_M , передаваемая полосе в направлении ее движения предыдущим роликом, возникает при буксовании и определяется так:

$$P_M = F_M \mu_0. \quad /5.11/$$

Подставляя в /5.8/ значение $P_{т.о}$ из /5.10/ и учитывая равенство /5.11/, после преобразований получаем следующее выражение для определения дополнительного момента при транспортировании полосы с загнутым концом, Н·м:

$$M_{\alpha 1} = \frac{F_M}{i\eta} \left(\frac{1}{2} \sqrt{d_p^2 - 4l^2} - l \mu_0 \right). \quad /5.12/$$

Дополнительный момент трения металла о боковые обрамления /проводки/ необходимо рассчитывать для рольгангов с косыми роликами. На рис. 5.3 изображена схема двигателя заготовки по косому рольгангу с указанием действующих сил и приняты следующие обозначения: v_p - окружная скорость ролика; v_n - продольная составляющая v_p в направлении движения заготовки; v_s - составляющая v_p в направлении буксования; m_n - масса наибольшей заготовки, приходящейся на один ролик; α - угол между осями ролика и рольганга.

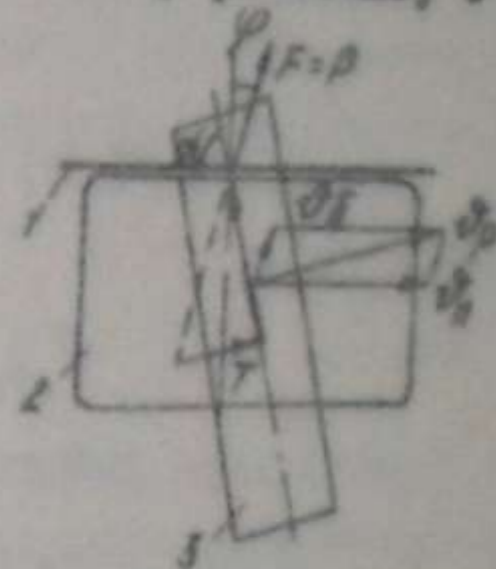


Рис. 5.3. Схема действия сил при движении заготовки по косому рольгангу: 1 - проводка; 2 - заготовка; 3 - ролик

На заготовку при буксовании действует сила трения F . Равная ей сила P приложена к проводке, Н:

$$P = F = 9,81 m_n \mu_0, \quad /5.13/$$

причем она направлена к вертикали под углом φ ;

$$\operatorname{tg} \varphi = \mu_n, \quad /5.14/$$

где μ_n - коэффициент трения скольжения заготовки о проводку.

Разложив силу $P = F$ на составляющие, определим окружное усилие на ролике, необходимое для движения заготовки вдоль проводки, Н:

$$T = F \cos(\alpha - \varphi) = 9,81 m_n \mu_0 \cos(\alpha - \varphi). \quad /5.15/$$

Дополнительный момент на валу электродвигателя, необходимый для преодоления трения заготовки о проводку,

$$M_{\alpha 2} = T \frac{d_p}{2i\eta} = \frac{9,81 m_n d_p \cos(\alpha - \varphi)}{2i\eta}. \quad /5.16/$$

Движение заготовки с трением о проводку будет наблюдаться в том случае, если полный статический момент транспортирования заготовки с учетом трения о боковые обрамления будет меньше момента буксовки, т.е. если

$$M_{\alpha 1} + M_{тр} + M_{\alpha 2} < M_0. \quad /5.17/$$

5.4. Расчет динамических моментов и ускорений

Для движения слитка по рольгангу должна преодолеваться сила инерции движущегося металла, Н:

$$F_i = m_{сл} a,$$

где a - ускорение движения слитка, м/с^2 .

При движении слитка по роликам с ускорением, но без проскальзывания /буксования/, сила инерции не может превышать силу трения между роликом и слитком, т.е.

$$F_f \leq 9,81 m_{сл} \mu_0 \quad /5.19/$$

Приравняв /5.18/ и /5.19/, найдем максимально возможное ускорение слитка

$$a_{max} = 9,81 \mu_0 \quad /5.20/$$

Используя значения μ_0 , указанные в табл.4.2, получаем следующие максимально возможные ускорения при транспортировании заготовок по стальным роликам:

для холодного металла $a_{max} \approx (0,98 \dots 1,47) \text{ м/с}^2$;

для горячего металла $a_{max} \approx (1,47 \dots 2,94) \text{ м/с}^2$.

При расчете электропривода рольгангов представляет интерес определение так называемого предельно-оправдываемого момента на валу двигателя, т.е. такого максимального пускового или тормозного момента, при котором движение транспортируемой полосы происходит без буксования. Если электродвигатель будет развивать момент, который больше предельно-оправдываемого, то это не повлияет на изменение ускорения металла, а только вызовет буксование, что понизит износостойчивость роликов.

Предельно-оправдываемый момент определяется из уравнения движения электропривода рольганга:

при ускорении $M_{п.о.у} = M_j + M_{ст.т. min}$ /5.21/

при замедлении $M_{п.о.з} = M_j - M_{ст.т. max}$ /5.22/

где $M_{п.о.у}$, $M_{п.о.з}$ - предельно-оправдываемые моменты соответственно при ускорении и замедлении электропривода, Н·м; $M_{ст.т. max}$, $M_{ст.т. min}$ - полные статические моменты при транспортировании слитка соответственно максимальной и минимальной массы, определяемые по /5.5/, Н·м; M_j - динамический момент на валу электродвигателя, Н·м.

В /5.21/ и /5.22/ значение статического момента при транспортировании минимального или максимального слитка учитывается так, чтобы получить наименьшее возможное значение максимально-оправдываемого момента. Если, например, величину $M_{п.о.у}$ рассчитать исходя из значения $M_{ст.т. max}$, то выбранный таким образом пусковой момент электродвигателя будет определять буксование ролика при транспортировании

Динамический момент на валу электропривода

$$M_j = \sum J \frac{d\omega}{dt} \quad /5.23/$$

где $\sum J$ - суммарный момент инерции системы /с учетом момента инерции транспортируемого слитка/, приведенный к валу электродвигателя, Н·м·с²;

$\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение электродвигателя, 1/с²;

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_p}{dt} i = \frac{2i}{d_p} \frac{dV}{dt} \quad /5.24/$$

ω_p - угловая скорость роликов, 1/с; i - передаточное число редуктора рольганга; $a = dV/dt$ - линейное ускорение металла на рольганге, м/с².

Принимая максимально возможное значение линейного ускорения в соответствии с /5.20/, из /5.23/ получаем следующее выражение для определения динамического момента по валу электропривода, Н·м:

$$M_j = \frac{2 \cdot 9,81 i \mu_0 \sum J}{d_p} \quad /5.25/$$

Таким образом, предельно-оправдываемые моменты при ускорении и замедления рольганга могут быть определены следующим образом:

$$M_{п.о.у} = \frac{2 \cdot 9,81 i \mu_0 \sum J + M_{ст.т. min}}{d_p} \quad /5.26/$$

$$M_{п.о.з} = \frac{2 \cdot 9,81 i \mu_0 \sum J - M_{ст.т. max}}{d_p} \quad /5.27/$$

Дополнительные моменты статического сопротивления необходимо учитывать, соответствующим образом корректируя значение полного статического момента, входящего в расчетные формулы /5.26/ и /5.27/

5.5. Определение пути перемещения слитка по рабочим рольгангам

Расчетное определение путей перемещения слитка на рабочих рольгангах в процессе прокатки - наиболее сложная задача, так как путь, проходимый слитком, зависит от его размеров, скорости захвата и выброса металла прокатными валками, числа кантовок и в значительной степени - от опыта работы операторов стана.

В частном случае путь перемещения слитка по рабочему рольгангу при выбросе его из валков теоретически рассчитывается по значению кинетической энергии, запасенной выбрасываемым слитком, Н·м:

$$A = \frac{m_{сл} v^2}{2} \quad /5.28/$$

где m_{ca} - масса слитка, кг; v_0 - линейная скорость выброса слитка из вальцов, м/с.

Эта энергия расходуется на преодоление работы сил трения при скольжении слитка по роликам рольганга. Работа сил трения, Н·м:

$$A = FS_0 = 9,81 m_{ca} \mu_0 S_0 \quad /5.29/$$

где S_0 - путь перемещения слитка после выброса его на неподвижный рольганг, м; F - сила трения, Н.

Из /5.28/ и /5.29/ путь, проходимый слитком после выброса его из клетки,

$$S_0 = \frac{v_0}{2 \cdot 9,81 \mu_0} \quad /5.30/$$

При выборе наиболее тяжелой программы прокатки с точки зрения загрузки электродвигателей рабочих рольгангов следует руководствоваться отношениями суммы всех путей выброса и суммы всех скоростей при выбросе металла к длительности цикла прокатки:

$$K_1 = \frac{\sum S_0}{t_4}; \quad K_2 = \frac{\sum v_0}{t_4} \quad /5.31/$$

Наиболее тяжелая программа прокатки характеризуется максимальными значениями K_1 и K_2 .

5.6. Пример расчета мощности электродвигателей группового электропривода рабочего рольганга чистовой клетки крупносортового стана 650

5.6.1. Исходные данные

На рис.5.4 показана кинематическая схема рабочего рольганга и указаны основные технические данные механизма, а в табл.5.6 приведены исходные данные, необходимые для расчета моментов статических сопротивлений на валу электродвигателя.

Расчет произведен для наиболее тяжелых условий работы рольганга при прокатке в четыре пропуса уголка 150x150x16 из заготовки массой 2160 кг, длиной 10,3 м.

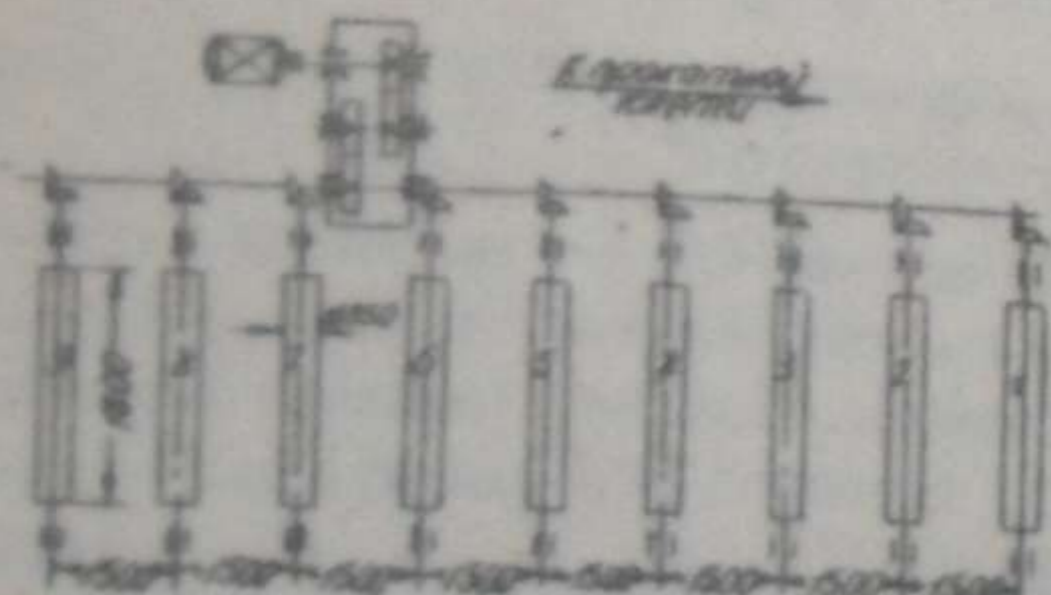


Рис.5.4. Кинематическая схема рабочего рольганга чистовой клетки крупносортового стана 650

Продолжительность цикла прокатки - 56,2 с. Режим работы рольганга принимается по идеальному графику, способствующему наибольшей производительности механизма и нагрузке электропривода.

Таблица 5.6

Расчет моментов статических сопротивлений для электропривода рольганга

| Исходные данные | Расчетная величина и формула | Результат расчета |
|----------------------------|---|-------------------------------------|
| $m_p = 632$ кг | 1. Момент холостого хода | $M_{xp} = 13,83$ Н·м |
| $d_w = 0,1$ м | $M_{xp} = \frac{9,81 z_p m_p d_w \mu_w}{2i\eta_x}$ | $M_{xp} = 10,5$ Н·м |
| $z_p = 9$ | $M_{x0} = 0,08 M_N; M_x = M_{xp} + M_{x0}$ | $M_x = 118,8$ Н·м = 0,09 M_N |
| $i = 3,53$ | 2. Момент при транспортировании | $M_{tp} = 23,3$ Н·м |
| $\eta_x = \eta_{tp} = 0,4$ | $M_{tp} = \frac{9,81 m_p (d_w / 2 \mu_w + f \cdot 10^{-2})}{i \eta_{tp}}$ | $M_{ct} = 146,6$ Н·м = 0,11 M_N |
| $\mu_w = 0,007$ | | $M_0 = 394,4$ Н·м |
| $m_N = m_{ca} = 2160$ кг | $M_{ct} = M_x + M_{tp}$ | $M_{c0} = 513,2$ Н·м = 0,39 M_N |
| $f = 0,15$ см | 3. Момент пробуксовки | $M_{п.б.у} = 1671$ Н·м = 1,27 M_N |
| $\eta_N = 0,8$ | $M_0 = \frac{9,81 m_p d_p \mu_0}{2i\eta_N}$ | $M_{п.з} = 137,9$ Н·м = 1,05 M_N |
| $d_p = 0,35$ | 4. Предельно-оправдываемый момент при ускорении | |
| $\mu_0 = 0,3$ | $M_{п.о.у} = \frac{2 \cdot 9,81 i \mu_0 \sum J + M_{ct}}{d_p}$ | |
| | 5. Предельно-оправдываемый момент при замедлении | |
| | $M_{п.о.з} = \frac{2 \cdot 9,81 i \mu_0 \sum J - M_{ct}}{d_p}$ | |
| | $\sum J = 25,75$ Н·м·с ² | |

Рольганг включается по направлению к стану вхолостую. Момент включения рольганга выбирается таким, чтобы по достижении установившейся скорости транспортируемая раскатным рольгангом заготовка подошла к девятому ролику. Заготовка перемещается к манипулятору с установившейся скоростью, после чего рольганг останавливается. Момент начала торможения выбирается так, чтобы после остановки рольганга конец заготовки находился на оси третьего ролика. При передвижении заготовки манипулятором рольганг не работает.

Второе включение рольганга производится при подаче заготовки в валки для первого пропуска. В период прокатки рольганг работает с установившейся скоростью. Перед окончанием прокатки рольганг реверсируется с предварительным торможением. Торможение начинается в такой момент времени, чтобы при уходе заготовки с первого ролика скорость рольганга была равна нулю.

Рольганг разгоняется в обратном направлении вхолостую. После второго пуска заготовка принимается на рольганг, вращающийся по направлению прокатки с установившейся скоростью. Затем начинается его торможение, причем момент начала торможения выбирается так, чтобы скорость рольганга была равна нулю при остановке заготовки, выброшенной клетью, после чего начинается разгон с заготовкой по направлению к стану. Работа рольганга при прокатке заготовки в третьем пропуске аналогична работе его при прокатке в первом пропуске.

Заготовка, выброшенная из клетки после прокатки в четвертом пропуске, транспортируется рабочим рольгангом на раскатной. Рабочий рольганг останавливается, торможение его начинается в момент прохождения заднего конца полосы через ось девятого ролика.

После паузы, продолжительность которой определяется временем, необходимым для передачи раската шлеппером с первой чистовой линии на вторую, и временем, необходимым для транспортирования очередной заготовки к стану, начинается второй цикл работы рольганга.

В рассматриваемом примере предварительно выбран асинхронный электродвигатель с контактными кольцами, имеющий следующие технические данные:

$$P_n = 80 \text{ кВт при ПВ} = 25\%; U_n = 380 \text{ В}; n_n = 582 \text{ об/мин}; M_n = 1314,5 \text{ Н м}; M_{\text{max}}/M_n = 3,3; J_A = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2; \text{исполнение} - \text{закрытое, с внешним обдувом.}$$

5.6.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Порядок расчета моментов статических сопротивлений, а также предельно-оправдываемого момента на валу электродвигателя приведен в табл.5.6.

5.6.3. Время управления электроприводом

Время соответственно разгона и торможения электропривода рольганга:

$$t_n = \frac{\sum J \omega_n}{M_n - M_c}; \quad /5.32/$$

$$t_T = \frac{\sum J \omega_n}{M_T + M_c}; \quad /5.33/$$

где M_n - средний пусковой момент электродвигателя; для разгона рольганга без буксования роликов по заготовке необходимо, чтобы пусковой момент не превышал предельно-оправдываемого момента при ускорении $M_{п.о.у} = 1,27 M_n$; для дальнейших расчетов принято $M_n = 0,9 M_n$; M_T - средний тормозной момент электродвигателя; для торможения без буксования тормозной момент не должен превышать предельно-оправдываемый момент при замедлении $M_{п.о.з} = 1,05 M_n$; для расчета принято $M_T = 0,8 M_n$ как при динамическом торможении, так и при торможении противовключением;

M_c - статический момент нагрузки на валу электродвигателя; при разгоне или при торможении рольганга вхолостую $M_c = M_A$; при разгоне или торможении рольганга с заготовкой $M_c = M_{c.т}$; при торможении рольганга во время первого, второго и третьего пропусков, когда заготовка находится в клетке и одновременно пробуксовывает по рольгангу, $M_c = M_{c.б}$;

$\sum J$ - суммарный момент инерции на валу электродвигателя; при разгоне или при торможении рольганга вхолостую $\sum J = 20,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$. В период разгона или торможения рольганга с заготовкой маховой момент изменяется в зависимости от массы раската, приходящегося на ролик рабочего рольганга; при разгоне перед первым пропуском, а также при торможении транспортирования и после второго пропуска $\sum J = 25,75 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$; при разгоне перед третьим пропуском и при транспортировании после четвертого пропуска $\sum J = 23,25 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$;

ω_n - установившаяся угловая скорость вращения электродвигателя /60,92 1/с/.

На рис.5.5 показана тахограмма работы, а в табл.5.7 приведены значения времени разгона и торможения рольганга, вычисленные по /5.32/ и /5.33/ для различных условий работы.

В этой же таблице указана продолжительность периодов установившегося движения рольганга, подробный расчет которых для упрощения опущен.

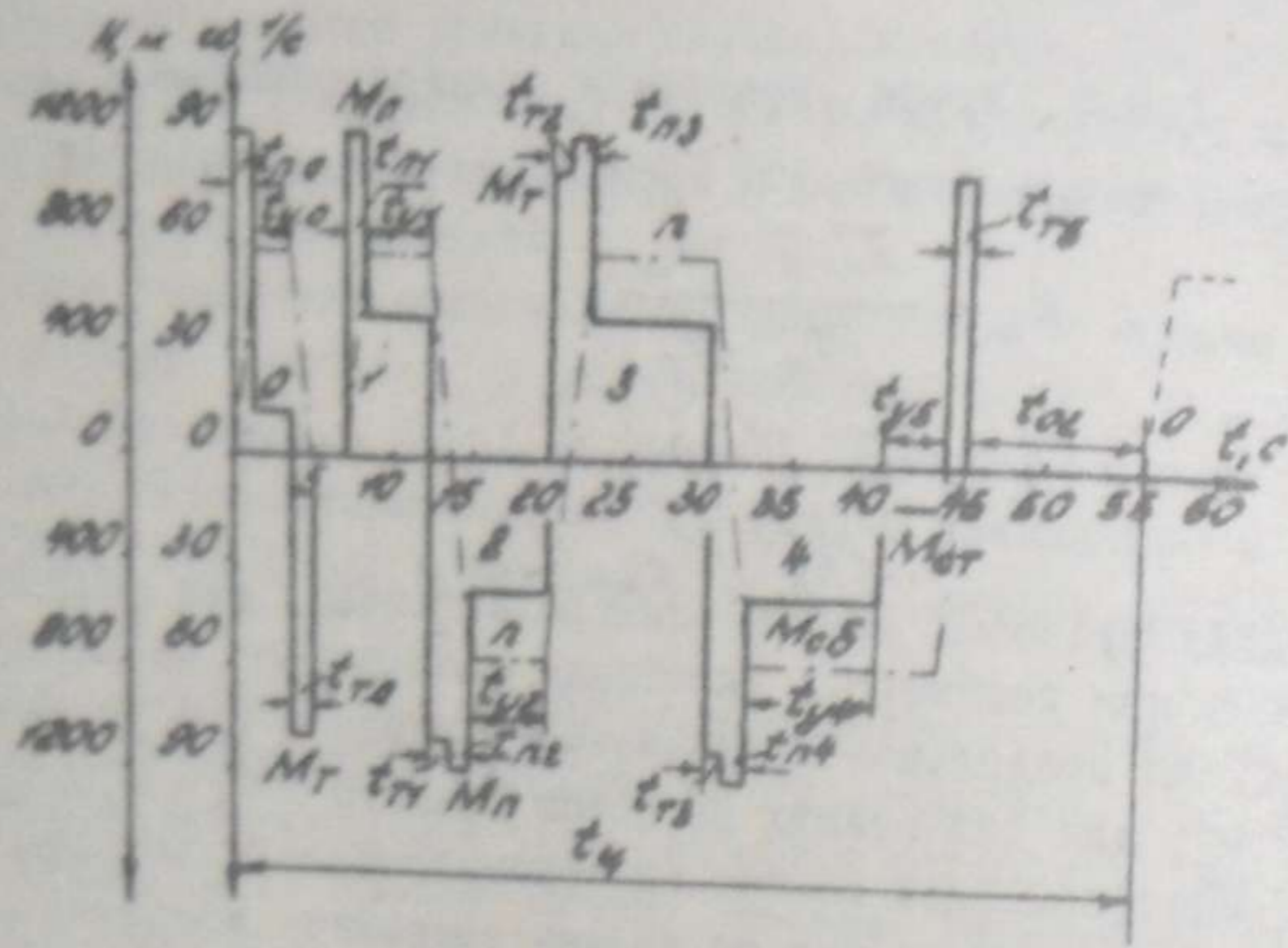


Рис. 5.5. Тахограмма и нагрузочная диаграмма электропривода рольганга

5.6.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

На рис. 5.5 изображена нагрузочная диаграмма электропривода рольганга. Так как в периоды установившегося движения рольганга при прокатке заготовки нет синхронизации между скоростью прокатки и скоростью рольганга, то ролики буксуют о заготовку. В эти периоды момент статической нагрузки на валу электродвигателя $M_c = M_{c.б}$.

Эквивалентный момент электродвигателя, приведенный к фактическому значению ЦВ = 76,3% /см. табл. 5.7/, определяется так:

$$M_{\theta} = \sqrt{\frac{M_n^2 \sum t_n + M_T^2 \sum t_T + M_{cr}^2 (t_{y0} + t_{y3}) + M_{c.б}^2 (t_{y1} + t_{y2} + t_{y4})}{\frac{1+\beta}{2} (\sum t_n + \sum t_T) + \sum t_y}}$$

$$= \sqrt{\frac{118,7^2 \cdot 6,5 + 1049,7 \cdot 5,1 + 146,2^2 (2,5 + 3,6) + 513,1^2 (4 + 5,2 + 7,1 + 8,8)}{0,75 (6,5 + 5,1) + 31,2}} = 780,8 \text{ Н·м} = 0,56 M_n$$

Таблица 5.7

Расчет времени работы электропривода рольганга

| Участок тахограммы | Разгон, $M_n = 0,9$ $M_n = 1182,1 \text{ Н·м}$ | | Установившееся движение | | Торможение $M_T = 0,8$ $M_n = 1049,7 \text{ Н·м}$ | | Цауза | |
|--|---|---|-------------------------|--|--|------------------|--------------------|--------------------|
| | $M_c, \text{ Н·м}$ | $t_{n, \text{ с}}$ | $M_{c, \text{ Н·м}}$ | $t_{y, \text{ с}}$ | $M_T, \text{ Н·м}$ | $t_T, \text{ с}$ | $t_{0, \text{ с}}$ | $t_{0, \text{ с}}$ |
| 1. Транспортирование заготовки перед первым пропуском | 20,5 | $t_{n0} = 1,2$ | $M_{c.T} = 146,2$ | $t_{y0} = 2,5$ | $M_{c.T} = 146,2$ | $t_{T0} = 1,3$ | $t_{01} = 2,4$ | |
| 2. Первый пропуск | 25,75 | $t_{n1} = 1,5$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{y1} = 4,0$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{T1} = 0,8$ | | |
| 3. Второй пропуск | 20,5 | $t_{n2} = 1,2$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{y2} = 5,2$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{T2} = 1,0$ | | |
| 4. Третий пропуск | 23,25 | $t_{n3} = 1,4$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{y3} = 7,1$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{T3} = 0,8$ | | |
| 5. Четвертый пропуск | 20,5 | $t_{n4} = 1,2$ | $M_{c.б} = 513,1$ | $t_{y4} = 8,8$ | - | - | | |
| 6. Транспортирование заготовки после четвертого пропуска | - | - | $M_{c.T} = 146,2$ | $t_{y5} = 3,6$ | $M_{c.T} = 146,2$ | $t_{T5} = 1,2$ | $t_{02} = 1,1$ | |
| | | $\sum t_n = 6,5$ | | $\sum t_y = 31,2$ | | | | |
| | | $t_n = 56,2 \text{ с}; \sum t_{\text{всего}} = 42,8 \text{ с};$ | | $\text{ЦВ} = \frac{\sum t_{\text{всего}}}{t_n} 100 = \frac{42,8}{56,2} \cdot 100 = 76,3\%$ | | | | |

Здесь β - коэффициент ухудшения вентиляции электродвигателя при стоянке, равный 0,5 /см. п.1.4.1/.

По каталожным данным электродвигателя, при ПВ = 76,3% допускает-ся нагрузка, равная 0,6 M_n /см. рис.1.11/.

Полученное при расчете значение эквивалентного момента показы-вает, что принятые значения пускового и тормозного моментов обеспе-чивают интенсивное протекание переходных процессов при одновременной допустимой нагрузке электродвигателя по нагреву.

5.7. Пример расчета мощности электродвигателей индивидуального электропривода рольганга за ножницами бльминга 850

5.7.1. Исходные данные

На рис.5.6 показана кинематическая схема рольганга и его ос-новные технические данные, в табл.5.8 и 5.9 приведены технологические

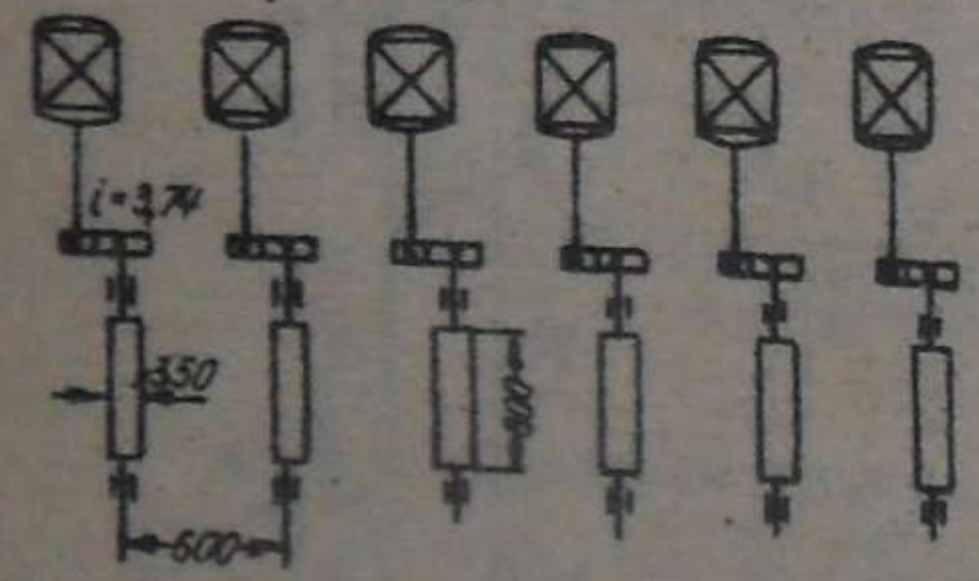


Рис.5.6. Кинематическая схема рольганга с индивидуальным электроприводом

данные и значения моментов инерции на валу электродвигателя, а в табл.5.10 - значение моментов стати-ческих сопротивлений для электропривода рольганга.

Для привода рольганга применены специальные электродвигатели со сле-дующей характеристикой: $U_n = 380$ В; $P_n = 5$ кВт при ПВ = 100%; $n_n = 516$ об/мин; пусковой момент $M_{пуск} = 196$ Н.м; пусковой ток $I_{пуск} = 46$ А; допустимый ток при ПВ = 100%; $I_n = 13,5$ А, ток холостого хода $I_x = 7,8$ А; номинальные потери $\Delta P_{ен} = 1250$ Вт / $\eta_n = 0,75$ /; $J_d = 0,825$ Н.м.с²; исполнение - закрытое, с полым валом.

Таблица 5.8

Исходные технологические данные для расчета мощности электропривода рольганга

| Технологические данные | Сечение заготовки, мм | | | |
|----------------------------------|-----------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Масса слитка $m_{сл}$, кг | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Производительность бльминга, т/ч | 59 | 78,5 | 93 | 93 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------|------|------|------|---|
| Длина раската перед ножницами до реза L , м | 11,5 | 6,5 | 4,2 | 4,2 | |
| Максимальная длина до реза $L_{рез}$, м | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 2,4 | |
| Максимальное число резов за один цикл $Z_{рез}$ | 10 | 6 | 4 | 2 | |
| Продолжительность цикла реза одной заготовки $t_{ц}$, с | 120,2 | 91,7 | 77,4 | 77,4 | |
| Скорость движения заготовки v , м/с | 2,54 | 2,54 | 2,54 | 2,54 | |
| Частота вращения роликов n_p , об/мин | 138 | 138 | 138 | 138 | |
| Момент инерции заготовки, приведенный к валу электродвигателя Н.м.с ² | 1,79 | 2,27 | 2,41 | 2,73 | |

Таблица 5.9

| Деталь | Момент инерция рольганга | |
|---|--------------------------|--|
| | 1 | 2 |
| Ротор электродвигателя | $J_d = 0,83$ | Момент инерция, приведенный к валу электро-двигателя, Н.м.с ² |
| Редуктор | $J_{ред} = 0,025$ | |
| Ролик | $J_p = 0,6$ | |
| Суммарный момент инерция при холостом ходе | $J_1 = 1,45$ | |
| Суммарный момент инерция с учетом заготовки сечением, мм: | $J_2 = 3,24$ | |
| 150x150 | $J_3 = 3,72$ | |
| 200x200 | $J_4 = 3,86$ | |
| 250x250 (при длине 1,2 м) | $J_5 = 4,18$ | |
| 250x250 (при длине 2,4 м) | | |

Расчет моментов статических сопротивлений

Таблица 5.10

| Исходные данные | Расчетная величина и формула | Результат расчета |
|-----------------|------------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 |

$K = \frac{m_M}{m_{ca}} = 0,79$
/см. табл. 5.5/

$m_{ca} = 2000 \text{ кг}$

$L_{рез} = 1,2 \text{ м}$
 $L = 11,5 \text{ м}$

$m_A = 500 \text{ кг}$

$d_{ш} = 0,13 \text{ м}$

$i = 3,74$

$\eta_x = \eta_{тр} = 0,48$

$\mu_{ш} = 0,007$

$f = 0,15 \text{ см}$

$d_p = 0,35 \text{ м}$
 $= 0,3$

$\mu_0 = 0,149$

$\rho = 0,3$

$\varphi = \arctg \mu_n = 17^\circ$

1. Расчетная масса металла на один ролик

$m_M = K m_{ca} \frac{L_{рез}}{L}$

$m_M = 156 \text{ кг}$

2. Момент холостого хода

$M_{х.р} = \frac{9,81 Z_p m_p d_{ш} \mu_{ш}}{2i\eta} = 0,05 M_{н}; M_{х.р} = 1,28 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$M_x = M_{х.р} + M_{х.0}$

$M_{х.0} = 4,61 \text{ Н}\cdot\text{м}$

3. Момент при транспортировании

$M_T = \frac{9,81 m_M (d_{ш} / 2 \mu_{ш} + f \cdot 10^{-2})}{i \eta_{тр}}$
 $M_T = 1,67 \text{ Н}\cdot\text{м}$

4. Дополнительный момент при транспортировании загнутой полосы

$M_{ст} = M_x + M_T + M_{A1} + M_{A2}$

$M_{A1} = 19,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$

5. Дополнительный момент при трении заготовки о боковые обрамления

$M_{A2} = \frac{9,81 m_M d_p \mu_0 \cos(\alpha - \varphi)}{2i\eta_n}$

6. Полный статический момент при транспортировании с учетом дополнительных сопротивлений

$M_{ст} = M_x + M_T + M_{A1} + M_{A2}$

$M_{ст} = 35,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$M_0 = 22,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$M_{с.б} = 28,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$

7. Момент пробуксовки

$M_0 = \frac{9,81 m_M d_p \mu_0}{\rho}; M_{с.б} = M_x + M_0$

$M_{п.о.з} = 239,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$

8. Предельно-оправдываемый момент при ускорении

Окончание табл. 5.10

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
|---|---|---|

$\alpha = 87^\circ$

9. Предельно-оправдываемый момент при замедлении

$M_{п.о.з} = 168,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$

$\eta_n = 0,96$

$M_{п.о.з} = \sum J_i \frac{i \mu_0}{2d_p} - M_{ст}$

$J_i = 3,24 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$
 $M_{п.о.з} = \sum J_i \frac{i \mu_0}{2d_p} - M_{ст}$

Расчет выполнен для наиболее тяжелых режимов работы, при наибольшем числе резов $Z_p = 10$ заготовки сечением 150x150 мм на куски длиной 1200 мм, а также для случая пореза на куски наибольшей длины /2400 мм/.

5.7.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Статические моменты определены с учетом дополнительных нагрузок, возникающих при транспортировании заготовки с загнутым концом, а также при трении заготовки о проводки.

Результаты расчета статических моментов на валу электродвигателя для различных технологических данных /см. табл. 5.9/ указаны в табл. 5.11.

Таблица 5.11

Моменты статических сопротивлений при транспортировании по рольгангу различных заготовок

| Сечение заготовки, мм | Длина заготовки, мм | Моменты по валу электродвигателя, Н·м | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------------|-------|----------|----------|----------|-----------|-------------|-------------|
| | | M_x | M_T | M_{A1} | M_{A2} | $M_{ст}$ | $M_{с.б}$ | $M_{п.о.з}$ | $M_{п.о.з}$ |
| 150x150 | 1200 | 5,9 | 1,67 | 19,0 | 7,65 | 35,1 | 28,3 | 239,2 | 168,9 |
| 200x200 | 1200 | 5,9 | 2,94 | 35,3 | 13,5 | 57,7 | 45,6 | 291,2 | 175,8 |
| 250x250 | 1200 | 5,9 | 4,61 | 54,5 | 21,0 | 86,0 | 67,2 | 328,8 | 145,4 |
| 250x250 | 2400 | 5,9 | 6,08 | 73,1 | 28,1 | 113,1 | 88,0 | 375,5 | 149,3 |

Наибольшая мощность двигателя, соответствующая максимальному значению суммарного статического момента $M_{ст} = 113,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ составляет $P_{max} = M_{ст} \omega_n = 113,1 \cdot 54 = 6,1 \text{ кВт}$.

Длительная мощность проверяемого двигателя, равная 5 кВт, близка к полученной величине 6,1 кВт и окончательно проверяется при расчете двигателя по тепловому режиму. Максимальный статический момент /118,1 Н·м/ и максимальный момент буксования меньше пускового момента двигателя /196 Н·м/. Таким образом, выбранный предварительно двигатель имеет достаточный запас по моменту.

5.7.3. Время управления электроприводом

Время разгона и торможения электропривода ролика определяется по соотношениям /5.32/ и /5.33/, в которые для рассматриваемого примера необходимо вводить следующие значения моментов на валу электропривода:

$$M_N = 0,7 M_{\text{пуск}} = 137,3 \text{ Н·м} < M_{\text{п.о.у}};$$

$$M_T = 0,7 M_{\text{пуск}} = 137,3 \text{ Н·м} < M_{\text{п.о.з}};$$

$$M_C = M_X = 5,9 \text{ Н·м.}$$

Длительность разгона и торможения ролика без металла

$$t_{\text{п.х}} = \frac{J_X \omega_N}{M_N - M_X} = \frac{1,45 \cdot 54}{137,3 - 5,9} = 0,6 \text{ с};$$

$$t_{\text{т.х}} = \frac{J_X \omega_N}{M_T + M_X} = \frac{1,45 \cdot 5,4}{137,3 + 5,9} = 0,55 \text{ с.}$$

Продолжительность транспортирования одной заготовки длиной 1,2 м со скоростью $v = 2,54 \text{ м/с}$

$$t_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{рез}}}{v} = \frac{1,2}{2,54} = 0,47 \text{ с.}$$

Ролики рольганга вращаются вхолостую с установившейся скоростью в течение времени $t_{x1} = 1,5 \text{ с}$ перед приемом заготовки и в течение времени $t_{x2} = 1,5 \text{ с}$ перед торможением после окончания транспортирования. Таким образом, длительность включения электродвигателя составит

$$t_{\text{вкл}} = t_{\text{п.х}} + t_{\text{т.х}} + t_{\text{тр}} + t_{x1} + t_{x2} =$$

$$= 0,6 + 0,55 + 0,47 + 1,5 + 1,5 = 4,62 \text{ с.}$$

При десяти резах за цикл заготовки сечением 150x150 мм относительная продолжительность включения электродвигателя

$$\epsilon = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_{\text{ц}}} Z_P = \frac{4,62}{120,2} \cdot 10 = 0,384.$$

Необходимое число включений электропривода в час при одном пуске и одном торможении рольганга, приходящихся на один порез полосы, составит

$$Z = \frac{3600}{t_{\text{ц}}} \cdot 2 Z_{\text{рез}} = \frac{3600}{120,2} \cdot 2 \cdot 10 \approx 600 \text{ вкл/ч}$$

5.7.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Для проверки электродвигателя по нагреву в рассматриваемом примере лучше всего рассчитать допустимое число включений в час ($Z_{\text{доп}}$) и сравнить его с требуемым при заданной технологии. Расчет выполняется по /1.79/, так как предварительно выбранный двигатель предназначен для повторно-кратковременного режима. При выполнении расчета примем $\alpha = 0,45$, $\beta = 0,5$. Так как статическая нагрузка двигателя невелика и не оказывает существенного влияния на нагрев, то можно принять $\chi \approx 0$. Пусковые $\Delta A_{\text{п}}$ и тормозные $\Delta A_{\text{т}}$ потери при динамическом торможении двигателя

$$\Delta A_{\text{п}} = \Delta A_{\text{т}} = \frac{J_X \omega_N^2}{2} = \frac{1,45 \cdot 54^2}{2} = 2114. \quad /5.35/$$

При принятых исходных данных допустимое число включений двигателя в час

$$Z_{\text{доп}} = 3600 \frac{[(1-\alpha)0,384 + 0,5] \cdot 10 - \frac{0,45 \cdot 0,384}{0,45+1}}{2114 + 2114 - \left(\frac{0,45}{0,45+1} - \frac{1-0,5}{2}\right) (0,6+0,55)} = 623 \text{ вкл/ч.}$$

Таким образом, $Z_{\text{доп}} > Z = 600$, что подтверждает правильность предварительного выбора двигателя.

5.8. Станинные ролики

Станинными называются первые ролики, расположенные по обе стороны прокатной клетки /до трех роликов с каждой стороны/. Они применяются только на больших обжимных заготовочных станах, прокатывающих роторные слитки. Эти ролики располагаются как можно ближе к валкам для надежной подачи металла в клетку со скоростью, соответствующей скорости вращения прокатных валков или несколько большей.

Окружная скорость станинных роликов должна быть равна скорости выходящего из клетки металла. При значительном расхождении скоростей металла и станинных роликов сила трения между заготовкой и роликами, обусловленная большим давлением металла на них /особенно на первый ролик/, может создать на роликах момент, достаточный для поломки деталей электропривода или способствующий быстрому износу роликов.

На рис.5.7 показаны кинематические схемы электропривода станинных роликов некоторых прокатных станков. Момент, создаваемый на станинных роликах выходящей из клетки заготовкой, передается на вал электро-двигателя. При наличии редуктора на валу электродвигателя создаются весьма большие вращающие моменты, что приводит к разбиванию шпоночных пазов и частому выходу из строя деталей передач. Для электропривода станинных роликов весьма важно соотношение моментов инерции электродвигателя и самих роликов.

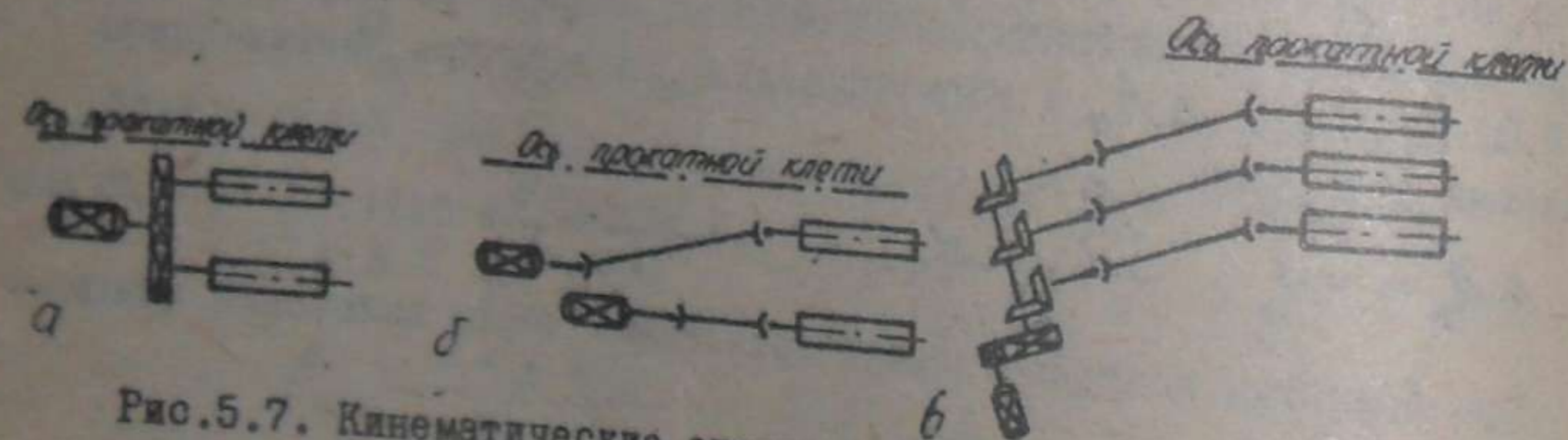


Рис.5.7. Кинематические схемы электропривода станинных роликов: а - обжимной клетки 900; б - блюминга 1000; в - обжимной клетки толстолистового стана 2250

В качестве примера определим вращающий момент, передаваемый на вал электродвигателя станинных роликов при редукторном и безредукторном электроприводе /рис.5.8/. Момент инерции одного ролика $J_p = 85 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$, передаточное число редуктора $i = 6$, момент инерции электродвигателя для привода с редуктором $J_{д1} = 2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$. Для безредукторного привода применяются специальные тихоходные электродвигатели, имеющие большой момент инерции $J_{д2} = 7,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$.

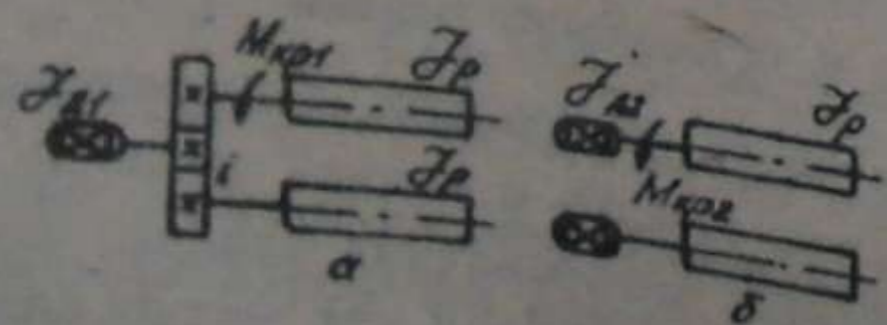


Рис.5.8. Редукторный /а/ и безредукторный /б/ электроприводы станинных роликов

При работе станинных роликов наибольшую опасность представляет режим проворачивания их выходящей из клетки заготовкой. В этом случае момент, создаваемый массой полосы и усилием прижатия ее к ролику, расходуется на разгон как самих роликов, так и электродвигателя. Благодаря наличию редуктора с большим передаточным числом для проворачивания электродвигателя требуется значительный момент $M_{кр}$, передаваемый редуктору через вал от первого ролика.

Пренебрегая незначительным моментом трения в опорах роликов и валов, можно получить из уравнения движения электропривода следующее соотношение для определения ускорения роликов по схеме на рис.5.8, а:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J_{д1} i^2 + 2J_p} = \frac{M_{кр1}}{J_{д1} i^2 + J_p} \quad /5.36/$$

откуда вращающий момент, действующий на вал между первым роликом и редуктором,

$$M_{кр1} = \frac{J_{д1} i^2 + J_p}{J_{д1} i^2 + 2J_p} M. \quad /5.37/$$

Здесь M - полный момент, создаваемый массой заготовки и усилием прижатия ее к ролику.

В /5.37/ для упрощения не учтены моменты инерции деталей передачи.

Подставив числовые значения моментов инерции и передаточного числа редуктора, соответствующие схеме на рис.5.8, а, получим $M_{кр1} = 0,67 M$, т.е. 67% полного момента передается через вал ролика к редуктору.

При безредукторном приводе станинных роликов /см. рис.5.8/ момент, передаваемый через вал от ролика к электродвигателю, значительно уменьшается вследствие изменения соотношения между моментами инерции механизма и привода и может быть определен так:

$$M_{кр2} = \frac{J_{д2}}{J_{д2} + J_p} M. \quad /5.38/$$

После подстановки числовых значений $J_{д2}$ и J_p в /5.38/ получим

$$M_{кр2} = 0,08 M,$$

т.е. только 8% полного момента передается через вал ролика к электродвигателю и расходуется на проворачивание последнего. Остальная часть полного момента расходуется на проворачивание самого ролика, момент инерции в этом случае значительно больше момента инерции электродвигателя.

Из приведенного ориентировочного сравнения видно, что момент, передаваемый через вал от ролика к электродвигателю, для безредукторного

привода уменьшается более чем в 8 раз. Точные расчеты с учетом моментов инерции соединительных муфт и деталей передачи показывают, что для безредукторного привода момент, передаваемый через вал, уменьшается в 5-6 раз. Это убедительно подтверждает целесообразность применения для станинных роликов безредукторного электропривода.

Расчет статических и динамических моментов для электродвигателей станинных роликов не отличается от изложенного в подразд. 5.3 и 5.4. Однако в работе станинных роликов имеются некоторые особенности, которые надо учитывать при определении продолжительности включения электропривода и проверке электродвигателей на нагрев.

По условиям нагрева электродвигателя наиболее тяжелым является режим работы ролика, расположенного непосредственно у клетки. Электродвигатели станинных роликов могут оказаться под током при выбросе заготовки из клетки, так как происходит принудительное раскручивание их движущимся слитком. Если необходимо ограничить нагрев электродвигателей, их следует отключать по достижении такой длины раската, при которой сила сцепления металла с рабочим рольгангом достаточна для подачи заготовки в клетку.

При расчете электропривода станинных роликов следует учитывать, что их разгон и работа при возврате заготовки в клетку происходят при статическом моменте, близком к моменту буксования.

Для электропривода станинных роликов в большинстве случаев применяются электродвигатели постоянного тока с широкой регулировкой скорости за счет изменения напряжения питающего их регулируемого источника напряжения. Лишь в редких случаях, как, например, для станинных роликов толстолистового стана 2250 /см. рис. 5.7/, применяется электропривод от асинхронного электродвигателя с фазовым ротором.

6. ПОДЪЕМНО-КАЧАЮЩИЕСЯ СТОЛЫ

6.1. Кинематические схемы и режим работы

Подъемно-качающиеся столы у рабочих клеток листовых и сортовых станов трио служат для передачи прокатываемого металла из нижнего ряда калибров в верхний и наоборот [8].

При длине полос менее 5...10 м применяются подъемно-параллельно-подъемно-качающиеся.

На рис. 6.2 показаны кинематические схемы подъемно-качающихся столов легкого типа, применяемых для тонколистовых станов трио, а на рис. 6.3 - схема подъемно-качающегося стола тяжелого типа для толстолистовых, крупносортовых и рельсобалочных станов.

Перекидные столы нереверсивных тонколистовых и жестокатальных станов служат для передачи прокатываемого металла с одной стороны стана на другую /рис. 6.4/.

Подъемные столы у рабочих клеток уравниваются пружинами, пневматическими цилиндрами или контргрузами. Столы тяжелого типа выполняются обычно с грузовым уравниванием.

Для привода подъемно-качающихся столов используются электродвигатели переменного тока, работающие в повторно-кратковременном режиме с частотой включений до 1500 в час. При столь тяжелых условиях работы мощность электродвигателя существенно зависит от динамических усилий, возникающих при изменении общего запаса кинетической энергии движущихся масс. Для уменьшения динамической нагрузки электропривода в некоторых случаях /для столов легкого типа/ применяют нереверсивные электродвигатели переменного тока, работающие в двигательном режиме и связанные с механизмом перемещения стола с помощью быстродействующих электромагнитных муфт.

6.2. Соотношения между скоростями стола, рычагов и кривошипа

Подъемно-качающиеся столы относятся к механизмам с переменным моментом инерции и переменным моментом статических сопротивлений. Поэтому для приведения статических моментов и моментов инерции к валу электродвигателя необходимо знать зависимость между угловыми скоростями кривошипа и промежуточных рычагов, а также соотношение между угловой скоростью поворота кривошипа.

Методика определения этих соотношений в основном одинакова для всех кинематических схем подъемно-качающихся столов. Рассмотрим вывод расчетных формул для наиболее распространенной кинематической схемы /см. рис. 6.3/. Обозначения кинематических элементов этой схемы показаны на рис. 6.5.

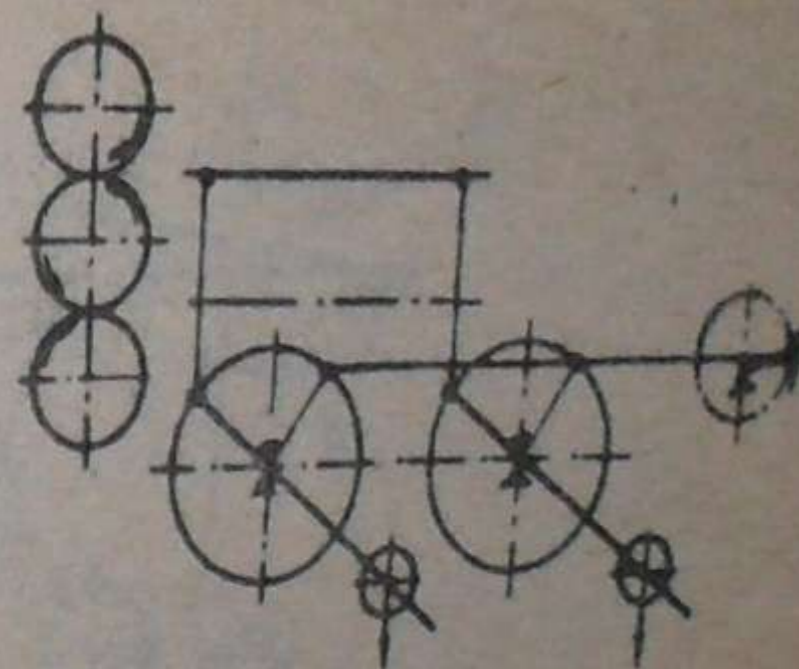


Рис. 6.1. Кинематическая схема параллельно-подъемного стола с грузовым уравниванием

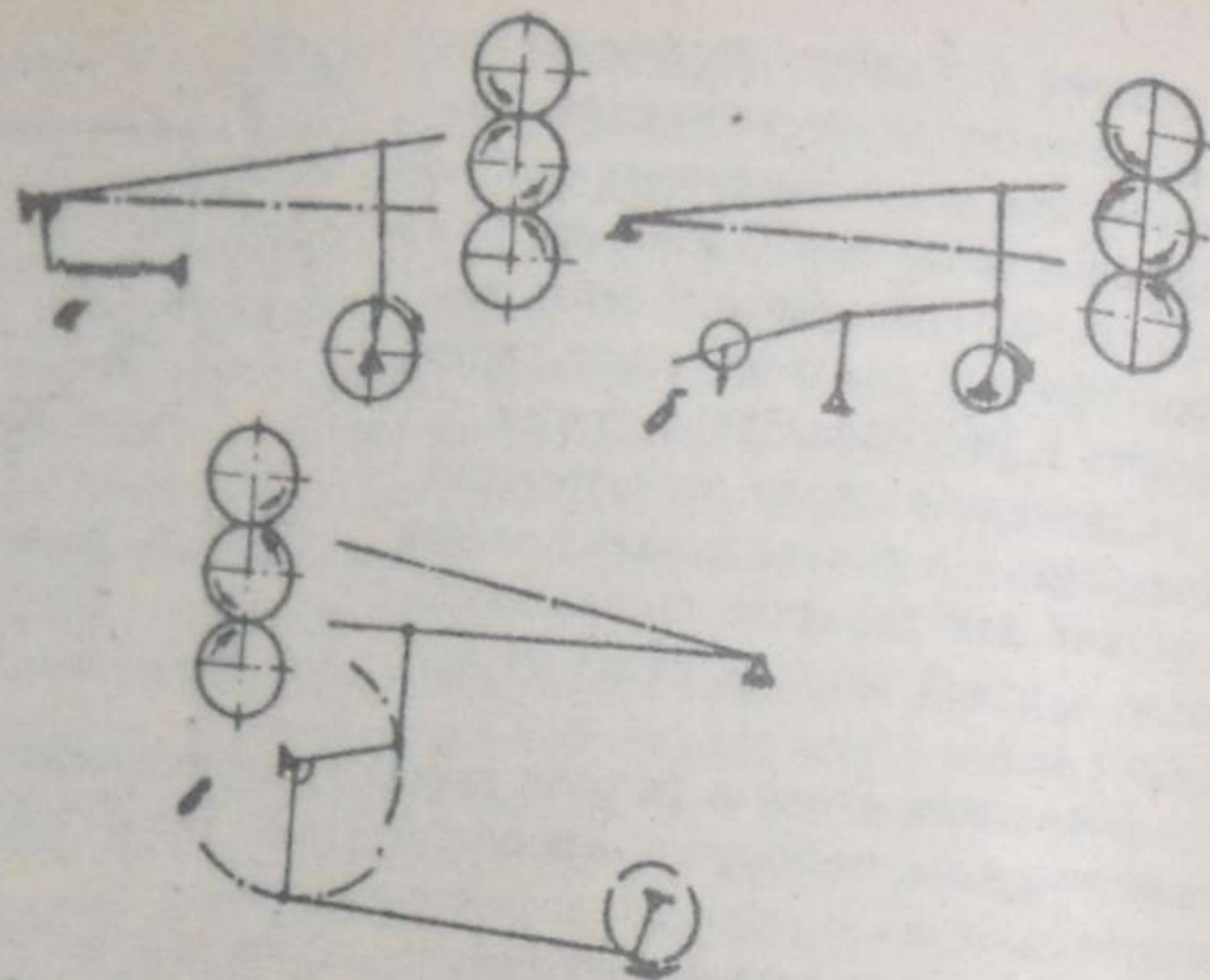


Рис. 6.2. Кинематические схемы подъемно-качающихся столов легкого типа: а - с пружинным уравновешиванием; б - с грузовым уравновешиванием; в - без уравновешивания

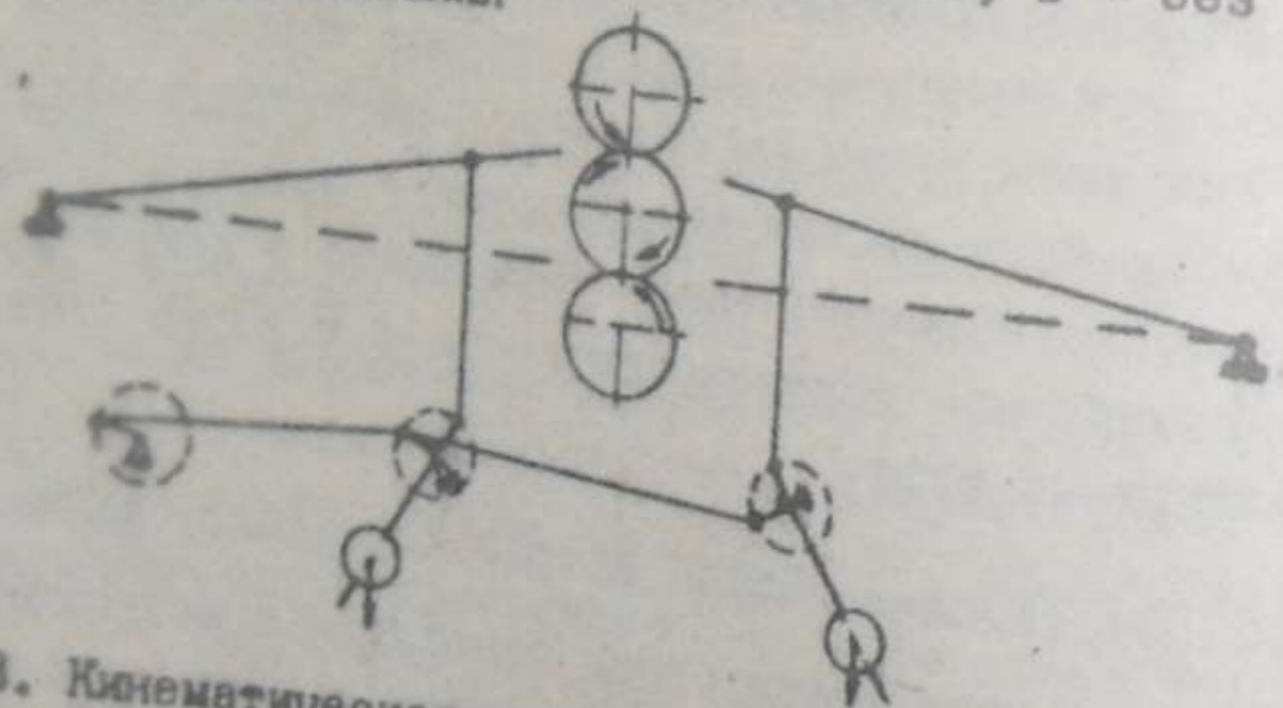


Рис. 6.3. Кинематическая схема подъемно-качающегося стола тяжелого типа с грузовым уравновешиванием и общим приводом

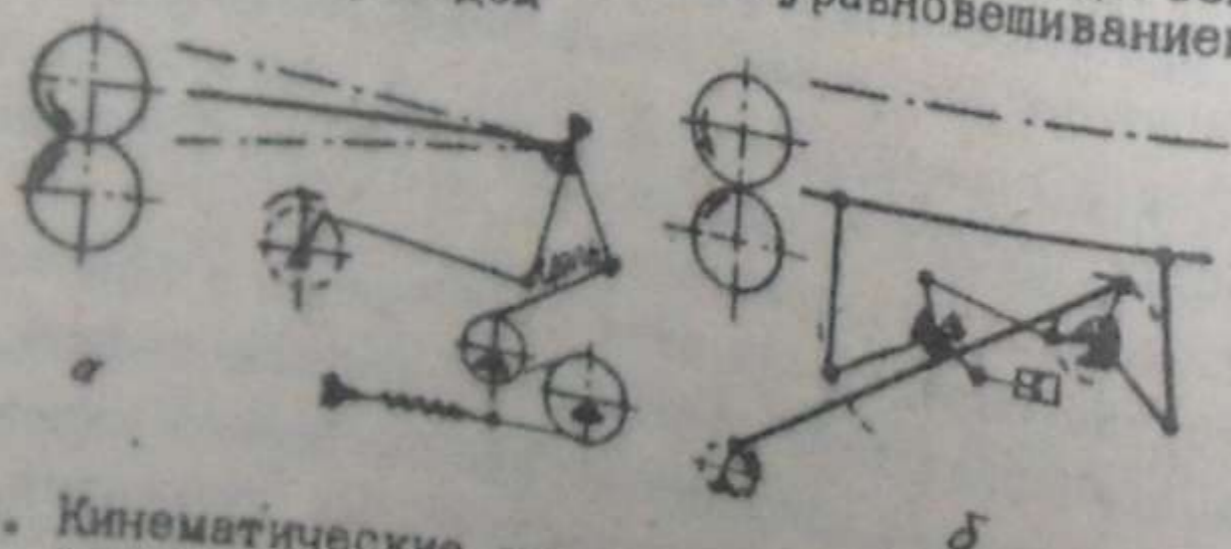


Рис. 6.4. Кинематические схемы перекидных столов неревверсивных станков дуо: а - с пружинным уравновешиванием; б - с пневматическим уравновешиванием

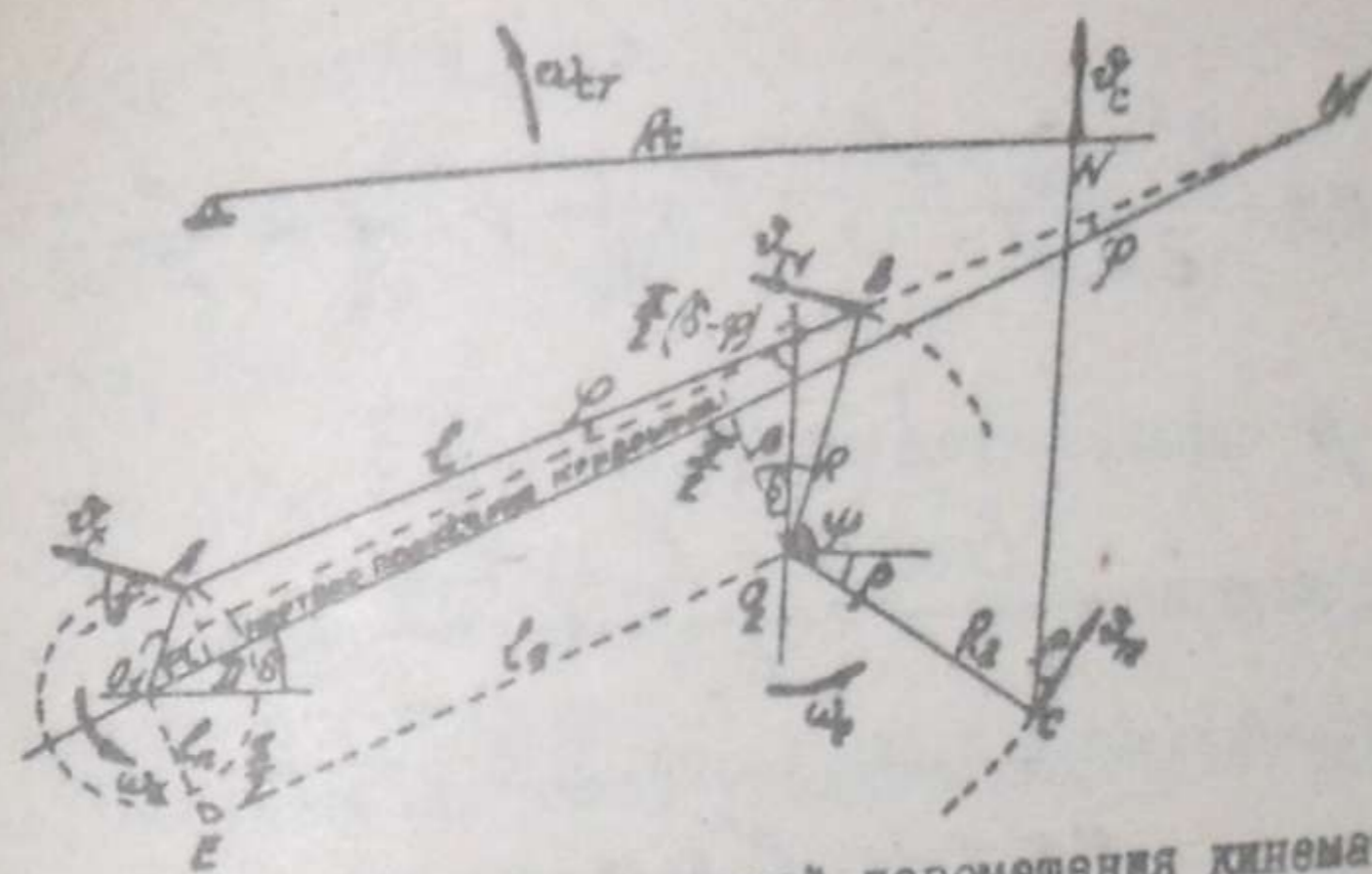


Рис. 6.5. Схема направления скоростей перемещения кинематических звеньев подъемно-качающегося стола

Соотношение между угловой скоростью кривошипа ω_k и угловой скоростью рычагов ω_p таково:

$$\omega_k = \frac{v_k}{R_1} = \frac{v_{T1}}{r} \quad /6.1/$$

Зависимость $\frac{v_k}{v_{T1}}$ находится из условия равенства проекций этих скоростей на направление тяги AB:

$$v_k \cos \gamma = v_{T1} \cos \lambda \quad /6.2/$$

Из кинематической схемы на рис. 6.5 следует, что

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \varphi); \quad /6.3/$$

$$\lambda = \beta - \varphi.$$

Таким образом,

$$\frac{v_k}{v_{T1}} = \frac{\cos \lambda}{\cos \gamma} = \frac{\cos(\beta - \varphi)}{\sin(\alpha + \varphi)} \quad /6.4/$$

Аналитические зависимости между углами α , β и φ могут быть найдены из следующей системы уравнений:

$$-R \sin \beta + l \cos \varphi = l_0 - r \cos \alpha; \quad /6.5/$$

$$R \cos \beta + l \sin \varphi = l_m + r \sin \alpha.$$

Возведя уравнения /6.5/ в квадрат и сложив их, получим после преобразования следующее уравнение для определения $\lambda = f(\alpha)$:

$$\sin(\beta - \varphi) = \sin \lambda = \alpha + \beta (\cos \alpha - k \sin \alpha), \quad /6.6/$$

$$a = \frac{R_1^2 - l_m - r^2}{2R_1 l}; \quad b = \frac{r}{R_1}; \quad k = \frac{r}{l} \quad /6.7/$$

Угол β определяется из /6.5/:

$$\sin \beta = \frac{l \cos \varphi - l_0 \cos \alpha}{R_1} \quad /6.8/$$

Из кинематической схемы на рис.6.5 следует, что

$$r \sin \alpha = l' \sin \varphi;$$

$$\sin \varphi = \frac{r}{l'} \sin \alpha,$$

где $l' = AM$.

Так как $\frac{r}{l'}$ весьма мало, то $\cos \varphi \approx 1$, и /6.8/ для определения $\sin \beta$ можно записать следующим образом:

$$\sin \beta = \frac{l - l_0 + r \cos \alpha}{R_1} \quad /6.9/$$

Угол φ определяется из /6.3/:

$$\varphi = \beta - \lambda. \quad /6.10/$$

Выведенные соотношения позволяют рассчитать $i\omega_2 = f(\alpha)$ в такой последовательности. Для различных значений α определяется угол β по /6.9/, а затем λ - по /6.6/ и φ - по /6.10/. После этого находим

$$i\omega_2 = \frac{\omega_k}{\omega_p} = \frac{\sigma_k}{\sigma_n} \frac{R_1}{r} = \frac{R_1 \cos \lambda}{r \sin(\alpha + \varphi)} \quad /6.11/$$

Соотношение между угловыми скоростями перемещения стола $\omega_{ст}$ и рычагов ω_p будет

$$i\omega = \frac{\omega_p}{\omega_{ст}} = \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_0} \frac{R_c}{R_2}, \quad /6.12/$$

где R_c - радиус качания стола (O_3N).

Отношение $\frac{v_{T2}}{v_c}$ определяется из равенства проекций этих скоростей на направление тяги CN . Принимая, что при перемещении стола тяга CN движется вертикально /что достаточно точно, так как угол поворота стола невелик/, получим

$$v_{T2} \cos \beta = v_c. \quad /6.13/$$

Из /6.12/ и /6.13/ следует, что

$$i\omega_1 = \frac{R_c}{R_2} \frac{1}{\cos \beta}. \quad /6.14/$$

Из рис.6.5 видно, что

$$\rho = \psi - \left[\frac{\pi}{2} - (\beta - \delta) \right], \quad /6.15/$$

где ψ - угол между рычагами R_1 и R_2 ; δ - угол между горизонталью и "мертвым" положением кривошипа.

Следовательно, соотношение между угловыми скоростями рычагов и стола будет таким:

$$i\omega_1 = \frac{R_c}{R_2} \frac{1}{\sin[\psi + (\beta - \delta)]}. \quad /6.16/$$

Соотношение между угловыми скоростями кривошипа и стола

$$i\omega = \frac{\omega_k}{\omega_{ст}} = i\omega_1 i\omega_2 = \frac{R_1 R_c}{r R_2} \frac{\cos \lambda}{\sin(\alpha + \varphi) \sin[\psi + (\beta - \delta)]}. \quad /6.17/$$

6.3. Расчет моментов статических сопротивлений

При выводе расчетных формул для определения моментов статических сопротивлений на валу электродвигателя приняты следующие допущения:

- а/ масса стола $m_{ст}$ распределена равномерно по его длине L ;
- б/ сила от массы слитка $F_{сл}$ приложена на расстоянии радиуса качания стола R_c /это допущение не вносит заметных изменений в конечный результат расчета, так как $m_{сл} \ll m_{ст}$ /;
- в/ силы $F_{ст}$ и $F_{сл}$ действуют вертикально, т.е. угол качания стола не учитывается как весьма малый /4...6°/;
- г/ момент от масс отдельных рычагов и тяг не учитывается;
- д/ не учитываются незначительные силы трения в цапфе стола и в шарнирах рычагов и тяг.

На рис.6.6 показана схема действия сил на механизм подъемно-качающегося стола.

Момент на валу кривошипа (M_k) в период подъема стола определяется из уравнения, составленного на основании принципа виртуальных перемещений системы:

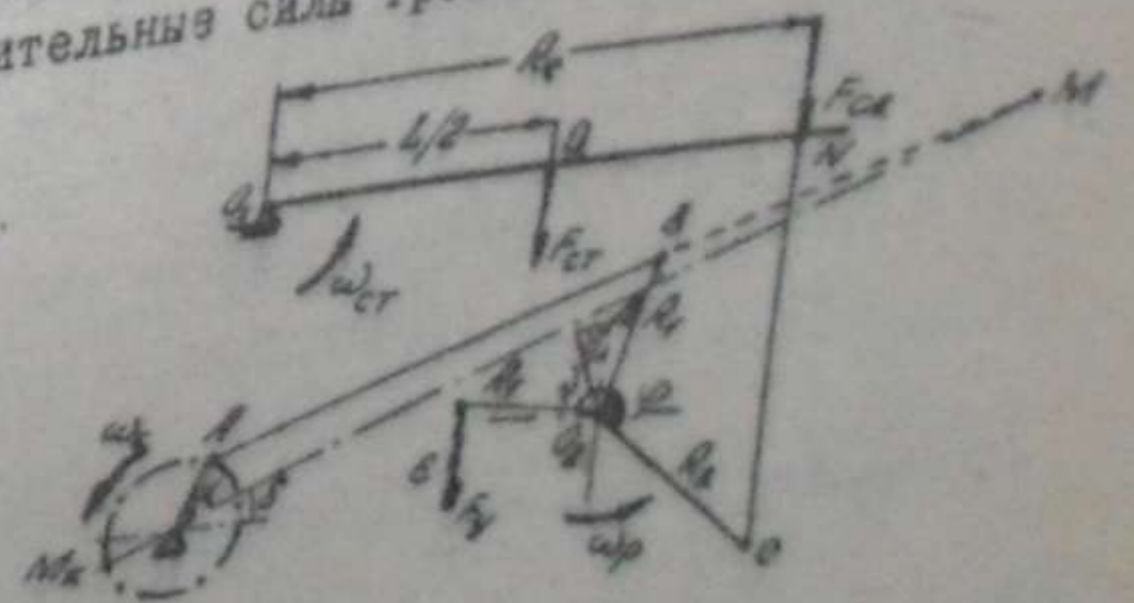


Рис.6.6. Схема действия сил в механизме подъемно-качающегося стола

$$M_k \omega_k + F_{сл} \cos \epsilon R_2 \omega_p - M_{тр} \omega_p - F_{ст} R_c \omega_{ст} \quad /6.18/$$

где F_y - сила, создаваемая противовесом; $M_{тр}$ - момент трения на валу O_2 ; $F_{р.ст}$ - равнодействующая сила от масс стола и слитка, приложенная в точке

$$F_{р.ст} = F_{ср} + F_{ст} \frac{L}{2R_c} \quad /6.19/$$

Из /6.18/ определим

$$M_k = \frac{F_{р.ст} R_c}{i\omega} + \frac{M_{тр}}{i\omega_2} - \frac{F_y \cos \epsilon R_3}{i\omega_2}, \quad /6.20/$$

где $i\omega_2$ и $i\omega$ - соотношения между угловыми скоростями, определяемые соответственно по /6.11/ и /6.17/.

Угол ϵ между направлением силы F_y и нормалью к рычагу R_3 изменяется при повороте кривошипа. Он определяется так:

$$\epsilon = \frac{\pi}{2} - (\nu + \delta - \beta); \quad /6.21/$$

$$\cos \epsilon = \sin(\nu + \delta - \beta), \quad /6.22/$$

где ν - угол между рычагами R_3 и R_1 ; δ - угол между горизонталью и "мертвым" положением кривошипа; β - угол между рычагом R_1 и нормалью к "мертвому" положению кривошипа; $\beta = f(\alpha)$ определяется по /6.9/.

Если момент трения не задан, то он определяется следующим образом:

$$M_{тр} = P \frac{d}{2} \mu, \quad /6.23/$$

где P - реакция опоры O_2 ; d - диаметр цапф вала O_2 ; μ - коэффициент трения скольжения, принимаемый равным 0,1.

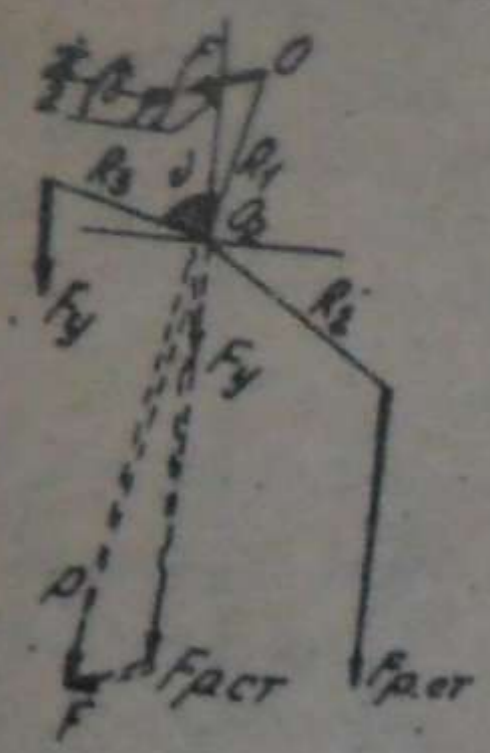


Рис. 6.7. Определение реакции опоры рычагов

На рис. 6.7 показана схема действия сил на рычаги R_1 , R_2 и R_3 , по которой определяется реакция P как равнодействующая приложенных к рычагам сил. Силы $F_{р.ст}$ и F_y направлены вертикально, а сила F действует в направлении тяги AB под углом $\frac{\pi}{2} (\delta - \varphi)$ к вертикали /см. рис. 6.5/.

Реакция

$$P = \sqrt{[F_y + F_{р.ст} + F \sin(\delta - \varphi)]^2 + [F \cos(\delta - \varphi)]^2}$$

Так как

$$[F_y + F_{р.ст} + F \sin(\delta - \varphi)]^2 \gg [F \cos(\delta - \varphi)]^2$$

для практически применяемых конструкций, то с достаточной точностью можно считать, что

$$P = F_y + F_{р.ст} + F \sin(\delta - \varphi). \quad /6.24/$$

Сила F определяется по моменту на валу кривошипа:

$$F = \frac{M_k}{r \sin(\alpha + \varphi)}. \quad /6.25/$$

С учетом /6.24/ и /6.25/ момент трения будет

$$M_{тр} = [F_y + F_{р.ст} + \frac{M_k \sin(\delta - \varphi)}{r \sin(\alpha + \varphi)}] \frac{d}{2} \mu. \quad /6.26/$$

Подставляя в /6.20/ значение $M_{тр}$ из /6.26/ и $\cos \epsilon$ из /6.22/ и решая полученное таким образом уравнение относительно M_k , после преобразований находим

$$M_k = \frac{F_{р.ст} R_c \frac{1}{i\omega} - F_y R_3 \frac{\sin(\nu + \delta - \beta)}{i\omega_2} + (F_y + F_{р.ст}) \frac{d}{2} \mu \frac{1}{i\omega_2}}{1 - \frac{d}{2R_1} \mu \frac{\sin(\delta - \varphi)}{\cos(\beta - \varphi)}}$$

Для реальных параметров подъемно-качающихся столов

$$\frac{d}{2R_1} \mu \frac{\sin(\delta - \varphi)}{\cos(\beta - \varphi)} \ll 1.$$

Поэтому величину M_k с большой точностью можно определить так:

$$M_k = \frac{F_{р.ст} R_c}{i\omega} - \frac{F_y R_3 \sin(\nu + \delta - \beta)}{i\omega_2} + \frac{F_y + F_{р.ст}}{i\omega_2} \frac{d}{2} \mu. \quad /6.27/$$

Для периода опускания стола уравнение виртуальных перемещений аналогично /6.18/, изменяются лишь знаки в соответствии с направлением действия моментов:

$$M_k \omega_k - F_y \cos \epsilon R_3 \omega_p - M_{тр} \omega_p + F_{р.ст} R_c \omega_c = 0. \quad /6.28/$$

Решение /6.28/ относительно M_k , выполненное так же, как и для /6.27/, приводит к следующему результату:

$$M_k = \frac{F_y R_2}{l \omega_2} \sin(\gamma + \delta - \beta) - \frac{F_{act} R_2}{l \omega} + \frac{F_y + F_{act}}{l \omega_2} \frac{d}{2} \mu. \quad /6.29/$$

Момент статических сопротивлений на валу электродвигателя

$$M_c = \frac{M_k}{i \eta}, \quad /6.30/$$

где η , i - соответственно КПД и передаточное число редуктора между электродвигателем и кривошипом.

6.4. Расчет приведенного момента инерции на валу электродвигателя

Суммарный момент инерции на валу электродвигателя

$$J = \frac{\sum J_k}{i^2} + J_{ред} + J_d. \quad /6.31/$$

где $\sum J_k$ - суммарный момент инерции, приведенный к валу кривошипа; $J_{ред}$ - момент инерции редуктора и других элементов передачи, приведенный к валу электродвигателя; J_d - момент инерции электродвигателя.

Значение $\sum J_k$ определяется как сумма приведенных к валу кривошипа моментов инерции отдельных кинематических элементов механизма /противовес, стол, слиток, тяги и рычаги/. Для кинематической схемы на рис.6.3

$$\sum J_k = \sum J_{(01)} + \frac{\sum J_{(02)}}{i^2} + \frac{\sum J_{(03)}}{i^2}, \quad /6.32/$$

где $\sum J_{(01)}$ - суммарный момент инерции кривошипа и шатуна, приведенный к валу кривошипа (O_1); $\sum J_{(02)}$ - суммарный момент инерции противовеса и рычагов относительно оси вращения последних (O_2); $\sum J_{(03)}$ - суммарный момент инерции стола и слитка относительно оси качания стола (O_3).

Составляющие, входящие в /6.32/, определяются следующим образом:

$$\sum J_{(01)} = J_k + J_{ш} = \frac{1}{3} m_k r^2 + m_{ш} r^2 \sin^2 \alpha, \quad /6.33/$$

где J_k , $J_{ш}$ - момент инерции соответственно кривошипа и шатуна; m_k , $m_{ш}$ - масса соответственно кривошипа и шатуна.

Расчеты показывают, что величина $\sum J_{(01)}$ весьма мала и ею можно пренебречь:

$$\sum J_{(02)} = J_{пр} + \sum J_p, \quad /6.34/$$

где $J_{пр}$ - момент инерции противовеса; $\sum J_p$ - суммарный момент инерции рычагов и тяг относительно оси O_2 ;

$$J_{пр} = \frac{m_{пр} D_{пр}^2}{8} + m_{пр} R_3^2; \quad /6.35/$$

$$\sum J_p = \frac{1}{3} (m_{p1} R_1^2 + m_{p2} R_2^2 + m_{p3} R_3^2) + m_r R_2^2, \quad /6.36/$$

где m_r , $m_{пр}$, m_{p1} , m_{p2} , m_{p3} - масса соответственно тяги CH , цилиндрического противовеса и рычагов; $D_{пр}$ - диаметр противовеса. Величина $\sum J_p$ весьма мала. С достаточной точностью ее можно учитывать приближенно, как $0,1 J_{пр}$. В этом случае

$$\sum J_{(02)} = 1,1 J_{пр}. \quad /6.37/$$

Момент инерции относительно оси качания стола

$$\sum J_{(03)} = 1,15 (J_{ст} + J_{сл}) = 1,15 \left(\frac{1}{3} m_{ст} l^2 + m_{сл} R_c^2 \right). \quad /6.38/$$

Здесь $J_{ст}$ - момент инерции стола массой $m_{ст}$ и длиной l ; $J_{сл}$ - момент инерции слитка, определяемый с допущением, что линейные размеры слитка малы по сравнению с расстоянием его до центра вращения (R_c). Коэффициент 1,15 учитывает неравномерное распределение массы по длине стола.

По приведенным соотношениям определяется зависимость изменения суммарного момента инерции на валу электродвигателя в функции угла поворота кривошипа /рис.6.8/. Момент инерции на валу электродвигателя при повороте кривошипа изменяется в пределах $1,5 \dots 4 J_d$.

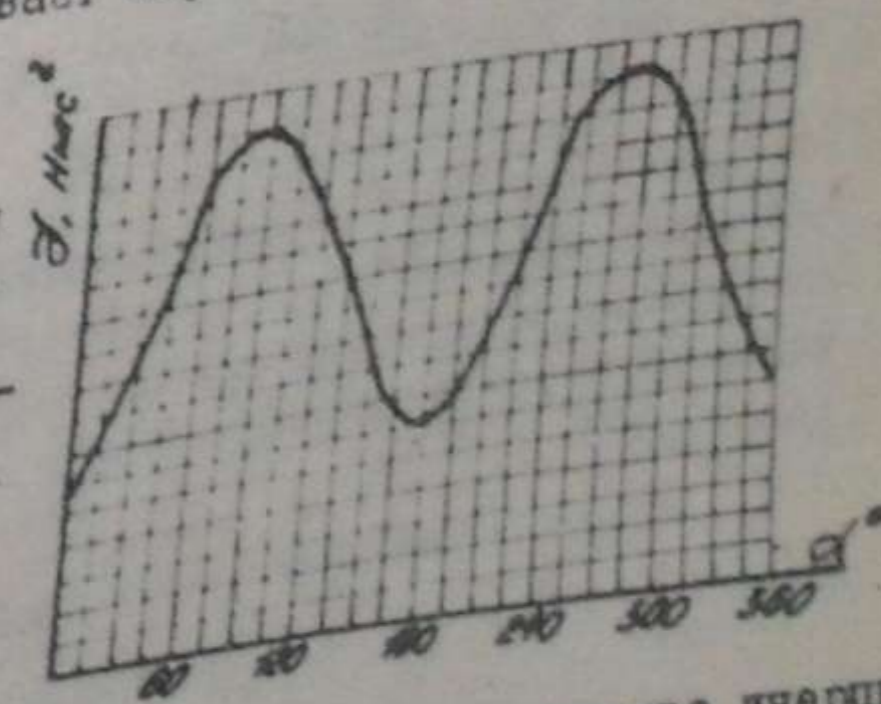


Рис.6.8. Изменение момента инерции на валу электродвигателя подъемно-качающегося стола

6.5. Расчет тахограммы и нагрузочной диаграммы электропривода

При расчете тахограммы работы электропривода подъемно-качающихся столов следует учитывать изменения статического момента и момента инерции в зависимости от угла поворота кривошипа. Поэтому продолжительность неустановившегося движения электропривода определяется по значению скорости, найденному из уравнения работы на малом отрезке пути:

$$(M_{д.ср} \pm M_{с.ср}) i \Delta \alpha = \frac{J_2 \omega_2^2}{2} - \frac{J_1 \omega_1^2}{2}, \quad /6.39/$$

где $M_{д.ср}$ - средний момент, развиваемый двигателем при изменении скорости его от ω_1 до ω_2 на малом отрезке пути кривошипа $\Delta \alpha$ рад. В периоды разгона и торможения величина $M_{д.ср}$ соответственно равна среднему пусковому M_n и среднему тормозному M_r моментам электро-двигателя; $M_{с.ср}$ - средний момент статического сопротивления на валу электродвигателя при изменении угла поворота кривошипа от α_1 до $\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta \alpha$; J_2 и J_1 - моменты инерции на валу электродвигателя, соответствующие углам поворота кривошипа α_2 и α_1 .

Решая /6.39/ относительно скорости ω_2 в конечной точке малого отрезка пути, получаем следующую формулу для определения скорости электродвигателя при повороте кривошипа на $\Delta \alpha$:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{J_1 \omega_1^2 + i \Delta \alpha (M_{д.ср} \pm M_{с.ср})}{J_2}}. \quad /6.40/$$

Знак "-" в /6.40/ принимается при разгоне электропривода, а "+" - при торможении. Для правильного проведения расчетов по /6.40/ необходимо задаваться малыми значениями $\Delta \alpha$ /0,1...0,2 рад/ и величиной $M_{д.ср}$ в после нахождения ω_2 проверять правильность принятой величины.

Время изменения скорости от ω_1 до ω_2 при повороте кривошипа на угол $\Delta \alpha$

$$\Delta t = \frac{2i \Delta \alpha}{\omega_2 + \omega_1} \quad /6.41/$$

По /6.40/ и /6.41/ рассчитываются кривые $\alpha = f(t)$, $\omega = f(t)$ и $\omega = f(\alpha)$ при разгоне и торможении электропривода, причем при расчете кривых торможения необходимо отсчитывать углы $\Delta \alpha$ от конечного положения кривошипа.

Угол поворота кривошипа при установившемся движении электропривода $\alpha_f = 180 - \alpha_n - \alpha_r$, где α_n и α_r - углы поворота кривошипа, соответствующие периодам пуска и торможения.

Время работы электродвигателя с установившейся скоростью

$$t_y = \frac{\alpha_y i}{\omega_y}. \quad /6.42/$$

В некоторых случаях электропривод подъемно-качающихся столов работает только в режиме пуска и замедления, без разгона до установившейся частоты вращения. Точка пересечения кривых при пуске и торможении определяет угол поворота кривошипа, при котором необходимо начать торможение электродвигателя.

Построенный в процессе расчета тахограммы график $\alpha = f(t)$ позволяет построить также нагрузочную диаграмму моментов на валу электродвигателя при подъеме и опускании стола: $M_d = f(t)$.

В периоды разгона и торможения момент на валу электродвигателя принимается равным выбранному значению $M_{д.ср}$ на соответствующих участках изменения скорости. Если торможение производится механическими тормозами при отключенном электродвигателе, то в этот период электромагнитный момент на валу электродвигателя принимается равным нулю.

При наличии электромагнитной муфты, соединяющей электродвигатель с редуктором, момент на валу двигателя в период разгона принимается равным максимальному моменту, который может передать электромагнитная муфта.

В период движения с установившейся скоростью момент на валу электродвигателя рассчитывают по уравнению движения с учетом изменения статической и динамической нагрузок в зависимости от угла поворота кривошипа, а именно:

$$M_d = M_c + \frac{\omega_y}{2} \frac{dJ}{dt} = M_c + \frac{\omega_y}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt}, \quad /6.43/$$

где M_c определяется по кривым $M_c = f(\alpha)$ и $\alpha = f(t)$ для соответствующих значений времени и угла поворота кривошипа. Величины dJ/dt и $d\alpha/dt$ определяются по кривым $J = f(\alpha)$ и $\alpha = f(t)$.

Мощность электродвигателя на нагрев проверяется методом эквивалентного момента по нагрузочной диаграмме $M_d = f(t)$.

6.6. Пример расчета мощности электродвигателя подъемно-качающегося стола клетки трио среднелистового стана

6.6.1. Исходные данные

Числовые значения величин, необходимых для расчета (см. рис. 6.5, 6.6):

- $L = 7130 \text{ мм};$
- $R_3 = 1100 \text{ мм};$
- $l_M = 350 \text{ мм};$
- $m_{ст} = 50 \text{ Т};$
- $q = 0,9;$
- $m_k = 32 \text{ кг};$
- $R_c = 5880 \text{ мм};$
- $r = 230 \text{ мм};$
- $\delta = 15^\circ;$
- $m_{пр} = m_y = 8 \text{ Т};$
- $\mu = 0,1;$
- $m_w = 300 \text{ кг};$
- $R_1 = 420 \text{ мм};$
- $l_1 = 2388 \text{ мм};$
- $\gamma = 82^\circ;$
- $m_{сл} = 3;$
- $d = 0,15 \text{ м};$
- $J_p = 2,5 \text{ Н.м.с}^2$
- $R_2 = 425 \text{ мм};$
- $l_2 = 2380 \text{ мм};$
- $\psi = 115^\circ;$
- $i = 24,2;$
- $D_{пр} = 1000 \text{ мм};$

Время цикла /один подъем и опускание стола/ $t_n = 20 \text{ с};$ время подъема или опускания стола не должно превышать 2,5 с.

Для привода подъемно-качающегося стола предварительно выбирается асинхронный электродвигатель с фазным ротором, имеющий следующие данные: $U_H = 380 \text{ В};$ $P_H = 60 \text{ кВт}$ при ПВ = 25%; $n_H = 578 \text{ об/мин};$ $M_H = 980 \text{ Н.м};$ $M_{max} = 2940 \text{ Н.м};$ $J_d = 5,25 \text{ Н.м.с}^2.$

6.6.2. Расчет соотношений $i_{\omega_1}, i_{\omega_2}$ и i_{ω}

Соотношения между угловыми скоростями при различных значениях угла поворота кривошипа вычисляются по /6.6/, /6.9/ - /6.11/, /6.16/ и /6.17/.

После подстановки необходимых данных, эти выражения принимают следующий вид:

$$\sin \lambda = 0,548 (\cos \alpha - 0,0965 \sin \alpha); \quad /6.44/$$

$$\sin \beta = 0,019 + 0,548 \cos \alpha; \quad /6.45/$$

$$\varphi = \beta - \lambda; \quad /6.46/$$

$$i_{\omega_2} = 1,83 \frac{\cos \lambda}{\sin (\alpha + \varphi)}; \quad /6.47/$$

$$i_{\omega_1} = \frac{13,8}{\cos (10^\circ + \beta)};$$

$$i_{\omega} = i_{\omega_1} i_{\omega_2} = 25,2 \frac{\cos \lambda}{\sin (\alpha + \varphi) \cos (10^\circ + \beta)}. \quad /6.49/$$

Результаты расчета, выполненного по указанным формулам, сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Числовые значения соотношений скоростей для различных углов поворота кривошипа

| Подъем стола | | | | | | |
|-----------------|-----------|---------|-----------|----------------|----------------|--------------|
| α | λ | β | φ | i_{ω_2} | i_{ω_1} | i_{ω} |
| 0 | 34°30' | 34°30' | 0 | ∞ | 19,3 | ∞ |
| 30 | 26°40' | 29°30' | 2°50' | 3,01 | 17,9 | 54 |
| 60 | 13°10' | 17° | 3°50' | 1,99 | 15,5 | 30,8 |
| 90 | -3°44' | 1°05' | 4°49' | 1,84 | 14,1 | 26,0 |
| 120 | -18°30' | -14°45' | 3°45' | 2,19 | 13,9 | 30,5 |
| 150 | -23°10' | -27° | 1°10' | 3,34 | 14,4 | 48,0 |
| 180 | -32° | -31°50' | 0°10' | ∞ | 14,9 | ∞ |
| Опускание стола | | | | | | |
| 210 | -23° | -27° | -4° | 3,84 | 14,4 | 55,1 |
| 240 | -10°15' | -14°45' | -4°30' | 2,18 | 13,9 | 30,5 |
| 270 | 5°28' | 1°05' | -4°23' | 1,83 | 14,1 | 25,8 |
| 300 | 21°20' | 17° | -4°20' | 1,89 | 15,5 | 29,8 |
| 330 | 31°50' | 29°30' | -2°20' | 2,91 | 17,9 | 52,0 |
| 360 | 34°30' | 34°30' | 0 | ∞ | 19,3 | ∞ |

6.6.3. Расчет моментов статических сопротивлений

Равнодействующая масс стола и слятка, приложенная в точке M /см. рис.6.5/, определяется по /6.19/:

$$m_{ст} = m_{сл} + m_{ст} \frac{L}{2R_c} = 3 + 50 \frac{7,130}{2 \cdot 5,88} = 33,47.$$

Момент статических сопротивлений на валу электродвигателя находят по следующим расчетным формулам, полученным после подстановки соответствующих исходных данных в уравнения, выведенные в подразд.6.3: при подъеме стола ($0 < \alpha < 180^\circ$)

$$M_c = \frac{88,29 \cdot 10^3}{i_{\omega}} - \frac{3924 \sin(97^\circ - \beta)}{i_{\omega 2}} + \frac{137,34}{i_{\omega 2}}; \quad /6.50/$$

при опускании стола ($180 < \alpha < 360^\circ$)

$$M_c = \frac{3924 \sin(97^\circ - \beta)}{i_{\omega 2}} - \frac{88,29 \cdot 10^3}{i_{\omega}} + \frac{137,34}{i_{\omega 2}}. \quad /6.51/$$

Результаты расчета $M_c = f(\alpha)$ /см. рис.6.9/ приведены в табл.6.2.

Таблица 6.2

Статический момент на валу электродвигателя в зависимости от угла поворота кривошипа

| Подъем стола | | Опускание стола | |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| α, \dots° | $M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$ | α, \dots° | $M_c, \text{Н}\cdot\text{м}$ |
| 0 | 0 | 180 | 0 |
| 30 | 1000,6 | 210 | 716,1 |
| 60 | 1589,2 | 240 | 1520,6 |
| 90 | 1716,8 | 270 | 2060,1 |
| 120 | 1383,2 | 300 | 1814,9 |
| 150 | 745,6 | 330 | 1128,2 |
| 180 | 0 | 360 | 0 |

6.6.4. Расчет момента инерции на валу электродвигателя

Зависимость значения приведенного к валу электродвигателя момента инерции от угла поворота кривошипа найдена по формулам, указанным в подразд.6.4. После подстановки соответствующих исходных данных

выполнения упрощающих вычислений получают следующие расчетные формулы для определения $J = f(\alpha)$:

$$J = 7,75 + \frac{20}{i_{\omega 2}} + \frac{1875}{i_{\omega}} [\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2]. \quad /6.52/$$

В табл.6.3 приведены результаты расчета J по /6.52/; на рис.6.9 изображена кривая $J = f(\alpha)$.

Таблица 6.3

Момент инерции на валу электродвигателя в зависимости от угла поворота кривошипа

| α, \dots° | Подъем стола | | Опускание стола | |
|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|
| | $J, \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ | α, \dots° | $J, \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$ | α, \dots° |
| 0 | 7,75 | 180 | 7,75 | |
| 30 | 10,6 | 210 | 9,73 | |
| 60 | 14,8 | 240 | 13,95 | |
| 90 | 16,4 | 270 | 16,6 | |
| 120 | 13,95 | 300 | 15,5 | |
| 150 | 10,35 | 330 | 10,8 | |
| 180 | 7,75 | 360 | 7,75 | |

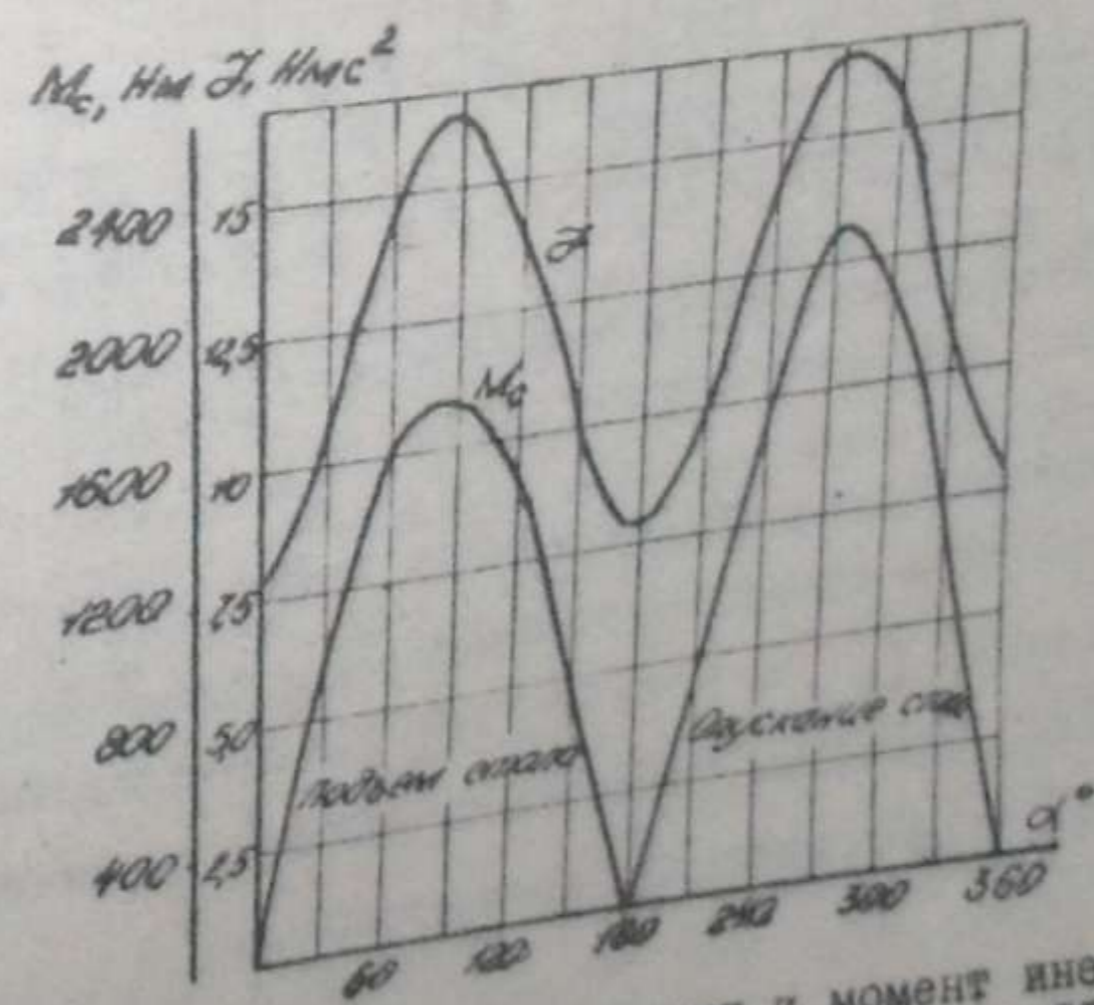


Рис.6.9. Момент статической нагрузки и момент инерции на валу электродвигателя подъемно-качающегося стола

Время пуска и торможения

| Режим работы | α, \dots° | $d\alpha, \dots^\circ$ | $\omega_1, 1/c$ | $\omega_2, 1/c$ | $\Delta t, c$ | t, c |
|-----------------|-----------------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------|
| Подъем стола | | | | | | |
| Разгон | 0 | 15 | 0 | 35,1 | 0,3 | 0,3 |
| | 15 | 15 | 35,1 | 40,3 | 0,17 | 0,47 |
| | 30 | 30 | 40,3 | 41,9 | 0,31 | 0,78 |
| | 60 | 30 | 41,9 | 42,9 | 0,3 | 1,08 |
| | 90 | 30 | 42,9 | 44,5 | 0,29 | 1,37 |
| 120 | 15 | 44,5 | 47,1 | 0,14 | 1,51 | |
| 135 | | | | | | |
| Торможение | 150 | 15 | 41,9 | 47,1 | 0,13 | 1,64 |
| | 165 | 15 | 31,4 | 41,9 | 0,17 | 1,81 |
| | 180 | 15 | 0 | 31,4 | 0,4 | 2,21 |
| Опускание стола | | | | | | |
| Разгон | 180 | 15 | 0 | 33,0 | 0,38 | 0,38 |
| | 195 | 15 | 33,0 | 35,6 | 0,18 | 0,56 |
| | 210 | 30 | 36,6 | 40,0 | 0,33 | 0,89 |
| | 240 | 30 | 40,0 | 40,8 | 0,31 | 1,2 |
| | 270 | 30 | 40,8 | 41,9 | 0,31 | 1,51 |
| | 300 | 30 | 41,9 | 47,1 | 0,21 | 1,72 |
| 322,5 | 22,5 | | | | | |
| Торможение | 330 | 7,5 | 45,0 | 47,1 | 0,07 | 1,79 |
| | 345 | 15 | 36,6 | 45,0 | 0,16 | 1,95 |
| | 360 | 15 | 0 | 36,6 | 0,35 | 2,3 |

В рассматриваемом примере электродвигатель не разгоняется до установившейся скорости, а работает только в пусковых и тормозных режимах /см. рис.6.10, 6.11/. Поэтому нет необходимости в построении нагрузочной диаграммы $M=f(t)$. Для проверки мощности электродвигателя по условиям нагрева необходимо определить эквивалентный момент по известным значениям пускового и тормозного моментов и найденным значением времени пуска и торможения.

$$\epsilon = \frac{t_{\text{вкл}}}{t_u} = \frac{t_{\text{п.п}} + t_{\text{п.о}} + t_{\text{т.п}} + t_{\text{т.о}}}{t_u} = \frac{1,51 + 1,72 + 0,7 + 0,58}{20} = 0,225$$

6.6.5. Расчет тахограммы работы электропривода и проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Зависимости $\omega=f(\alpha)$ и $d=f(t)$, необходимые для определения времени пуска и торможения электродвигателя, рассчитывают по /6.40/ и /6.41/ для малых величин углов поворота кривошипа.

В табл.6.4 приведены результаты расчета, а на рис.6.10 изображены кривые $\omega=f(\alpha)$ и $d=f(t)$ для подъема и опускания стола. Расчет выполнен для условий ступенчатого пуска электродвигателя при максимальном пусковом моменте $M_{\text{п max}} = 1,4 M_H$ и моменте переключения $M_{\text{п min}} = 0,5 M_H$. Торможение электродвигателя - динамическое со средним тормозным моментом $M_{\text{т.д}} = 0,5 M_H$.

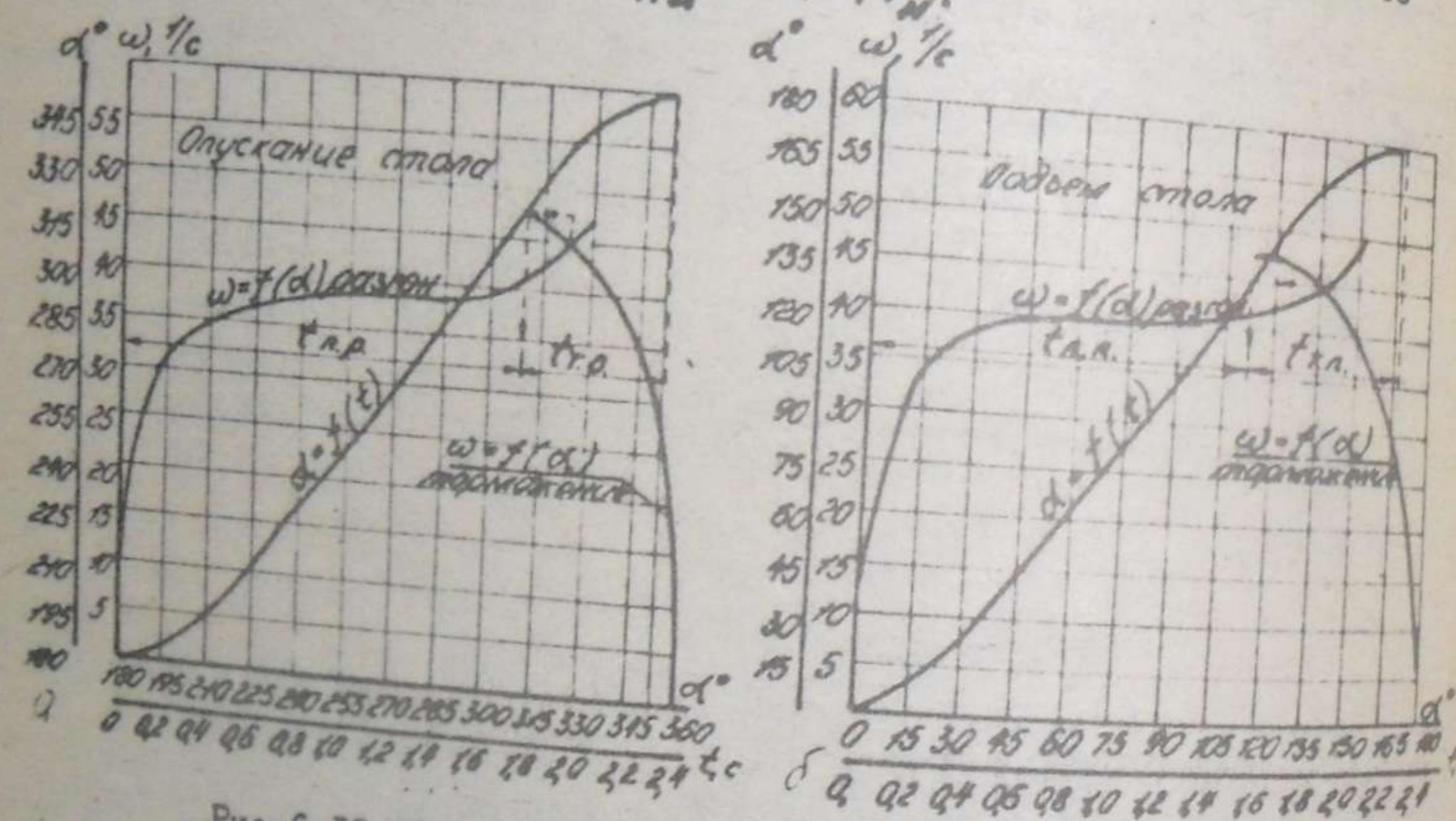


Рис. 6.10. Зависимости $\omega=f(\alpha)$ и $d=f(t)$ при: а - подъеме; б - опускании стола

Из табл.6.4 следует, что суммарное время разгона при подъеме стола $t_{\text{п.п}} = 1,51$ с, а время торможения $t_{\text{т.п}} = 0,7$ с. Соответственно для опускания стола $t_{\text{п.о}} = 1,72$ с и $t_{\text{т.о}} = 0,58$ с. Таким образом, время подъема или опускания стола не превышает продолжительности, установленной по технологическим соображениям.

При указанных пусковых условиях эквивалентный момент электродвигателя за период разгона будет

$$M_{эл} = \sqrt{\frac{M_{пmax}^2 + M_{пmax} M_{пmin} + M_{пmin}^2}{3}} = M_H \sqrt{\frac{1,4^2 + 1,4 \cdot 0,5 + 0,5^2}{3}} \approx 1,0 M_H$$

Эквивалентный момент электродвигателя за один рабочий цикл /подъем и опускание стола/ определяется так:

$$M = \sqrt{\frac{M_{эл}^2 (t_{ра} + t_{то}) + M_{т.д}^2 (t_{ра} + t_{то})}{\frac{1+\beta}{2} (t_{ра} + t_{то} + t_{ра} + t_{то})}} = M_H \sqrt{\frac{1^2 (1,51 + 1,72) + 0,5^2 (0,7 + 0,58)}{0,75 (1,51 + 1,72 + 0,7 + 0,58)}} = 1,02 M_H$$

При продолжительности включения $\epsilon = 0,225$ выбранный электродвигатель допускает

$$M_{\epsilon} = M_{ен} \sqrt{\frac{\epsilon_H}{\epsilon}} = M_H \sqrt{\frac{0,225}{0,225}} = 1,05 M_H$$

Загрузка электродвигателя по моменту составляет

$$\frac{M_{\epsilon}}{M_{\epsilon}} = \frac{1,02}{1,05} = 0,97$$

7. НОЖНИЦЫ

7.1. Классификация и кинематические схемы

Ножницы применяются для поперечного и продольного резания прокатного металла [6-8]. Для резания горячего металла квадратного и прямоугольного сечений на куски мерной длины, а также для обрезки переднего и заднего концов его после прокатки на блюмингах, слябингах, заготовочных и сортовых станах применяются ножницы с параллельными ножами. Такие

ножницы могут быть двух типов: 1/ с верхним резом /когда резание происходит при движении верхнего ножа/; 2/ с нижним резом /когда резание происходит при движении нижнего ножа/.

Ножницы с верхним резом обычно имеют кривошипно-шатунный передаточный механизм и относительно просты по конструкции. Однако им присущи существенные недостатки: 1/ после резания металла на нижней грани его образуются заусеницы, мешающие движению по рольгангу; 2/ отрезаемая часть металла вместе с верхним ножом опускается ниже уровня рольганга, поэтому ножницы должны иметь подъемно-качающийся стол. Кинематическая схема ножниц с верхним резом изображена на рис.7.1.

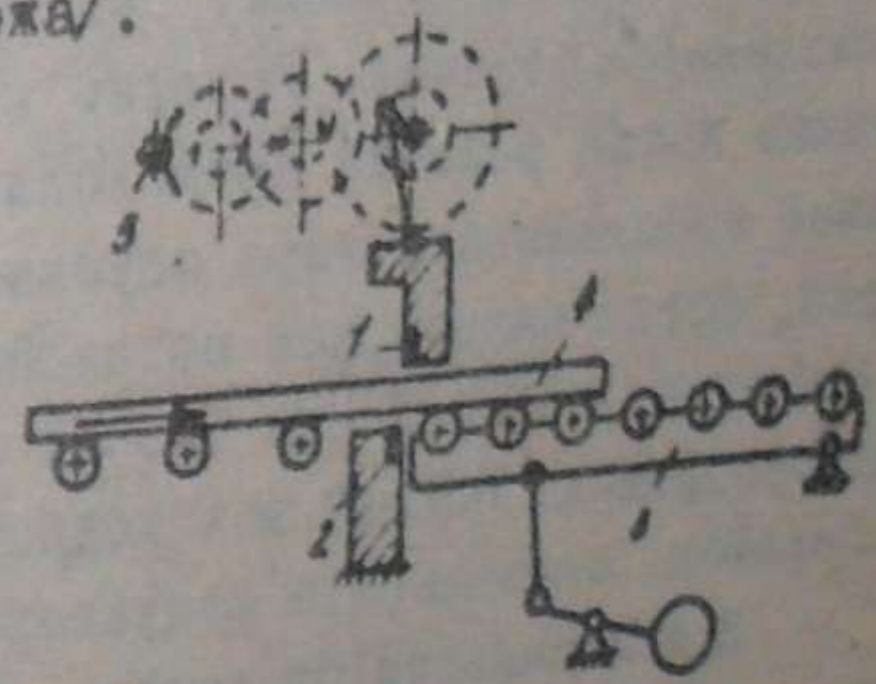


Рис.7.1. Кинематическая схема ножниц с верхним резом: 1 - верхний нож; 2 - нижний нож; 3 - опускающийся стол; 4 - разрезаемый металл; 5 - шестерня на валу электродвигателя

Ножницы с нижним резом не имеют таких недостатков, но они сложнее по конструкции. Наиболее совершенны ножницы с плавающим эксцентриковым валом /рис.7.2/. Двигатели ножниц редуктор и универсальный шпindel приводят в движение плавающий эксцентриковый вал, который может вращаться как вокруг оси, проходящей через подшипники в тягах нижнего ножа /если он неподвижен/, так и вокруг оси, проходящей через подшипники в суппорте верхнего ножа при условии его неподвижности.

В начале движения суппорт нижнего ножа под действием своего веса удерживается в исходном положении. Суппорт верхнего ножа уравновешен, поэтому верхний нож и прижим приходят в движение и опускается.

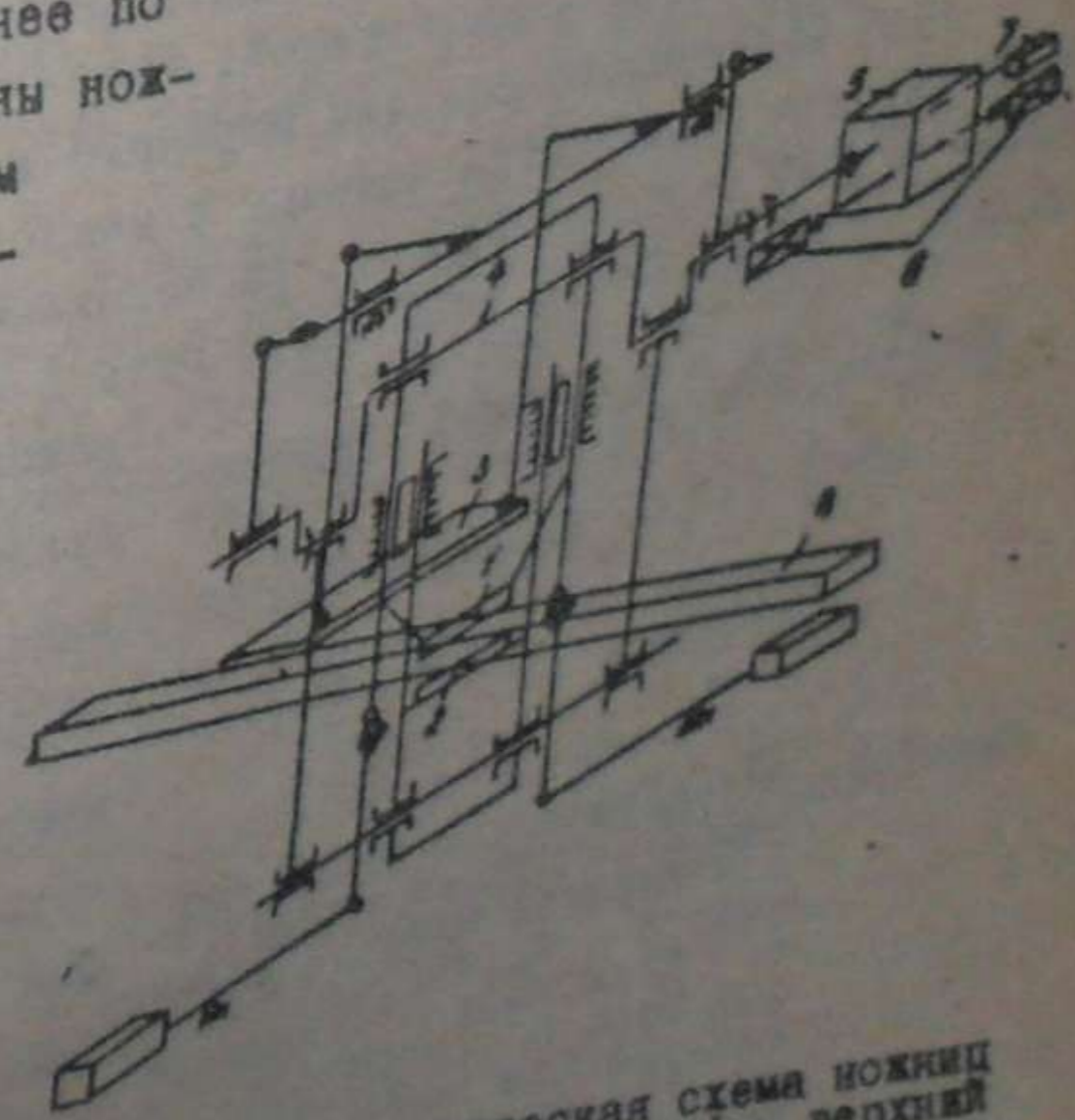


Рис.7.2. Кинематическая схема ножниц с нижним резом: 1 - верхний нож; 2 - нижний нож; 3 - плавающий эксцентриковый вал; 4 - редуктор; 5 - электродвигатель; 6 - путе-вой выключатель; 7 - разрезаемый металл

После соприкосновения с разрезаемым металлом верхний нож останавливается, так как находящийся под ним металл лежит на неподвижном рольганге. Затем начинает подниматься нижний нож вместе с прижимом, и выполняется резание. Возврат нижнего и верхнего ножей в исходное положение после резания происходит в обратном порядке. Сначала под действием собственного веса опускаются суппорт нижнего ножа и прижим. Затем, когда нижний нож остановится в исходном положении, начинает подниматься верхний нож вместе с прижимом. Команда на остановку электропривода ножниц в исходном положении подается путевым командо-аппаратом, связанным с редуктором ножниц.

В зависимости от толщины разрезаемого металла резание может происходить при работе ножниц по круговому циклу /когда эксцентриковый вал совершает полный оборот/ или по качательному циклу /когда за цикл работы ножниц эксцентриковый вал совершает менее одного оборота/. В последнем случае после каждого цикла работы ножниц направление вращения электродвигателей изменяется.

Привод ножниц с параллельными ножами обычно осуществляется от электродвигателей постоянного тока, работающих по системе "управляемый преобразователь - двигатель".

Для поперечного резания горячего и холодного листового и полосового металла применяются ножницы с наклонным ножом. Иногда ими режут также мелкий сортовой прокат, расположенный по несколько штук параллельно. Ножницы этого типа могут быть с верхним или с нижним подвижным

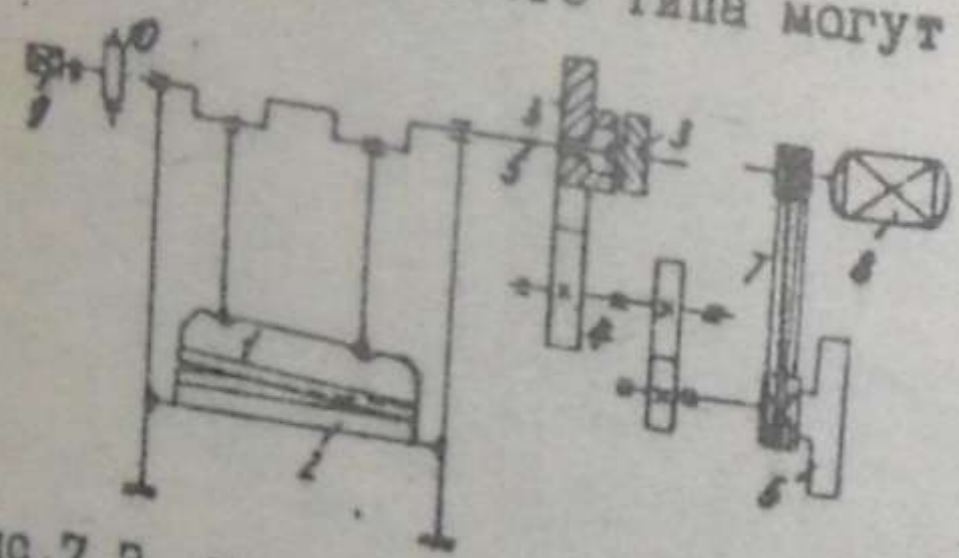


Рис. 7.3. Кинематическая схема ножниц с наклонным ножом: 1 - верхний нож; 2 - нижний нож; 3 - муфта сцепления; 4 - редуктор; 5 - коленчатый вал; 6 - маховик; 7 - электродная передача; 8 - электродвигатель; 9 - путевой выключатель; 10 - тормоз. Электродвигатель ножниц работает непрерывно. Механизм включается и выключается с помощью муфты сцепления.

Для продольного резания прокатного металла на полосы заданной ширины и для обрезки кромок применяются дисковые ножницы. В зависимости от того, на какое количество полос требуется разрезать металл, ножницы могут иметь две или более пар дисковых ножей. На рис. 7.4 изображена кинематическая схема ножниц с двумя парами ножей, предназначенных для обрезки кромок.

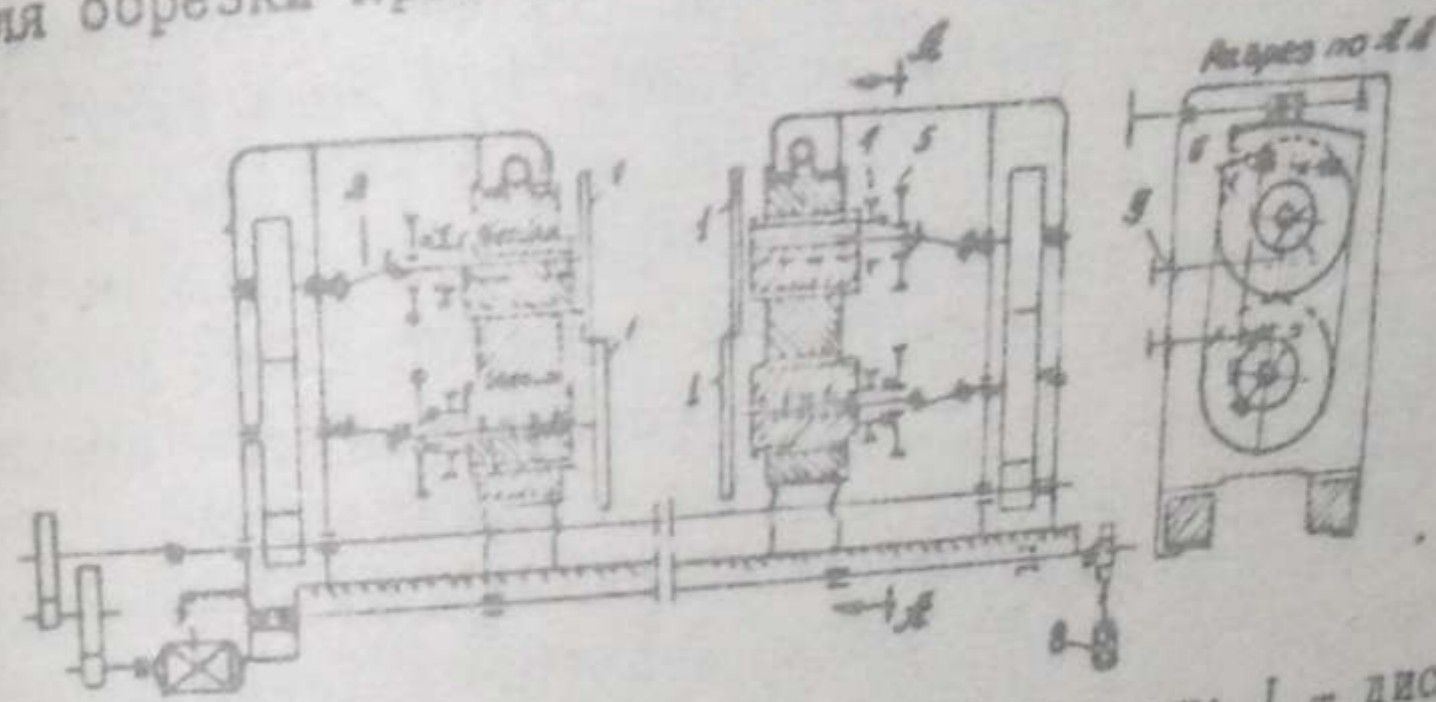


Рис. 7.4. Кинематическая схема дисковых ножниц: 1 - дисковые ножи; 2 - универсальные шпиндели; 3 - эксцентриковые втулки; 4 - механизм изменения расстояния между осями ножей; 5 - механизм регулировки бокового зазора между ножами; 6 - механизм смещения осей верхних ножей; 7 - главный электродвигатель ножниц; 8 - электродвигатель перемещения ножей по ширине полосы

Резание металла на дисковых ножницах происходит на ходу. Скорость дисковых ножей устанавливается в зависимости от толщины разрезаемого металла и может изменяться в широких пределах. Поэтому для привода дисковых ножниц используются электродвигатели постоянного тока.

Поперечное резание прокатанного металла на ходу производится летучими ножницами различных типов /барабанными, кривошипными и др./

Для резания на ходу тонкого полосового и мелкого сортового проката используются барабанные летучие ножницы /рис. 7.5/, которые работают со скоростью до 25 м/с. Существенным недостатком барабанных ножниц является то, что режущие кромки ножей при резании не остаются параллельными, что отрицательно сказывается на качестве поверхности металла в месте разреза.

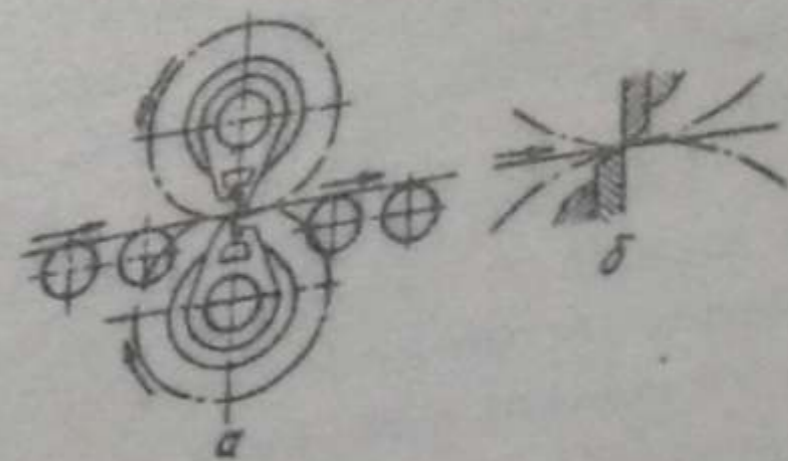


Рис. 7.5. Кинематическая схема барабанных летучих ножниц (а) и резания (б)

В связи с этим при резании толстых полос применяются летучие ножницы другого типа с поступательно движущимися лезвиями /например, кривошипные летучие ножницы/, которые сложнее барабанных и менее быстрыходны /рис.7.6/.

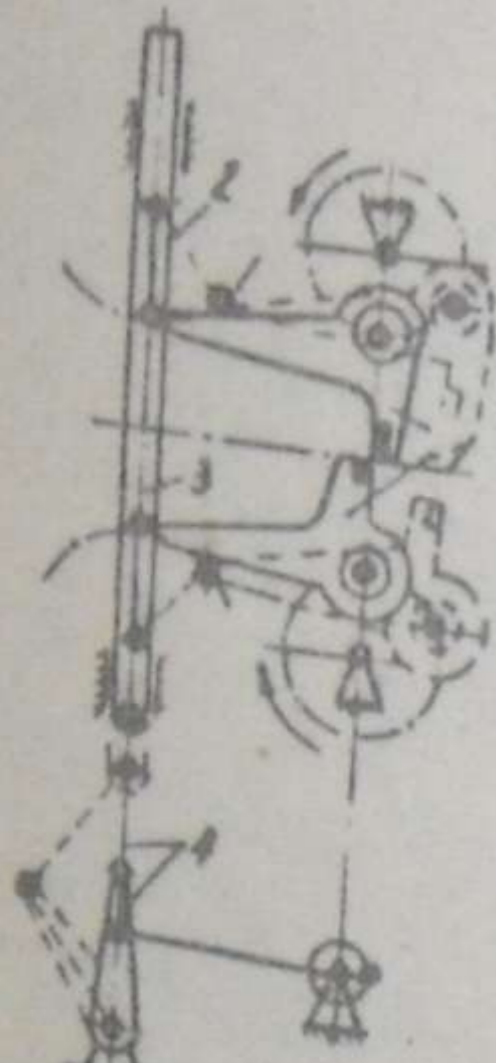


Рис.7.6. Кинематическая схема кривошипных летучих ножниц: 1 - суппорты ножей; 2 - свободно качающиеся тяги; 3 - опускающаяся рама; 4 - лопаточный механизм пропускера

Для обрезки переднего конца заданной длины летучие ножницы обычно используются в режиме запусков. При этом импульс на включение ножей подается с таким расчетом, чтобы к моменту встречи ножей полоса успела пройти путь, равный заданной длине переднего конца.

Для обрезки заданной длины летучие ножницы обычно используются в режиме запусков. При этом импульс на включение ножей подается с таким расчетом, чтобы к моменту встречи ножей полоса успела пройти путь, равный заданной длине переднего конца.

При резании на куски заданной длины летучие ножницы работают в режиме непрерывного вращения, а средняя скорость ножей выбирается такой, чтобы за время одного оборота /или нескольких оборотов при пропуске резцов/ полоса прошла путь, равный заданной длине отрезаемых кусков.

Для устранения напряжений в металле при резании, вызванных разностью скоростей и полос, некоторые ножницы снабжаются специальными устройствами, выравнивающими скорости ножей и полосы в момент резания. Эти устройства изменяют скорость ножей во время движения таким образом, чтобы к моменту резания она равнялась скорости разрезаемой полосы.

Поскольку при резании на летучих ножницах длина отрезаемых кусков зависит от скорости полосы, необходима синхронизация ножей с подающим устройством. Такая синхронизация должна быть обеспечена схемой управления ножницами.

Привод летучих ножниц обычно осуществляется от электродвигателя постоянного тока, работающего по системе "управляемый преобразователь - двигатель".

7.2. Расчет моментов статических сопротивлений для ножниц с параллельными ножами

Усилие резания для ножниц с параллельными ножами, работающих с прижимом, Н: /7.1/

$$P = \tau F,$$

где τ - удельное сопротивление резанию, отнесенное ко всему поперечному сечению и зависящее от относительной глубины надреза, Н/мм²; F - площадь поперечного сечения разрезаемого металла, мм².

Аналогично определяется усилие резания и для ножниц, работающих без прижима, но в этом случае вместо площади поперечного сечения необходимо использовать площадь действительного /косого/ среза.

Удельное сопротивление резанию должно быть определено по экспериментальным кривым, полученным на аналогичных ножницах и выражающим удельное сопротивление в функции относительной глубины надреза $\tau = f(\epsilon)$. В качестве примеров на рис.7.7 показаны кривые зависимости τ от ϵ для малоуглеродистой стали при различных температурах, а на рис.7.8 - кривые для различных металлов при резании их в холодном состоянии.

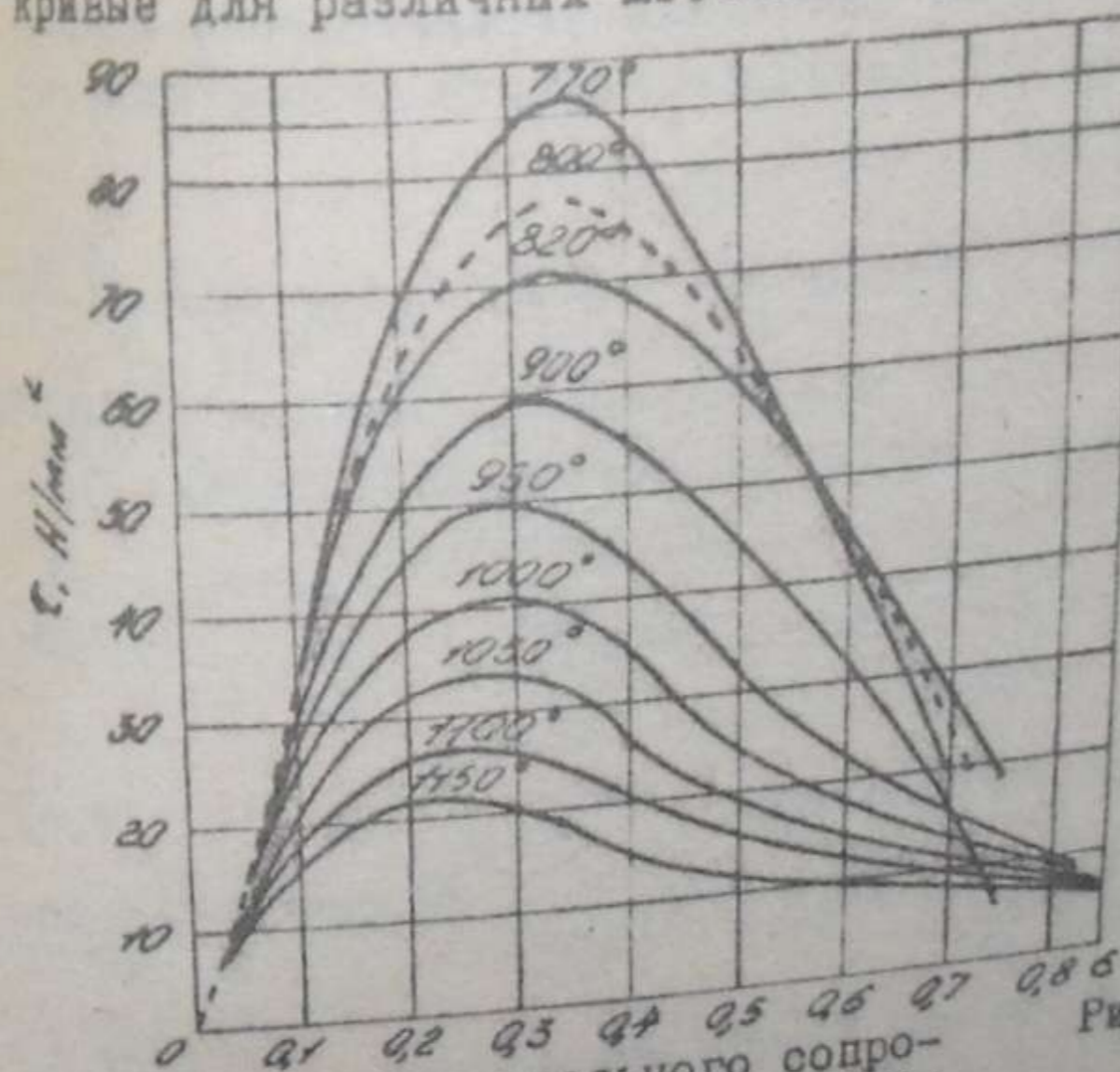


Рис.7.7. Кривые удельного сопротивления резанию нагретой малоуглеродистой стали, содержащей 0,13...0,2% углерода при различных температурах /для ножей алюминия/

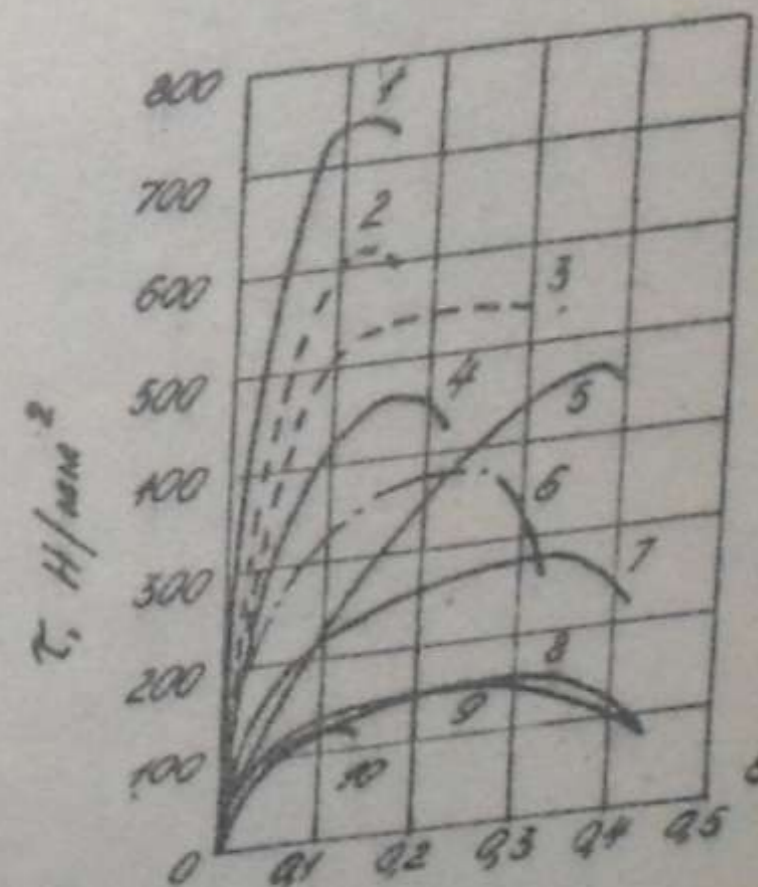


Рис.7.8. Кривые удельного сопротивления резанию различных металлов в холодном состоянии: 1 - сталь 3-16; 2 - пружинная сталь; 3 - сталь ШХ-10; 4 - канатная сталь; 5 - сталь 3А-1; 6 - сталь 20; 7 - сталь 10; 8 - медь; 9 - цинк; 10 - дюралюминий Д-16

Если необходимо получить кривые $\tau = f(\epsilon)$ при температурах, отличающихся от указанных на экспериментальных кривых, следует прибегнуть к интерполированию. На рис. 7.7 пунктиром показана такая кривая, полученная интерполированием.

Поскольку удельное сопротивление резанию задано в функции относительной глубины надреза, то усилие резания получается также выражено от угла поворота вала кривошипа или плавающего эксцентрикового вала. Для этого необходимо установить связь между углом поворота вала и относительной глубиной надреза. Кинематические элементы для выявления таких связей схематически показаны на рис. 7.9.

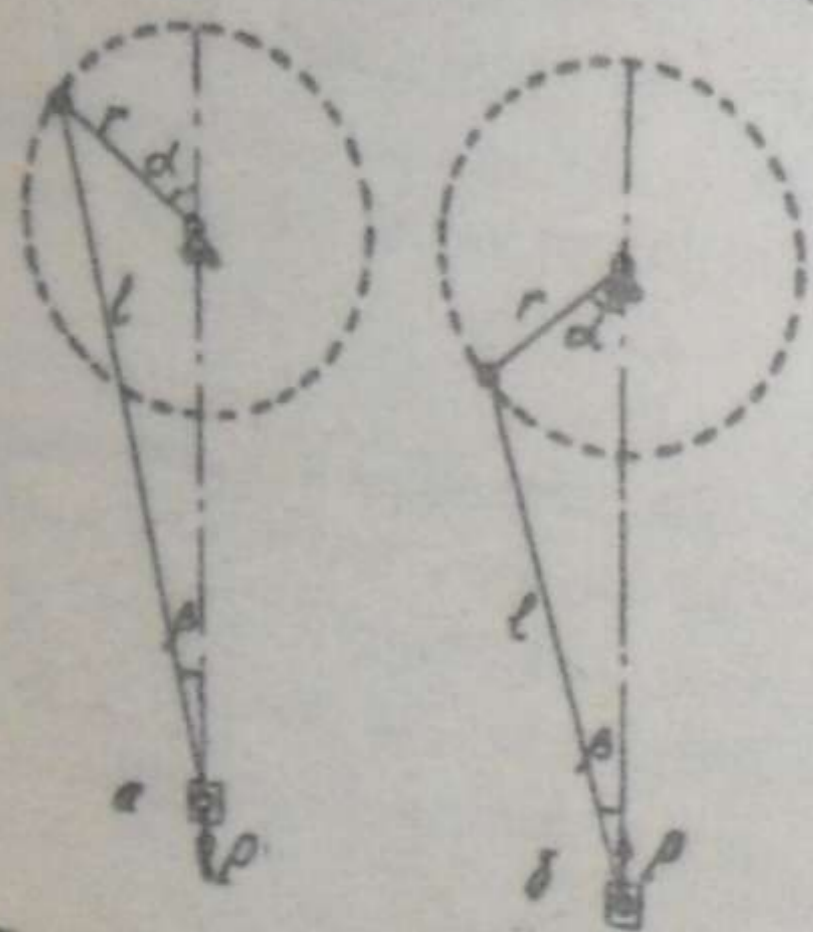


Рис. 7.9. Кинематические элементы связей для ножиц с параллельными ножами: а - с верхним резом; б - с нижним резом

Перемещения ножей для рассматриваемых схем составляют:

а/ для ножиц с кривошипно-шатунным механизмом и верхним резом /см. рис. 7.1/

$$x = r(1 - \cos \alpha) - l(1 - \cos \beta); \quad /7.2/$$

б/ для ножиц с плавающим эксцентриковым валом, расположенным сверху, и нижним резом /см. рис. 7.2/

$$x = r(1 - \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta). \quad /7.3/$$

Так как расстояние между ножами

$$h = 2r - x - h_n, \quad /7.4/$$

где h_n - перекрытие ножей, то с помощью /7.2/ и /7.3/ для определения расстояния между ножами получим:

$$а/ для ножиц с верхним резом \quad h = r(1 + \cos \alpha) + l(1 - \cos \beta) - h_n; \quad /7.5/$$

$$б/ для ножиц с нижним резом \quad h = r(1 + \cos \alpha) - l(1 - \cos \beta) - h_n. \quad /7.6/$$

В обоих рассматриваемых случаях

$$l \sin \beta = r \sin \alpha \quad /7.7/$$

и, следовательно,

$$l(1 - \cos \beta) = l \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2 \alpha} \right]. \quad /7.8/$$

Учитывая, что для ножиц $\frac{r}{l} \leq 0.1$, можно приближенно принять

$$1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2 \alpha \approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l}\right)^2 \sin^2 \alpha. \quad /7.9/$$

Тогда

$$l(1 - \cos \beta) \approx r \left(\frac{1}{2} \frac{r}{l} \sin^2 \alpha \right), \quad /7.10/$$

и /7.5/ и /7.6/ примут вид:

а/ для ножиц с верхним резом /см. рис. 7.1/

$$h = r(1 + \cos \alpha + 0.5 \frac{r}{l} \sin^2 \alpha) - h_n; \quad /7.11/$$

б/ для ножиц с нижним резом /см. рис. 7.2/

$$h = r(1 + \cos \alpha - 0.5 \frac{r}{l} \sin^2 \alpha) - h_n. \quad /7.12/$$

В практических расчетах мощности электродвигателя ножиц вместо /7.11/ и /7.12/ обычно пользуются упрощенной формулой

$$h = r(1 + \cos \alpha) - h_n. \quad /7.13/$$

На рис. 7.10 показаны кривые зависимости h от α , построенные по /7.12/ - пунктирная, и по /7.13/ - сплошная кривая. Эти кривые мало различаются, поэтому можно считать, что применение упрощенной формулы /7.13/ для расчета мощности электродвигателей ножиц вполне допустимо. Зона резания бляхса толщиной $h_0 = 300$ мм показана штриховкой.

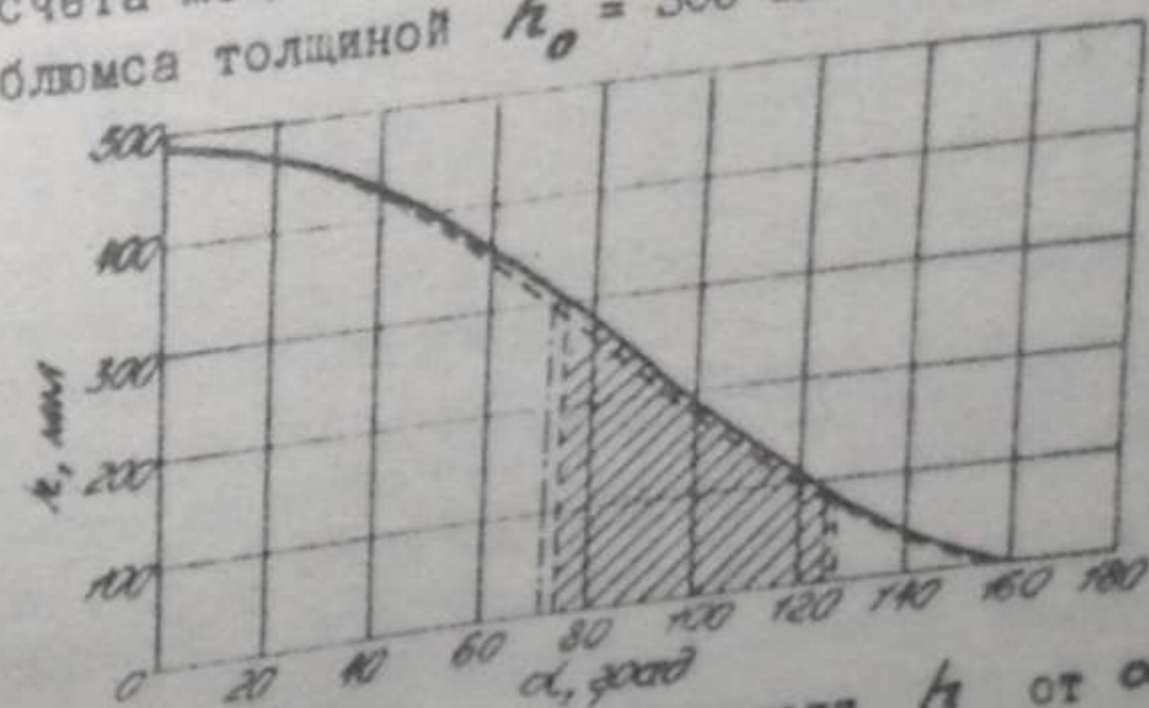


Рис. 7.10. Кривая зависимости h от α . В процессе резания металла толщиной h_0 справедливо равенство

$$h = (1 - \epsilon) h_0. \quad /7.14/$$

Из /7.13/ и /7.14/ для зоны резания могут быть получены формулы

$$\alpha = \arccos \left[\frac{(1-\epsilon)k_0 - k_a - 1}{r} \right]; \quad /7.15/$$

$$\epsilon = 1 - \frac{r(1 + \cos \alpha) - k_a}{k_0}, \quad /7.16/$$

устанавливающие связь между углом поворота вала ножиц и относительной глубиной надреза. Используя эти формулы /задавая значения α или ϵ /, а также кривую зависимости τ от ϵ и /7.1/, можно построить кривую зависимости усилия резания от угла поворота вала ножиц.

Построить кривую зависимости P от α можно иначе. Если уже имеется кривая зависимости h от α /такая кривая показана на рис.7.10 для ножиц блэминга/, то используя ее и /7.14/, можно установить связь между α и ϵ , а затем по кривой $\tau = f(\epsilon)$ и /7.1/ построить кривую P в зависимости от α .

Таким способом построена показанная на рис.7.11 кривая усилия

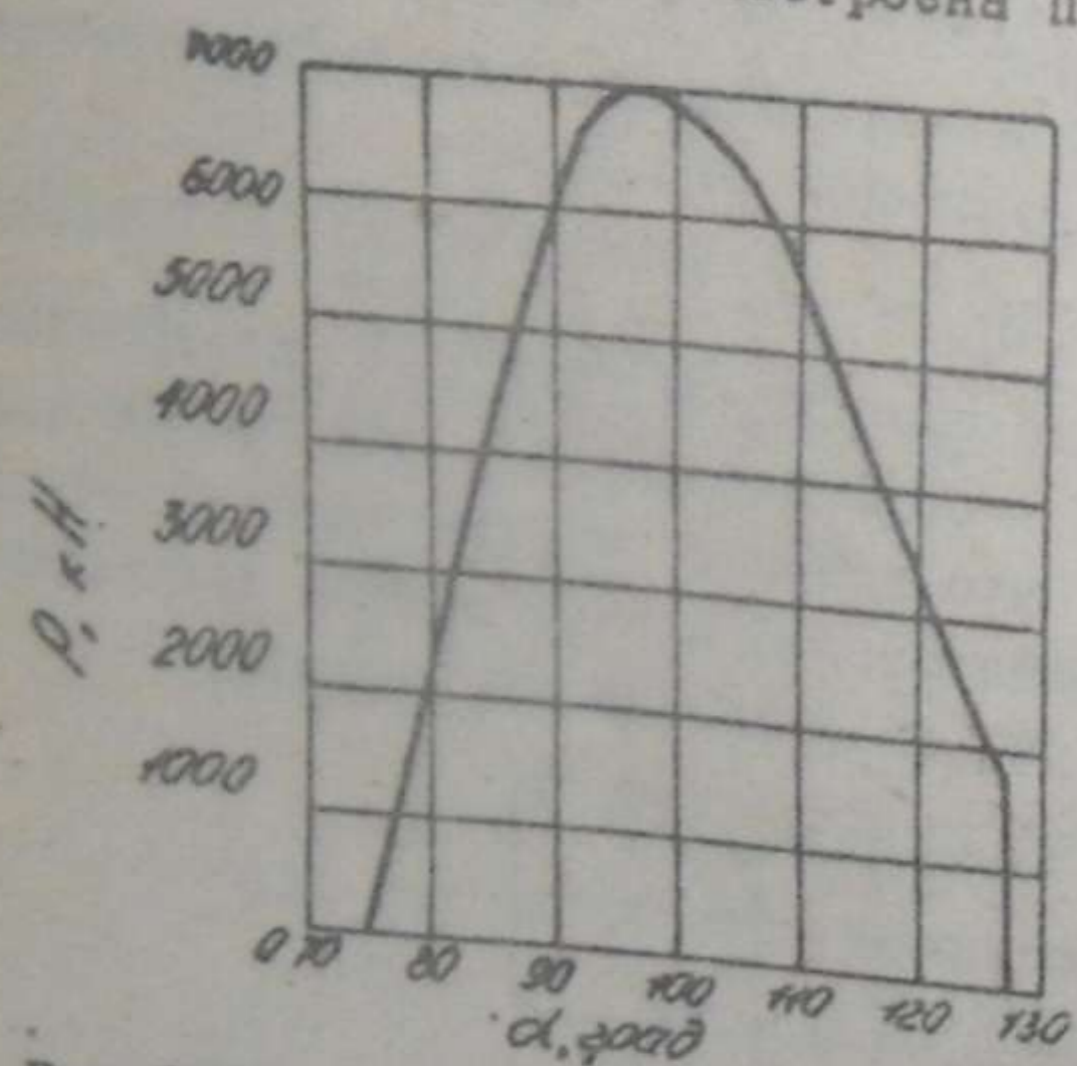


Рис.7.11. Кривая усилия резания в функции угла поворота вала ножиц

резания в функции угла поворота эксцентрикового вала для ножиц блэминга при резе блэмса 300x300 мм.

Для определения момента статического сопротивления на валу электродвигателя ножиц целесообразно воспользоваться энергетическим равенством

$$N_c \omega = \frac{Pv}{\eta}, \quad /7.17/$$

в котором M_c - момент статического сопротивления на валу электродвигателя ножиц, Н·м; ω - угловая скорость вала электродвигателя ножиц, 1/с; P - усилие резания, Н; v - скорость перемещения ножа, м/с; η - КПД передачи /включая потери на трение в самом механизме ножиц/.

Левая часть этого выражения равна мощности на валу электродвигателя, а правая - "мощности резания", деленной на КПД передачи.

Из /7.17/ следует, что

$$M_c = \frac{Pv}{\eta \omega}. \quad /7.18/$$

Переходя к угловой скорости на валу ножиц

$$\omega_0 = \frac{\omega}{i}, \quad /7.19/$$

где i - передаточное число редуктора /7.17/, можно записать так:

$$M_c = \frac{1}{\eta_i} \frac{Pv}{\omega_0}. \quad /7.20/$$

Так как скорость v и угловая скорость ω_0 равны производным по времени соответственно от перемещения ножей x /в метрах/ и угла поворота вала ножиц α /в радианах/, то /7.20/ представим в виде

$$M_c = \frac{P}{\eta_i} \frac{dx}{d\alpha}. \quad /7.21/$$

Согласно рис.7.9 и /7.2/, /7.3/:

а/ для ножиц с верхним резом

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha - l \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha}; \quad /7.22/$$

б/ для ножиц с нижним резом

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha + l \sin \beta \frac{d\beta}{d\alpha}. \quad /7.23/$$

На основании /7.7/ эти равенства могут быть заменены такими:

$$\text{а/ для ножиц с верхним резом} \quad \frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha \left\{ 1 - \frac{r \cos \alpha}{l \cos \beta} \left[\frac{d(l \sin \beta)}{d(r \sin \alpha)} \right] \right\}; \quad /7.24/$$

б/ для ножиц с нижним резом

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha \left\{ 1 + \frac{r \cos \alpha}{l \cos \beta} \left[\frac{d(l \sin \beta)}{d(r \sin \alpha)} \right] \right\}. \quad /7.25/$$

Учитывая, что величина $\frac{r \cos \alpha}{l \cos \beta}$ не превышает 0,1 /так как $\frac{r}{l} \leq 0,1$ и $\left| \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right| \leq 1$ /, а выражение в квадратных скобках равно единице, в расчетах мощности электропривода ножиц вместо /7.24/ и /7.25/ можно приближенно принять

$$\frac{dx}{d\alpha} = r \sin \alpha. \quad /7.26/$$

При этом /7.21/ принимает вид

$$M_c = \frac{Pv \sin \alpha}{\eta_i}. \quad /7.27/$$

Полученное соотношение обычно используется во всех практических расчетах мощности электродвигателей ножниц и других механизмов с кривошипно-шатунной передачей. Значение КПД передачи для ножниц с параллельными ножами составляет $\eta = 0,7 \dots 0,8$.

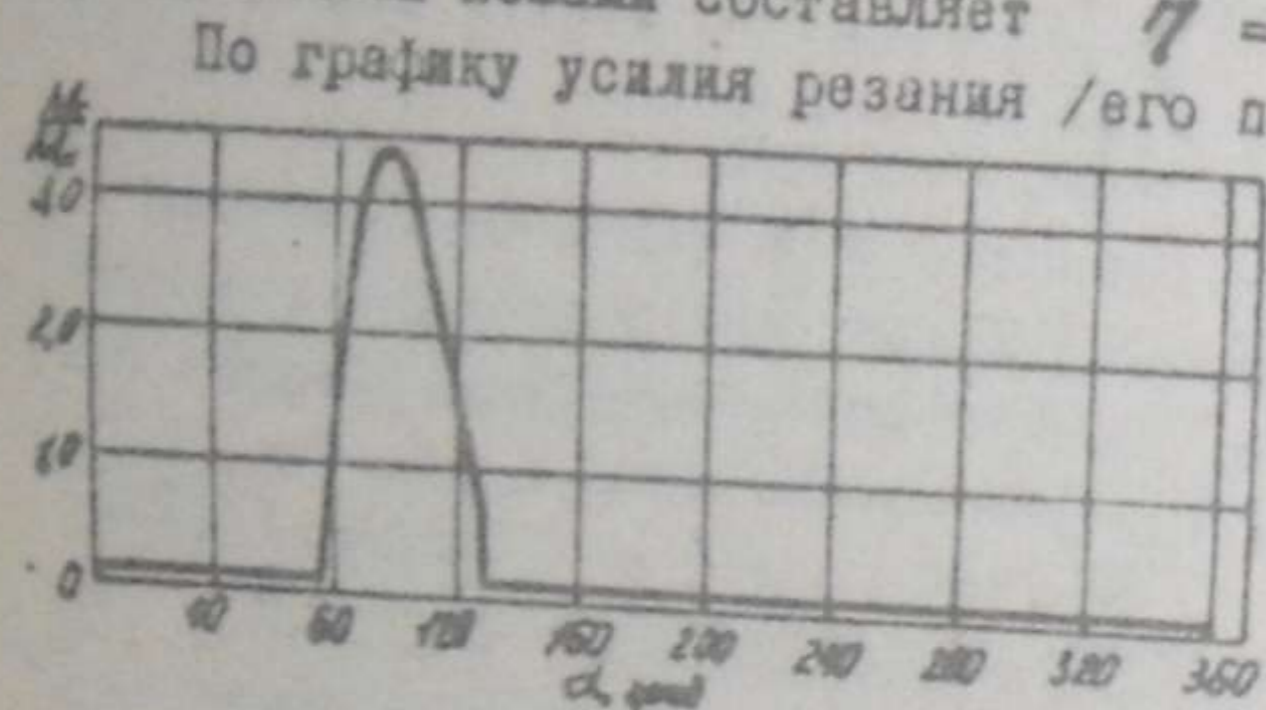


Рис. 7.12. График $M_c = f(\alpha)$ для ножниц с параллельными ножами

По графику усилия резания /его построение было объяснено/ и /7.27/ строится график момента статического сопротивления на валу электродвигателя в функции угла поворота вала ножниц /рис. 7.12/. Момент холостого хода электропривода ножниц может быть определен на основании экспериментальных данных для существующих аналогичных ножниц. При отсутствии таких данных ориентировочно можно принять, что момент холостого хода $M_x : X$ составляет $\sim 7 \dots 10\%$ суммарного номинального момента предварительно выбранных электродвигателей ножниц.

7.3. Выбор расчетного сортамента для ножниц с параллельными ножами

Для сокращения громоздкой вычислительной работы при расчете мощности электропривода ножниц целесообразно из всего сортамента разрезаемого металла выбрать такой, при котором электродвигатели ножниц будут больше всего нагреты.

Следует ожидать, что наибольший нагрев электродвигателей будет при таком сортаменте, при котором требуется наибольшая средняя мощность электропривода ножниц. Поэтому предварительно, до расчета мощности электродвигателей желательно определить среднюю мощность для всего сортамента ножниц, а затем в качестве расчетного принять тот, для которого эта средняя мощность окажется наибольшей.

Рассмотрим один из способов определения средней мощности.

1. Работа пуска и торможения ножниц определяется по уравнению кинетической энергии, Н·м:

$$A_{п.т} = 2J \frac{\omega_x^2}{2} \quad /7.28/$$

Здесь J - момент инерции системы, приведенный к валу электродвигателя ножниц, Н·м·с²; ω_x - угловая скорость электродвигателя при холостом ходе, 1/с /величина заданная/.

Момент системы ориентировочно может быть принят равным

$$J = 1,5 J_m \quad /7.29/$$

где J_m - момент инерции механизма ножниц, приведенный к валу электродвигателя.

2. Работа резания определяется по выражению, Н·м:

$$A_{рез} = \frac{F k_0 a}{\eta} \quad /7.30/$$

в которое входит удельная работа резания $\epsilon_{отр}$

$$a = \int_0^{\epsilon_{отр}} \tau d\epsilon \quad /7.31/$$

Величины F , k_0 и η - те же, что и в подразд. 7.2, но при этом k_0 должно быть выражено в метрах.

Удельная работа резания определяется по площади кривой /см. рис. 7.7, 7.8/ в пределах от начала резания до отрыва отрезаемого металла.

3. Работа холостого хода относительно невелика и может быть ориентировочно принята /с избытком/ как

$$A_x = 2\pi i M_x \quad /7.32/$$

При заданном числе резов в минуту Z цикл работы ножниц, с:

$$t_ч = \frac{60}{Z} \quad /7.33/$$

Средняя мощность, кВт:

$$P_{cp} = \frac{A_{п.т} + A_{рез} + A_x}{t_ч} \cdot 10^{-3} \quad /7.34/$$

7.4. Предварительный выбор электродвигателей для ножниц с параллельными ножами

Для предварительного выбора электродвигателей, пригодность которых затем проверяется уточненным расчетом, пользуются приближенными соотношениями, позволяющими выявить основную зависимость между номинальной и средней мощностями электродвигателей ножниц.

Можно приближенно принять, что схемой управления ножниц /регулятором тока/ обеспечивается постоянство момента электродвигателей при пуске, резе и торможении. Величина этого момента составляет λM_n , где λ - кратность рабочего момента по сравнению с номинальным моменту электродвигателя.

Работа электродвигателя ножниц при пуске и торможении

$$\lambda M_H \frac{\omega_x}{2} t_{п.т} = J \omega_x^2 \quad /7.35/$$

откуда следует, что время пуска и торможения, с:

$$t_{п.т} = \frac{2J \omega_x}{\lambda M_H} \quad /7.36/$$

При этом принято, что средняя скорость при пуске и торможении составляет половину скорости холостого хода.

Согласно принятому допущению /имеющему смысл приближенной математической эквивалентности/ при резании электродвигателя совершают работу

$$\lambda M_H \frac{\omega_x + \omega_{к.р}}{2} t_{рез} = \int_{\alpha_0}^{\alpha_{к.р}} M_c d\alpha - J \frac{\omega_x^2 - \omega_{к.р}^2}{2} \quad /7.37/$$

где $\omega_{к.р}$ - угловая скорость электродвигателя в конце резания; $\alpha_0, \alpha_{к.р}$ - углы поворота вала ножниц, соответствующие началу и концу резания; α - текущее значение угла поворота вала ножниц.

На основании /7.37/ время резания

$$t_{рез} = \frac{2}{\omega_x + \omega_{к.р}} \left(\int_{\alpha_0}^{\alpha_{к.р}} M_c d\alpha - J \frac{\omega_x^2 - \omega_{к.р}^2}{2} \right) \lambda M_H \quad /7.38/$$

При восстановлении скорости после резания средний момент электродвигателей может быть приближенно принят равным λM_H .

Работа электродвигателя при восстановлении скорости составит

$$\lambda M_H \frac{\omega_x + \omega_{к.р}}{2} t_{вст} = J \frac{\omega_x^2 - \omega_{к.р}^2}{2} \quad /7.39/$$

откуда время восстановления скорости

$$t_{вст} = \frac{J(\omega_x - \omega_{к.р})}{\lambda M_H} \quad /7.40/$$

Так как момент холостого хода составляет обычно менее 10% номинального момента, то при таком ориентировочном расчете средне-квadrатичного и среднего моментов можно пренебречь величинами $M_c^2 t_x$ и $M_c t_x$ по сравнению с другими слагаемыми в суммах $\sum M_c^2 t_x$ и $\sum M_c t_x$. Тогда эквивалентный /приведенный среднеквadrатичный/ и средний моменты будут

$$M_3 \approx \sqrt{\frac{(2J \omega_x + \frac{2}{\omega_x + \omega_{к.р}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_{к.р}} M_c d\alpha) \lambda M_H \left(\frac{\Phi_H}{\Phi}\right)^2}{t_4}} \quad /7.41/$$

$$M_{ср} \approx \frac{2J \omega_x + \frac{2}{\omega_x + \omega_{к.р}} \int_{\alpha_0}^{\alpha_{к.р}} M_c d\alpha}{t_4} \quad /7.42/$$

Здесь $\frac{\Phi_H}{\Phi}$ - степень ослабления потока возбуждения электродвигателя, приближенно равная ω_x / ω_H (ω_x - скорость холостого хода при ослабленном потоке возбуждения электродвигателя). Из /7.41/, /7.42/ и равенства $\frac{\Phi_H}{\Phi} = \frac{\omega_x}{\omega_H}$ следует, что

$$M_3 = M_{ср} \lambda M_H \left(\frac{\omega_x}{\omega_H}\right)^2 \quad /7.43/$$

Для работы электродвигателя с допустимым нагревом необходимо, чтобы $M_H \geq M_3$. Поэтому должно быть

$$M_H^2 \geq M_{ср} \lambda M_H \left(\frac{\omega_x}{\omega_H}\right)^2$$

или после сокращения на M_H

$$M_H \geq M_{ср} \lambda \left(\frac{\omega_x}{\omega_H}\right)^2 \quad /7.44/$$

Полагая

$$\lambda = \lambda_H \frac{\omega_H}{\omega_x}$$

где λ_H - кратность рабочего момента по отношению к номинальному при полном потоке возбуждения электродвигателя, /7.44/ можно представить в виде

$$M_H \geq \lambda_H M_{ср} \frac{\omega_x}{\omega_H} \quad /7.45/$$

Значения λ_H обычно выбирают в пределах 1,3...1,7. Согласно /7.46/

$$M_H \omega_H \geq \lambda_H M_{ср} \omega_x \geq \lambda_H (M \omega)_{ср}$$

Следовательно, номинальная мощность электродвигателя ножниц должна выбираться на основании неравенства

$$P_N > \lambda_N P_{cp} \quad /7.47/$$

При этом величину P_{cp} следует определять по /7.28/, /7.30/, /7.32/ и /7.34/.

Учитывая, что рассмотренный метод расчета носит ориентировочный характер и не может обеспечить большую точность, номинальную мощность электродвигателя ножниц нужно принять с некоторым запасом / $\sim 20\%$ /.

Окончательная формула для предварительного выбора электродвигателей ножниц будет

$$P_N \geq 1,25 \lambda_N P_{cp} \quad /7.48/$$

Для суждения о пригодности предварительно выбранного электродвигателя следует уточнить его загрузку и провести соответствующий расчет.

7.5. Пример расчета мощности электродвигателей ножниц с параллельными ножами

7.5.1. Исходные данные

Требуется выбрать электродвигатели для 1000-тонных ножниц, кинематическая схема которых изображена на рис.7.2.

На этих ножницах будет производиться резание малоуглеродистой стали при температуре 800 °С. Радиус эксцентрика ножниц $M = 250$ мм. Длина тяг нижнего ножа $e = 2800$ мм ($\frac{M}{e} < 0,1$). Перекрытие ножей $k_N = 15$ мм. Передаточное число редуктора $i = 49$. Номинальная скорость электродвигателей $n_N = 500$ об/мин. Момент инерции механизма ножниц, приведенный к валу электродвигателя $J = 425$ Н·м·с². Сортамент разрезаемого металла приведен в табл.7.1.

Сортамент металла, разрезаемого ножницами

Таблица 7.1

| Заготовка | Сечение, мм | Количество резов в минуту |
|-----------|-------------|---------------------------|
| Блюмс | 125 x 125 | 10 |
| | 200 x 200 | 8 |
| | 300 x 300 | 7 |

7.5.2. Выбор расчетного сортамента

Работа пуска и торможения $A_{п.т}$, резания $A_{рез}$, холостого хода A_x , продолжительность цикла резания и средняя мощность P_{cp} для всего заданного сортамента определяются по /7.28/, /7.30/, /7.32/ - /7.34/.

При этом согласно условию /7.29/ принято

$$J = 1,5 J_N = 1,5 \cdot 425 = 637,5 \text{ Н·м·с}^2$$

Момент холостого хода принят $M_x = 1500$ Н·м. Угловая скорость электродвигателя при холостом ходе

$$\omega_x = 1,05 \frac{\pi n_N}{30} = 1,05 \frac{\pi \cdot 500}{30} = 55 \text{ 1/с.}$$

Кривая зависимости $\tau = f(\epsilon)$ для температуры 800 °С, построенная интерполированием по экспериментальным кривым, показана на рис.7.7 пунктиром. По площади полученной кривой [см. формулу /7.31/] определена удельная работа резания, которая составляет $\alpha = 44,7$ Н/мм².

КПД передачи принято $\eta = 0,8$.

Результаты расчета средней мощности для заданного сортамента сведены в табл.7.2. По данным этой таблицы в качестве расчетного сортамента следует принять блюмс 300 x 300 мм, для которого средняя мощность является самой большей и составляет $P_{cp} = 460$ кВт.

7.5.3. Предварительный выбор электродвигателей

Кратность рабочего момента по отношению к номинальному предварительно принята $\lambda = 1,3$. При этом по условию /7.46/ номинальная мощность электродвигателей ножниц должна составлять

$$P_N \geq 1,25 \lambda P_{cp} = 1,2 \cdot 1,3 \cdot 460 \approx 718 \text{ кВт.}$$

Для ножниц можно предварительно принять два электродвигателя типа МП-490-500 с характеристикой: $P_N = 2 \cdot 360 = 720$ кВт, $U_N = 440$ В, $n_N = 500 \dots 800$ об/мин с номинальным током $I_N = 900$ А и номинальным моментом

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N \cdot 30}{\pi n_N} = \frac{720 \cdot 10^3 \cdot 30}{\pi \cdot 500} = 13758 \text{ Н·м.}$$

Момент инерция электродвигателей

$$J_D = 2 \cdot 87,5 = 175 \text{ Н·м·с}^2$$

При выбранном электродвигателе

$$\frac{M_x}{M_N} = \frac{1470}{13758} = 0,107$$

Расчет средней мощности для заданного сортамента

Таблица 7.2

| Сортамент | $F \cdot 10^3, \text{ мм}^2$ | $h_0, \text{ м}$ | $A_{\text{яг}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $A_{\text{яг}} \cdot 10^3, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $A_{\text{яг}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $\Sigma A \cdot 10^3, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $\Sigma A \cdot 10^3, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | $t_4, \text{ с}$ | $P_{\text{ср}}, \text{ кВт}$ |
|-----------|------------------------------|------------------|---|--|---|---|---|------------------|------------------------------|
| Блокс: | | | | | | | | | |
| 125x125 | 15,6 | 0,125 | | 109 | | 2540 | 2540 | 6 | 423 |
| 200x200 | 40 | 0,2 | 1970 10^3 | 447 | | 2878 | 2878 | 7,5 | 384 |
| 300x300 | 90 | 0,3 | | 1510 | | 3941 | 3941 | 8,57 | 460 |

Момент инерции соединительных муфт и других деталей на валах электродвигателей составляет

$$J_{\text{см}} = 2 \cdot 16,9 = 33,8 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$$

Таким образом, уточненный момент инерции будет

$$J = J_M + J_D + J_{\text{см}} = 425 + 175 + 33,8 = 633,8 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$$

что практически не отличается от принятого /предварительного/ значения $J = 637,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$.

7.5.4. Проверочный расчет мощности принятых электродвигателей

Расчет можно выполнить по одному из двух следующих вариантов:

1/ с подробным расчетом и построением графиков механических переходных процессов;

2/ упрощенно - по средним значениям моментов и скоростей.

Далее для сравнения приведены оба варианта расчетов.

1/ Первый вариант /уточненный расчет/

Электромагнитная инерция цепей возбуждения и якорных цепей электрических машин не учитывается. Учитывается только механическая инерция электропривода. Это обычное допущение, часто принимаемое при расчетах мощности.

Так как задано только среднее значение момента инерции механизма ножниц, то момент инерция электропривода их принят постоянным и равным его среднему значению: $J = 633,8 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$.

В расчете условно принято следующее:

а/ регулятор тока не идеален, но при $\frac{M}{M_n} \geq 1,3$ обеспечивает линейную зависимость момента от скорости электродвигателя /рис.7.13/

$$M_* = 1,6 - 0,325 \omega_* ;$$

б/ при $M_* \leq 1,3$ регулятор напряжения идеален, т.е. поддерживает напряжение на шинах якоря точно на заданном уровне. По данным клиентского формуляра завода "Электросила" для вы-

стояния электродвигателя сопротивление якорных цепей в нагретом состоянии $R_a = 1,24 \cdot 0,0162 = 0,02 \text{ Ом}$. Нормальное сопротивление электродвигателя $R_N = \frac{440}{900} = 0,49 \text{ Ом}$.

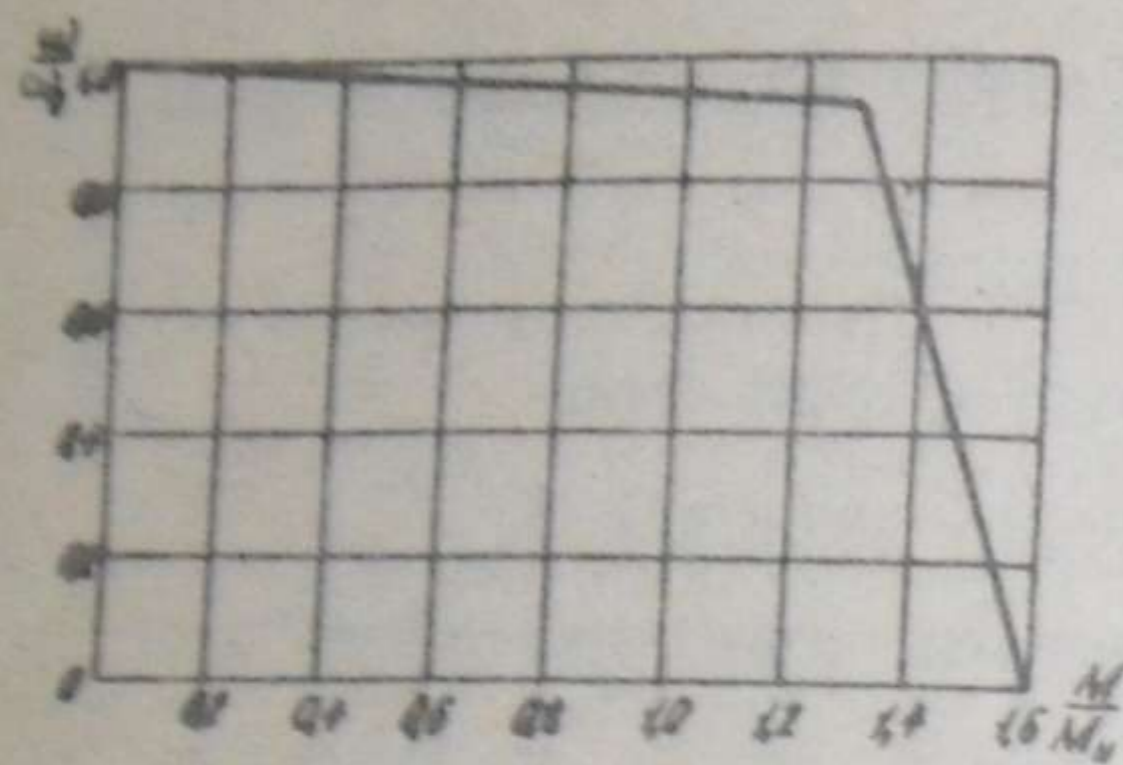


Рис. 7.13. Расчетная характеристика электропривода ножниц

Для получения номинальной ЭДС электродвигателя на шинах якоря требуется напряжение $U_0 = E_n + 2 + 0,027 \cdot 900 = 446$ В. Это напряжение регулятор должен поддерживать постоянным. В этом случае

$$\omega_{*n} = \frac{E_n}{U_0} = \frac{420}{446} = 0,94;$$

$$\omega_0 = \frac{\omega_n}{0,94} = \frac{\pi n_n}{30 \cdot 0,94} = \frac{52,33}{0,94} = 55,7 \text{ 1/с.}$$

Характеристика электродвигателя будет выражена уравнением

$$M_* = \frac{1}{1 - \frac{\omega_n}{\omega_0}} (1 - \omega_*) = 16,65 (1 - \omega_*) \quad /7.50/$$

Расчетные характеристики электропривода ножниц, построенные по /7.49/ и /7.50/, показаны на рис. 7.13.

а) Пуск электродвигателей

Для расчетных характеристик наблюдается связь между моментом на валу и скоростью по линейному закону. При этом

$$dM_* = -0,325 d\omega_* \text{ при } M_* > 1,3;$$

$$dM_* = -16,65 d\omega_* \text{ при } M_* < 1,3. \quad /7.51/$$

Пуск электродвигателей при постоянном моменте холостого хода будет происходить, как известно, по экспоненциальному закону [1]:

$$M_* = M_{*n} (1 - e^{-t/T}) + M_{нач*} e^{-t/T}; \quad /7.52/$$

Если принять, что сопротивление соединительных шин электродвигателя составляет 1,5% от R_n , то общее сопротивление якорной цепи будет $R = 0,02 + 0,015 \times 0,49 = 0,027$ Ом.

С учетом падения напряжения на щетках электродвигателя /примерно 2 В/ номинальная ЭДС машины $E_n = 440 - 2 - 0,02 \cdot 900 = 420$ В.

с постоянными времени:

$$T = \frac{1}{16,65} \frac{J \omega_0}{M_n} = \frac{1}{16,65} \frac{633,8 \cdot 55,7}{13758} = 0,154 \text{ с при } M_* < 1,3;$$

$$T = \frac{1}{0,325} \frac{J \omega_0}{M_n} = \frac{1}{0,325} \frac{633,8 \cdot 55,7}{13758} = 7,9 \text{ с при } M_* > 1,3.$$

После подстановки числовых значений M_{*n} , $M_{нач*}$ и T /7.52/ запишем в виде

$$M_* = 0,107 (1 - e^{-t/7,9}) + 1,6 e^{-t/7,9} \text{ при } M_* \geq 1,3;$$

$$M_* = 0,107 (1 - e^{-t/0,154}) + 1,3 e^{-t/0,154} \text{ при } M_* \leq 1,3. \quad /7.53/$$

Из /7.49/, /7.50/ и /7.53/ следует, что

$$\omega_* = 159 (1 - e^{-t/7,9}) \text{ при } M_* \geq 1,3; \quad /7.54/$$

$$\omega_* = 0,994 - 0,0716 e^{-t/0,154} \text{ при } M_* \leq 1,3$$

Из /7.54/ могут быть получены соотношения, определяющие угол поворота вала ножниц

$$\alpha = \int \omega_* dt. \quad /7.55/$$

Здесь

$$\gamma = \frac{180}{\pi} \omega_0 = \frac{180}{3,14} \cdot 55,7 = 65,2 \text{ град}$$

Таким образом, соотношения для определения угла поворота вала ножниц будут такими:

$$\alpha = 300t - 2370 (1 - e^{-t/7,9}) \text{ при } M_* \geq 1,3; \quad /7.56/$$

$$\alpha = 64,8t - 0,72 (1 - e^{-t/0,154}) \text{ при } M_* \leq 1,3.$$

Время разгона электродвигателей до скорости $\omega_* = 0,922$, соответствующей $M_* = 1,3$, составляет

$$t_1 = 7,9 \ln \frac{1,6 - 0,107}{1,3 - 0,107} = 7,9 \ln 1,25 = 1,76 \text{ с.}$$

За это время вал ножниц повернется на угол

$$\alpha_1 = 300 \cdot 1,76 - 2370 (1 - e^{-\frac{1,76}{1,9}}) = 54 \text{ град.}$$

Для того чтобы при работе по круговому циклу за время пуска /в моменту начала резания/ вал ножниц повернулся на угол $\alpha_n = 75$ град /см. рис. 7.12/, угол поворота вала ножниц при разгоне с $M_* < 1,3$ должен быть $\alpha_2 = \alpha_n - \alpha_1 = 75 - 54 = 21$ град. Это произойдет за время $t_2 = 0,333$ с, что подтверждается проверкой:

$$\alpha_2 = 64,8 \cdot 0,333 - 0,72 (1 - e^{-\frac{0,333}{0,154}}) = 21 \text{ град.}$$

Двигатели ножниц разгоняются за это время до скорости

$$\omega_* = 0,994 - 0,0716 e^{-\frac{0,333}{0,154}} = 0,986.$$

Суммарное время пуска составит $t_n = t_1 + t_2 = 1,76 + 0,333 = 2,093$ с.

б/ Резание

В процессе резания момент статического сопротивления изменяется в зависимости от угла поворота вала ножниц. График изменения M_c показан на рис. 7.12.

Угол поворота вала ножниц при резании составляет $\alpha_{рез} = 52$ град. Переходный режим при резании можно рассчитывать методом конечных разностей [2]. При этом целесообразно в качестве независимой переменной принять приращение угла поворота вала ножниц $\Delta \alpha$ /в градусах/.

Уравнение движения электропривода, выраженное в конечных разностях, может быть представлено в виде

$$\Delta \omega_* = \frac{M_n}{J \omega_0} (M_* - M_{c*})_{cp} \Delta t, \quad /7.57/$$

где $\Delta \omega_*$ - приращение скорости электродвигателей ножниц в относительных единицах; Δt - приращение времени, с.

Из этого уравнения можно исключить время на основании равенства

$$\Delta t = T \frac{\Delta \alpha}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{cp}} \quad /7.58/$$

Здесь

$$T = \frac{\pi i \alpha_{рез}}{180 \omega_0} = \frac{\pi \cdot 49,52}{180 \cdot 55,7} = 0,8 \text{ с.}$$

В результате

$$\Delta \omega_* = \delta \frac{(M_* - M_{c*})_{cp}}{\omega_* cp} \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}} \quad /7.59/$$

При этом

$$\delta = \frac{\pi i \alpha_{рез} M_n}{180 J \omega_0^2} = \frac{\pi \cdot 49,52 \cdot 13758}{180 \cdot 633,8 \cdot 55,7^2} = 0,311.$$

Можно приближенно принять, что на достаточно малом участке пути средние значения рассматриваемых величин равны их начальным значениям плюс половина приращения. Тогда

$$(M_* - M_{c*})_{cp} = (M_* - M_{c*})_{нач} + 0,5 (\Delta M_* - \Delta M_{c*}); \quad /7.60/$$

$$\omega_* cp = \omega_{* нач} + 0,5 \Delta \omega_* \quad /7.61/$$

Для принятых расчетных характеристик /см. рис. 7.13/

$$M_* = m - k \omega_*.$$

Значения m и k определяются /7.49/ и /7.50/. Так как $\Delta M_* = -k \Delta \omega_*$, то /7.60/ может быть представлено в виде

$$(M_* - M_{c*})_{cp} = (M_* - M_{c*})_{нач} - 0,5 (k \Delta \omega_* + \Delta M_{c*}). \quad /7.62/$$

На основании /7.59/ это равенство можно заменить следующим:

$$(M_* - M_{c*})_{cp} = (M_* - M_{c*})_{нач} - 0,5 \left[k \delta \frac{(M_* - M_{c*})_{cp}}{\omega_* cp} \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}} + \Delta M_{c*} \right]. \quad /7.63/$$

Из /7.64/ следует, что

$$(M_* - M_{сж})_{ср} = \frac{(M_* - M_{сж})_{нач} - 0,5 \Delta M_{сж}}{1 + 0,5 \kappa \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез} \omega_{*ср}}} \quad /7.65/$$

Поэтому /7.59/ запишем в таком виде:

$$\Delta \omega_* = \frac{(M_* - M_{сж})_{нач} - 0,5 \Delta M_{сж}}{\omega_{*ср} + 0,5 \kappa \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}}} \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}}, \quad /7.66/$$

или на основании /7.61/

$$\Delta \omega_* = \frac{(M_* - M_{сж})_{нач} - 0,5 \Delta M_{сж}}{\omega_{*нач} + 0,5 (\Delta \omega_* + \kappa \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}})} \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}} \quad /7.67/$$

Пренебрегая в знаменателе /7.67/ малой величиной $0,5 \Delta \omega_*$, окончательно принимаем

$$\Delta \omega_* = \frac{f_1}{f_2} \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}}, \quad /7.68/$$

где

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= (M_* - M_{сж})_{нач} - 0,5 \Delta M_{сж}; \\ f_2 &= \omega_{*нач} + 0,5 \kappa \delta \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}}. \end{aligned} \right\} \quad /7.69/$$

Сведем формулы для расчета режима резания на основании /7.58/, /7.61/, /7.62/ и /7.69/:

$$\left. \begin{aligned} M_* &= \pi - \kappa \omega_*; \\ f_1 &= (M_* - M_{сж})_{нач} - 0,5 \Delta M_{сж}; \\ f_2 &= \omega_{*нач} + 0,1555 \kappa \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}}; \\ \Delta \omega_* &= 0,311 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}} \frac{f_1}{f_2}; \end{aligned} \right\} \quad /7.70/$$

$$\omega_{*ср} = \omega_{*нач} + 0,5 \Delta \omega_*;$$

$$\Delta t = 0,8 \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{рез}} \frac{1}{\omega_{*ср}}$$

Результаты расчетов приведены в табл.7.3.

в/ Восстановление скорости

По окончании резания происходит восстановление скорости электродвигателей по экспоненциальному закону /7.52/ аналогично пуску с теми же постоянными времени:

$$T = 7,9 \text{ с при } M_* > 1,3 \text{ и } T = 0,154 \text{ с при } M_* \leq 1,3$$

и соответствующими начальными значениями моментов.

При этом

$$M_* = 0,107(1 - e^{-t/7,9}) + 1,414 e^{-t/7,9} \quad \text{при } M_* > 1,3; \quad /7.71/$$

$$M_* = 0,107(1 - e^{-t/0,154}) + 1,3 e^{-t/0,154} \quad \text{при } M_* \leq 1,3.$$

На основании /7.49/, /7.55/ из /7.71/ могут быть получены формулы для определения скорости:

$$\omega_* = 4,59 - 4,02 e^{-t/7,9} \quad \text{при } M_* > 1,3; \quad /7.72/$$

$$\omega_* = 0,994 - 0,0716 e^{-t/0,154} \quad \text{при } M_* \leq 1,3.$$

Соответственно получают и формулы для определения угла поворота вала ножиц:

$$\alpha = 300t - 2075(1 - e^{-t/7,9}) \quad \text{при } M_* > 1,3; \quad /7.73/$$

$$\alpha = 64,8t - 0,72(1 - e^{-t/0,154}) \quad \text{при } M_* \leq 1,3.$$

Расчет переходного режима резания ($m = K = 16,65$)

Таблица 7.3

| $\alpha, град$ | $\Delta \alpha, град$ | $\omega_n, нав$ | $M_n, нав$ | $M_{с. нав}$ | $\Delta M_{с. н}$ | f_1 | f_2 | $\Delta \omega_n$ | $\Delta \omega_{ср}$ | $\Delta t, с$ | $t, с$ |
|----------------|-----------------------|-----------------|------------|--------------|-------------------|--------|--------|-------------------|----------------------|---------------|--------|
| 75 | 4 | 0,986 | 0,233 | 0,107 | 0,36 | -0,055 | 1,086 | -0,0006 | 0,966 | 0,0311 | 0 |
| 79 | 4 | 0,981 | 0,322 | 0,87 | 0,43 | -0,763 | 1,081 | -0,0084 | 0,972 | 0,0315 | 0,0623 |
| 83 | 4 | 0,96 | 0,625 | 1,84 | 0,41 | -1,42 | 1,06 | -0,016 | 0,952 | 0,0322 | 0,1255 |
| 87 | 3 | 0,927 | 1,225 | 2,68 | 0,1 | -1,555 | 0,9515 | -0,0048 | 0,934 | 0,0082 | 0,1905 |
| 90 | 2 | 0,895 | 1,309 | 3,12 | 0,12 | -1,871 | 0,897 | -0,0248 | 0,883 | 0,0348 | 0,2407 |
| 92 | 4 | 0,871 | 1,317 | 3,24 | 0,1 | -1,973 | 0,873 | -0,0269 | 0,858 | 0,0358 | 0,2755 |
| 96 | 4 | 0,815 | 1,335 | 3,42 | 0,02 | -2,095 | 0,817 | -0,0304 | 0,8 | 0,0384 | 0,3483 |
| 100 | 6 | 0,754 | 1,355 | 3,42 | -0,06 | -2,035 | 0,756 | -0,0319 | 0,738 | 0,0415 | 0,4266 |
| 106 | 6 | 0,66 | 1,385 | 3,08 | -0,22 | -1,585 | 0,662 | -0,0285 | 0,646 | 0,0475 | 0,5571 |
| 112 | 6 | 0,587 | 1,409 | 2,48 | -0,26 | -0,941 | 0,589 | -0,019 | 0,578 | 0,0532 | 0,7056 |
| 118 | 6 | 0,545 | 1,423 | 1,68 | -0,24 | -0,134 | 0,547 | -0,0029 | 0,544 | 0,0565 | 0,8694 |
| 124 | 3 | 0,55 | 1,421 | 1,06 | -0,16 | 0,441 | 0,552 | 0,0095 | 0,555 | 0,0554 | 1,0386 |
| 127 | - | 0,572 | 1,414 | 0,8 | - | - | - | - | - | - | - |

Время разгона электродвигателей до скорости $\omega_n = 0,922$, соответствующей $M_n = 1,3$, будет

$$t_3 = 7,9 \ln \frac{1,414 - 0,107}{1,3 - 0,107} = 7,9 \ln 1,094 = 0,71 с.$$

За это время вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_3 = 300 \cdot 0,71 - 2075 \left(1 - e^{-\frac{0,71}{7,9}}\right) = 35 \text{ град.}$$

От скорости $\omega_n = 0,922$ до скорости $\omega_n = 0,984$, отличающейся от скорости холостого хода на 1%, электродвигатели ножиц разгонятся за время

$$t_4 = 0,154 \ln \frac{0,0716}{0,994 - 0,984} = 0,154 \ln 7,16 = 0,303 с.$$

При этом вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_4 = 64,8 \cdot 0,303 - 0,72 \left(1 - e^{-\frac{0,303}{0,154}}\right) = 19 \text{ град.}$$

Суммарное время восстановления скорости составляет

$$t_8 = t_3 + t_4 = 0,71 + 0,303 = 1,013 с.$$

а суммарный угол поворота вала ножиц

$$\alpha_8 = \alpha_3 + \alpha_4 = 35 + 19 = 54 \text{ град.}$$

г/ Торможение электродвигателей

При торможении электродвигателей, как и при разгоне, изменение момента электродвигателя в функции времени происходит по экспоненциальному закону. Но при этом момент статического сопротивления остается положительным, а момент на валу электродвигателя становится отрицательным /тормозящим/.

В режиме обратного включения тормозящий момент на валу электродвигателя будет определяться так:

$$M_* = -M_x \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad /7.74/$$

Торможение происходит при работающем регуляторе тока с $M_n = 1,3$ /при $T = 7,9 с/$.

Начальный момент при торможении в режиме обратного включения согласно /7.49/

$$M_{нач} = 1,6 + 0,325 \omega_n = 1,6 + 0,325 \cdot 0,984 = 1,923.$$

После подстановки числовых значений /7.74/ запишем в таком виде:

$$M_* = -0,107(1 - e^{-t/7,9}) + 1,923e^{-t/7,9}$$

При этом согласно /7.49/ и /7.55/ /7.75/

$$\omega_* = -5,25 + 6,244e^{-t/7,9}$$

и соответственно /7.76/

$$\alpha = -343t + 3220(1 - e^{-t/7,9})$$

Время торможения до полной остановки /7.77/

$$t_7 = 7,9 \ln \frac{6,244}{5,25} = 7,9 \ln 1,19 = 1,375 \text{ с.}$$

За это время вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_7 = -343 \cdot 1,375 + 3220(1 - e^{-1,375/7,9}) = 43 \text{ град.}$$

д/ Установившийся ход

Угол поворота вала ножиц за время пуска, резания, восстановления скорости и торможения составляет

$$\alpha_n + \alpha_{рез} + \alpha_в + \alpha_7 = 75 + 52 + 54 + 43 = 224 \text{ град.}$$

Оставшийся угловой путь $\alpha_y = 360 - 224 = 136$ град будет пройден на установившейся скорости $\omega_{x*} = 0,994$ за время

$$t_y = \frac{\pi i}{180 \omega_0} \frac{\alpha_y}{\omega_{x*}} = \frac{\pi \cdot 49}{180 \cdot 55,7} \cdot \frac{136}{0,994} = 2,1 \text{ с.}$$

Суммарное время работы ножиц за цикл

$$t_0 + t_n + t_{рез} + t_в + t_y + t_7 = 2,093 + 1,148 + 1,013 + 2,1 + 1,375 \approx 7,73 \text{ с.}$$

Результаты расчетов представлены в виде кривых на рис.7.14.

е/ Расчет эквивалентной нагрузки

Эквивалентный /среднеквадратичный/ момент электродвигателей для рассматриваемого режима, определенный по кривой момента на валу двигателя, составляет 108% номинального, что при соответствующем усилении вентиляции двигателя вполне допустимо.

2/ Второй вариант /упрощенный расчет/

а/ Пуск двигателей

Средний момент электродвигателей при пуске можно приближенно принять равным $M_n = \lambda M_H = 1,3 \cdot 13758 = 17885 \text{ Н}\cdot\text{м.}$

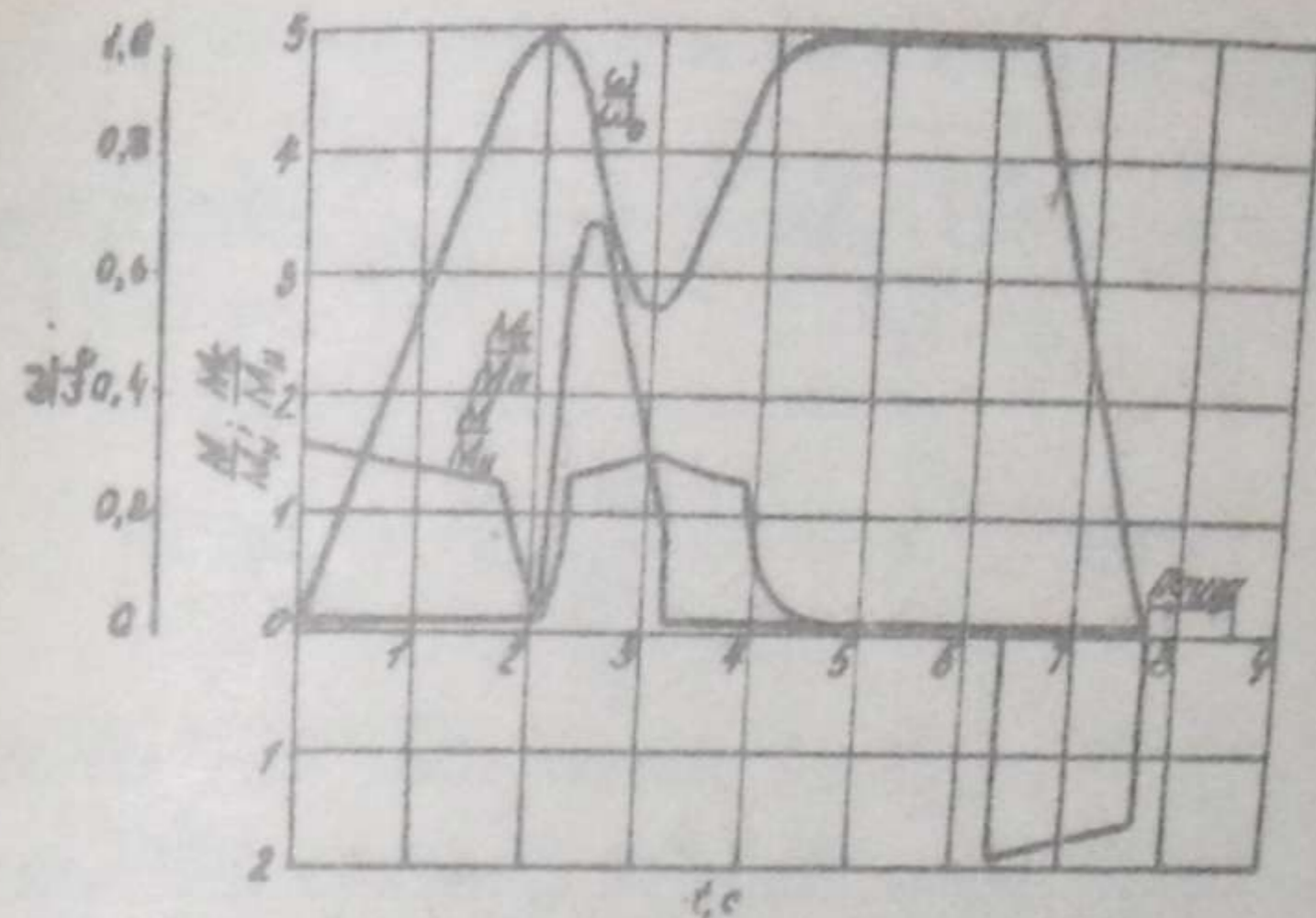


Рис.7.14. Кривые момента на валу электродвигателя, момента статических сопротивлений и скорости электродвигателя в функции времени /в относительных единицах/

Среднее ускорение при этом будет

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_n = \frac{M_n - M_x}{J} = \frac{17885 - 1472}{633,8} = 25,9 \text{ 1/с}^2.$$

Время пуска электродвигателей составит

$$t_n = \frac{\omega_x}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_n} \approx \frac{\omega_0}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_n} = \frac{55,7}{25,9} = 2,15 \text{ с.}$$

За это время вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_n = \frac{180 \omega_x t_n}{\pi \cdot 2} \approx \frac{180 \omega_0 t_n}{\pi \cdot 2} = \frac{180}{\pi \cdot 2} \cdot \frac{55,7 \cdot 2,15}{2} = 70 \text{ град.}$$

т.е. почти на тот угол, при котором начнется резание.

Исходное положение ножиц в этом случае должно быть при

$$\alpha = \alpha_{н.р} - \alpha_n = 75 - 70 = 5 \text{ град.}$$

б/ Резание

Средний момент электродвигателей при резании будет примерно тот же, что и при пуске. Можно принять

$$M_{рез} = \lambda_n M_H = 1,3 \cdot 13758 = 17885 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Работа, совершаемая электродвигателями при резании,

$$A_{рез} = M_{рез} \frac{\pi i}{180} \alpha_{рез} = 17885 \frac{\pi \cdot 49}{180} \cdot 52 = 785 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Изменение кинетической энергии привода ножиц равно разности работы момента статического сопротивления и момента электродвигателей:

$$J \frac{\omega_x^2 - \omega_{х.р}^2}{2} = A_{рез} - A'_{рез} = 1510 \cdot 10^3 - 785 \cdot 10^3 = 725 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Следовательно, скорость в конце резания

$$\omega_{к.р} = \omega_x \sqrt{1 - \frac{A_{рез} - A_{ис}}{Z \frac{\omega_x^2}{2}}} \approx \omega_0 \sqrt{1 - \frac{A_{рез} - A_{ис}}{Z \frac{\omega_0^2}{2}}} =$$

$$= 55,7 \sqrt{1 - \frac{725 \cdot 10^3}{633,8 \frac{55,7^2}{2}}} = 30 \text{ 1/с.}$$

Средняя скорость в процессе резания может быть принята

$$\omega_{ср.р} = \frac{\omega_x + \omega_{к.р}}{2} \approx \frac{\omega_0 + \omega_{к.р}}{2} = \frac{55,7 + 30}{2} = 42,8 \text{ 1/с.}$$

Время резания

$$t_{рез} = \frac{\pi i d_{рез}}{180 \omega_{ср.р}} = \frac{\pi \cdot 49 \cdot 52}{180 \cdot 42,8} = 1,04 \text{ с.}$$

в/ Восстановление скорости вращения

Средний момент при восстановлении скорости может быть тот же, что при пуске и резания, а именно:

$$M_B = \lambda_N M_N = 1,3 \cdot 13758 = 17885 \text{ Н.м.}$$

Среднее ускорение при восстановлении скорости вращения будет

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_B = \frac{M_B - M_x}{Z} = \frac{17885 - 1472}{633,8} = 25,9 \text{ 1/с}^2.$$

Время восстановления скорости вращения

$$t_B = \frac{\omega_x - \omega_{к.р}}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_B} \approx \frac{\omega_0 - \omega_{к.р}}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_B} = \frac{55,7 - 30}{25,9} = 0,99 \text{ с.}$$

За это время вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_B = \frac{180 \omega_{к.р} + \omega_x}{\pi i} t_B \approx \frac{180 \omega_{ср.р}}{\pi i} t_B = \frac{180}{\pi \cdot 49} \cdot 42,8 \cdot 0,99 = 49,5 \text{ град.}$$

г/ Торможение

Среднее значение тормозного момента электродвигателей с учетом неидеальности работы регулятора тока можно принять на 25...50% больше, чем при пуске /см. рис.7.14/. В среднем это составит

$$M_T = \frac{125 + 1,5}{2} \lambda_N M_N = 1,375 \cdot 1,3 \cdot 13758 = 24592 \text{ Н.м.}$$

Среднее замедление при этом будет

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_T = \frac{M_T + M_x}{Z} = \frac{24592 + 1472}{633,8} = 41 \text{ 1/с}^2.$$

Время торможения

$$t_T = \frac{\omega_x}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_T} \approx \frac{\omega_0}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_T} = \frac{55,7}{41} = 1,36 \text{ с.}$$

За время торможения вал ножиц повернется на угол

$$\alpha_T = \frac{180 \cdot \omega_x}{\pi i \cdot 2} t_T \approx \frac{180 \omega_0}{\pi i \cdot 2} t_T = \frac{180}{\pi \cdot 49} \frac{55,7}{2} \cdot 1,36 = 44,3 \text{ град.}$$

д/ Установившийся ход

Поскольку исходное положение ножиц должно быть при 5 град, то конечное положение будет при $360 - 5 = 355$ град.

Угол поворота вала ножиц за время пуска, резания восстановления скорости и торможения составит

$$\alpha_n + \alpha_{рез} + \alpha_B + \alpha_T = 70 + 52 + 49,5 + 44,3 = 215,8 \text{ град.}$$

Оставшийся путь $\alpha_y = 350 - 215,8 = 134,2$ град на установившейся скорости будет пройден за время

$$t_y = \frac{\pi i \alpha_y}{180 \omega_x} \approx \frac{\pi i \alpha_y}{180 \omega_0} = \frac{\pi \cdot 49}{180} \frac{134,2}{55,7} = 2,06 \text{ с.}$$

Суммарное время работы ножиц за цикл $t_p = t_n + t_{рез} + t_B +$

$+ t_y + t_T = 2,15 + 1,04 + 0,99 + 2,06 + 1,36 = 7,6$ с, что практически совпадает со временем работы, определенным в первом варианте расчета.

е/ Расчет эквивалентной нагрузки

Эквивалентный /среднеквадратичный/ момент электродвигателей ножиц в рассматриваемом случае

$$M_{э} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_{рез}^2 t_{рез} + M_B^2 t_B + M_x^2 t_y + M_T^2 t_T}{t_{\Sigma}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(17,89 \cdot 10^3)^2 (2,15 + 1,04 + 0,99) + (4,47 \cdot 10^3)^2 (2,06 + (2,45 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,36)}{8,57}}$$

или в относительных единицах

$$M_{э*} = \frac{M_{э}}{M_N} = \frac{14715}{13758} = 1,07.$$

Это значение эквивалентного момента практически совпадает со значением эквивалентного момента, полученного в первом варианте расчета.

В результате сопоставления двух вариантов расчета можно прийти к выводу, что второй /упрощенный/ вариант расчета дает некоторое расхождение в отдельные периоды работы электродвигателя по нагреву в целом за весь цикл работы.

7.6. Усилие резания и выбор электродвигателя для ножниц с наклонным ножом

Усилие резания в установившемся режиме для ножниц с наклонным ножом может быть определено по формуле В.В.Носала

$$P = \left(1 - \gamma \frac{tg \beta}{0,66 \delta} + \frac{1}{1 + \frac{106 \delta}{6 \delta \gamma^2 x}} \right) \frac{h^2}{tg \beta} \alpha. \quad /7.78/$$

Здесь h - толщина разрезаемого металла; β - его ширина; β - угол наклона ножа; γ - величина, определяемая по графику /рис.7.15/, в зависимости от значения параметра $\lambda = c \frac{tg \beta}{\delta \delta h}$ /где c - ширина отрезаемой полосы/; σ_s , $\delta_s h$ - соответственно предел прочности и относительное удлинение при испытании на разрыв; $\alpha = 0,66 \delta_s$ - удельная работа резания; x - отношение расстояния между прижимом и плоскостью реза к толщине разрезаемого металла; γ - отношение зазора между ножами к толщине разрезаемого металла.

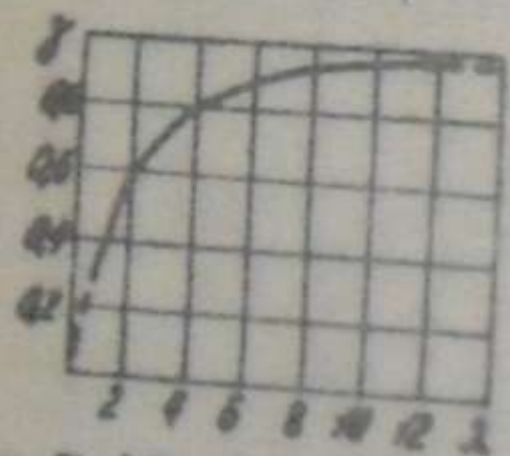


Рис.7.15. Зависимость $\gamma = f(\lambda)$

Формула /7.78/ получена на основании экспериментальных данных и учитывает усилие изгиба отрезаемой полосы.

По полученному значению усилия резания определяется момент статического сопротивления на валу электродвигателя в функции угла поворота кривошипа /аналогично описанному для ножниц с параллельными ножами/.

Электродвигатель можно предварительно выбрать в предположении, что среднеквадратичный момент его составляет около $1,25 M_{cp}$, где средний момент M_{cp} определяется по графику момента статического сопротивления в функции угла поворота кривошипа.

условий:

1/ если нет опасности перегрузки электродвигателя по максимальному моменту при резе, то маховик выбирается так, чтобы он обеспечивал практически полное выравнивание нагрузки электродвигателя при резе и при холостом ходе между резами;

2/ если существует опасность недопустимой перегрузки электродвигателя при резе, то маховик выбирается так, чтобы он ограничивал момент электродвигателя в допустимых пределах.

Подробно выбор маховика для рассматриваемых режимов работы описан в [1; 2].

Окончательная проверка электродвигателя по нагреву при его работе с выбранным маховиком может быть произведена по методу эквивалентного момента после графического построения кривой момента электродвигателя в функции времени /расчетным путем или по шаблону/.

7.7. Требования, предъявляемые к электроприводу, и выбор электродвигателей для летучих ножниц

Основное требование, предъявляемое к электроприводу летучих ножниц, - обеспечить заданную точность резания во всем диапазоне изменения длин металла и скоростей прокатки при любых возможных случайных колебаниях скорости полосы в процессе резания и изменения других факторов /температуры, напряжения сети и др./.

Работа, совершаемая инерционными массами привода летучих ножниц при резании, если пренебречь работой двигателя /малая величина/, равна сумме работ резания, отрыва отрезаемого куска и затрачиваемой на ускорение этого куска.

Работа резания

$$A_1 = F h_0 \alpha, \quad /7.79/$$

где F - площадь разрезаемого металла, mm^2 ; h_0 - толщина разрезаемого металла, m ; α - удельная работа резания, N/mm^2 /определяемая так же, как и для ножниц с параллельными ножами/.

Работа отрыва отрезаемого куска от полосы

$$A_2 = \delta h_{отр} \sigma_s v t_{рез}, \quad /7.80/$$

где δ - ширина разрезаемой полосы, mm ; $h_{отр}$ - толщина разрезаемого металла в момент его отрыва, mm /определяется так же, как и для ножниц с параллельными ножами/; σ_s - предел прочности при данной температуре и скорости деформации, N/mm^2 ; v - скорость движения

полосы в момент резания, м/с; $t_{рез}$ - время резания, с./определяется перемещением ножей $k_1 - k_{отр}$ и скоростью этого перемещения/.

Работа, затрачиваемая на ускорение отрезаемого куска при его отрыве, составляет

$$A_3 = m \frac{v_n^2 - v_n'^2}{2}, \quad /7.81/$$

где m - масса отрезаемого куска, Н·с²/м; v_n - скорость отрезаемого куска, равная скорости ножей в момент резания, м/с; v_n' - скорость полосы, м/с.

Таким образом, работа, совершаемая инерционными массами,

$$A = A_1 + A_2 + A_3. \quad /7.82/$$

При ударной нагрузке в процессе резания i -го куска скорость будет снижаться и определяться следующим образом

$$\mathcal{J} \frac{(\omega_i')^2 - (\omega_i'')^2}{2} = A_3 \quad /7.83/$$

где \mathcal{J} - момент инерции электропривода ножниц, Н·м·с²; ω_i', ω_i'' - скорость электродвигателя ножниц соответственно в начале и конце резания, 1/с.

Из /7.83/ следует, что

$$\omega_i' - \omega_i'' = \frac{A}{\mathcal{J}} \frac{\omega_i' + \omega_i''}{2}. \quad /7.84/$$

Так как ω_i' и ω_i'' мало отличаются от ω_x , то /7.84/ можно заменить приближенным

$$\omega_i' - \omega_i'' \approx \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x}. \quad /7.85/$$

Электродвигатель ножниц /совместно с системой управления/ должен обеспечить достаточно эффективное восстановление скорости между резами.

Если электродвигатель ножниц работает на естественной характеристике [1], то

$$\omega_{i+1} = \omega_x \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}}\right) + \omega_i'' e^{-\frac{t_n}{T}}, \quad /7.86/$$

где t_n - время паузы между резанием, с; T - электрохимическая постоянная времени электропривода ножниц, с.

Согласно /7.85/ и /7.86/

$$\omega_x \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}}\right) + \omega_i'' e^{-\frac{t_n}{T}} - \omega_{i+1} = \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x}. \quad /7.87/$$

В установившемся режиме $\omega_{i+1}'' = \omega_i'' = \omega_\infty''$, поэтому /7.87/ запишем в виде

$$\omega_x \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}}\right) - \omega_\infty'' \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}}\right) = \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x}, \quad /7.88/$$

откуда следует, что

$$\frac{\omega_\infty''}{\omega_x} = 1 - \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}. \quad /7.89/$$

Аналогичное выражение может быть получено для скорости в конце резания первого куска из /7.85/:

$$\frac{\omega_i''}{\omega_x} = 1 - \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2}. \quad /7.90/$$

На основании /7.89/ и /7.90/ изменение скорости, отнесенное к ω_x , составит

$$\frac{\Delta \omega''}{\omega_x} = \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{e^{-\frac{t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}. \quad /7.91/$$

Отнесенное к ω_i'' изменение скорости вращения будет

$$\frac{\Delta \omega''}{\omega_i''} = \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{e^{-\frac{t_n}{T}}}{1 - \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{e^{-\frac{t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}}. \quad /7.92/$$

Приближенно можно принять, что при постоянной скорости полосы длина отрезаемого куска

$$L = \frac{\kappa}{\omega''}, \quad /7.93/$$

где $\kappa = const$ для данных ножниц.

Тогда /7.93/ можно заменить таким выражением:

$$\frac{\Delta L}{L_\infty} = \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{e^{-\frac{t_n}{T}}}{1 - \frac{A}{\mathcal{J} \omega_x^2} \frac{e^{-\frac{t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}}. \quad /7.94/$$

По /7.94/ можно определить погрешность в длине отрезаемых кусков, обусловленную постепенным снижением скорости ножниц при их работе без специальных устройств, форсирующих работу электропривода.

Например, при резании полосы 6X1300X80000 мм на барабанных летучих ножницах со скоростью ~ 8 м/с / $A = 250$ Н·м.

$\alpha = 110 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $\omega_x = 117 \text{ 1/с}$, $t_n = 0,54 \text{ с}$, $T = 0,9 \text{ с}$
погрешность составляет

$$\frac{\Delta L}{L_{\infty}} = \frac{2500}{1 - \frac{2500}{110 \cdot 117^2}} \cdot \frac{e^{-\frac{0,54}{0,9}}}{1 - e^{-\frac{0,54}{0,9}}} = 0,002.$$

В большинстве случаев такая погрешность /являющаяся частью общей погрешности, обусловленной и другими факторами, например изменением скорости полосы/ недопустима, поэтому требуется применение специальных устройств, форсирующих восстановление скорости электродвигателя. Это обычно осуществляется для двигателя постоянного тока, управляемого по системе "управляемый преобразователь - двигатель" с помощью электронных усилителей с обратной связью по скорости /тахометрическая система/ или по углу рассогласования /сельсинная следящая система/.

Предварительно электродвигатель летучих ножниц обычно выбирается по опытным данным для существующих аналогичных ножниц. Затем выбранный электродвигатель проверяется по погрешности работы электропривода аналогично тому, как это описано для работы на естественной характеристике, но с соответствующим учетом переходного режима в системе управления. Если возникают сомнения в допустимости нагрева электродвигателя, то производится его проверка по эквивалентному моменту или току.

8. ПИЛЫ

8.1. Классификация и кинематические схемы

Для резания фасонных профилей проката и других прямоугольных профилей служат дисковые пилы различных типов [7; 8].

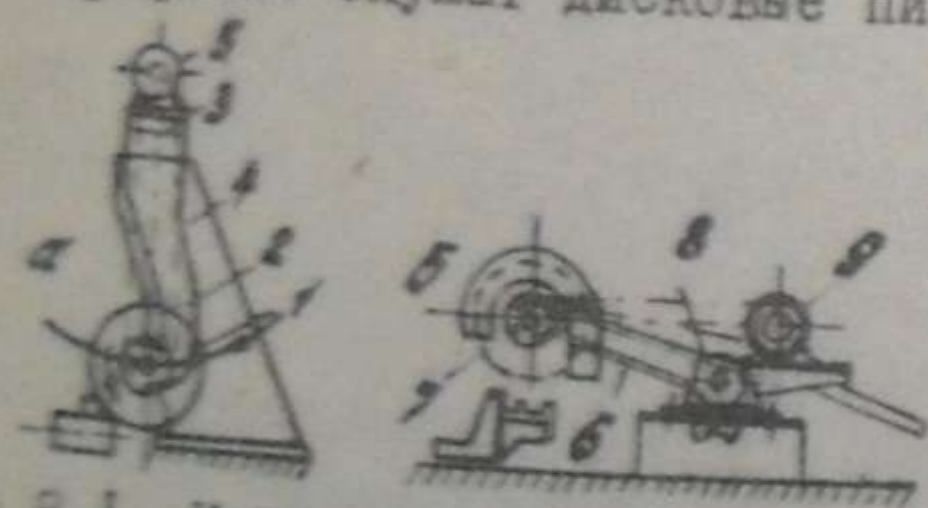


Рис. 8.1. Кинематические схемы маятниковой /а/ и рычажной /б/ пилы: 1 - диск пилы; 2 - маятник /качающийся рычаг; 3 - ось качания маятника; 4 - станина; 5 - электродвигатель; 6 - качающаяся рама; 7 - диск пилы; 8 - ось качания рамы; 9 - электродвигатель

Маятниковые пилы /рис. 8.1, а/ имеют диск, установленный на качающемся рычаге-маятнике, расположенном вертикально. Диск перемещается поворотом маятника вокруг своей оси. Ход диска этих пил ограничен. Они применяются редко, главным образом в небольших прокатных цехах, так как занимают мало места.

Рычажные пилы /рис. 8.1, б/ также снабжены диском, установленным на качающемся рычаге, но расположенным почти горизонтально. Диск перемещается опусканием рычага вручную. Такие пилы малопроизводительны и также применяются редко, в основном для отрезания проб у проката малого сечения.

Салазковые пилы /рис. 8.2/ высокопроизводительны и широко используются для резки как горячего проката в основных линиях стана, так и холостого проката в отделочных линиях. Диски таких пил приводятся в движение от асинхронного электродвигателя, а подача диска - от электродвигателя постоянного тока, обычно управляемого по системе "управляемый преобразователь - двигатель" /КТЭ с системой подчиненного управления/.

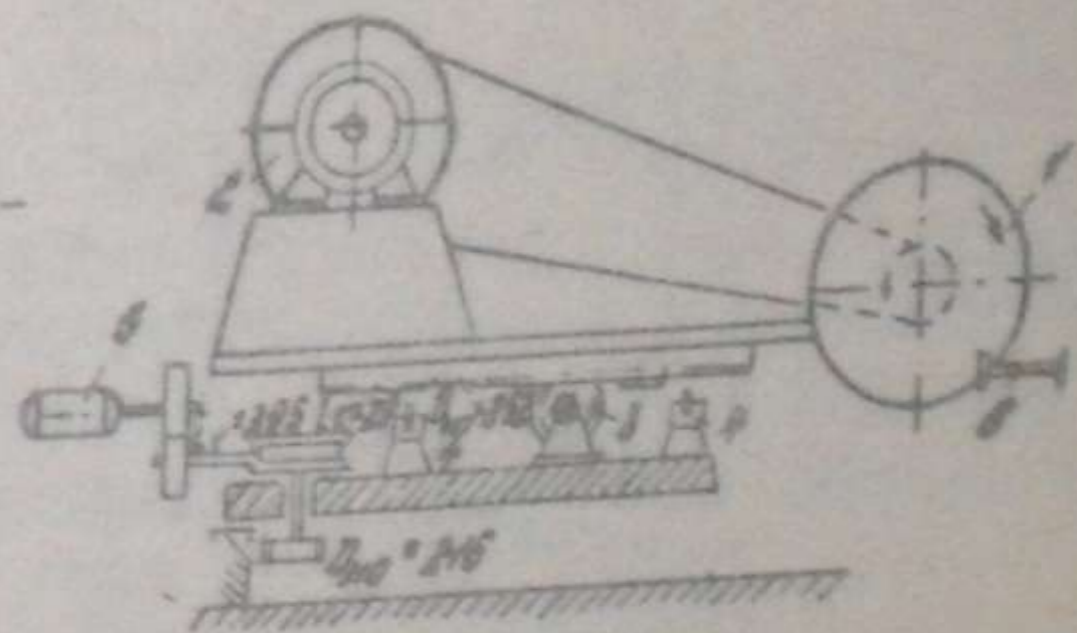


Рис. 8.2. Кинематическая схема салазковой пилы: 1 - диск пилы; 2 - электродвигатель диска; 3 - вал редуктора привода подачи пилы; 4 - конечные выключатели; 5 - электродвигатель передвижения пилы вдоль рольганга; 6 - разрезаемый металл

Для привода дисков применяются электродвигатели, рассчитанные на тяжелые условия работы /высокие температуры окружающей среды и необходимость выдерживать большие толчки нагрузки/. Подача пилы в функции нагрузки /тока/

электродвигателя диска в этом случае регулируется автоматически. Кроме того, салазковые дисковые пилы снабжены механизмом передвижения вдоль рольганга, работающим от асинхронного электродвигателя переменного тока.

В крупных прокатных цехах практикуется автоматическая работа салазковых пил горячей резки с одновременным резом несколькими пилами и возвратом их в исходное положение на повышенной скорости. Для резания горячего проката служат пилы с дисками, снабженными зубьями, отделяющими стружку; для резания холодного проката - пилы с гладкими дисками /пилы трения/, с помощью которых металл в месте резания расплавляется в результате трения о поверхность вращающегося диска.

Пилы холодной резки имеют значительно меньшую производительность, чем пилы горячей резки.

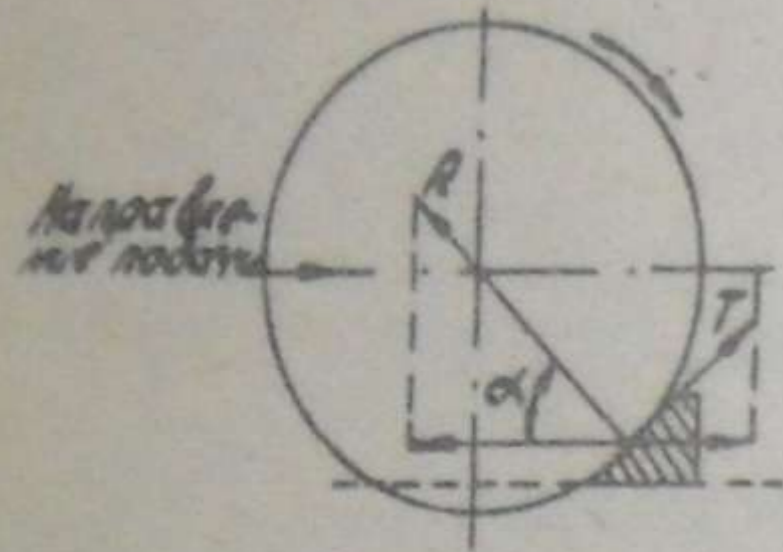
Кроме дисковых пил для резания неподвижного металла на трубопрокатных и трубосварочных станах применяются также летучие пилы, перемещающиеся вместе с разрезаемым металлом вдоль его оси.

8.2. Выбор электродвигателей для салазковой пилы горячей резки

8.2.1. Выбор электродвигателя для вращения диска

Окружное усилие на диске пилы при резании /рис.8.3/, Н:

$$T = pms \frac{\rho}{t_3} \quad /8.1/$$



Здесь p - давление резания, отнесенное к 1 мм^2 сечения снимаемой стружки, Н/мм^2 ; m - толщина стружки, снимаемой каждым зубом пилы, мм; s - ширина прореза, мм; ρ - длина дуги соприкосновения диска с разрезаемым металлом, мм; t_3 - шаг зубьев на диске пилы, мм.

Рис.8.3. Усилие на диске пилы при резании

В эту формулу входят переменные ρ и m , зависящие от пути перемещения диска и скорости его подачи, которые желательно исключить. За достаточно малый отрезок времени Δt , в течение которого можно считать постоянными скорость подачи диска v /мм/с/ и длину дуги соприкосновения с разрезаемым металлом ρ , по поверхности разрезаемого металла проходит следующее количество зубьев:

$$\Delta Z = \frac{v}{t_3} \Delta t, \quad /8.2/$$

где v - окружная скорость диска пилы, мм/с.

Так как каждый зуб при этом разрезает сечение $m\rho$, то за время Δt всего будет разрезано, мм^2 :

$$\Delta F = \frac{m\rho}{t_3} v \Delta t. \quad /8.3/$$

Из /8.3/ следует, что

$$\frac{m\rho}{t_3} = \frac{1}{v} \frac{\Delta F}{\Delta t}. \quad /8.4/$$

Тогда /8.1/ может быть представлена так:

$$T = ps \frac{1}{v} \frac{\Delta F}{\Delta t}. \quad /8.5/$$

В пределе, при переходе к бесконечно малым приращениям площади сечения и времени /8.5/ принимает вид

$$T = ps \frac{1}{v} \frac{dF}{dx} \frac{dx}{dt}, \quad /8.6/$$

где x - перемещение диска пилы /начальное положение соответствует началу резания/.

Но $\frac{dx}{dt}$ - это скорость перемещения диска v_n , т.е. скорость подачи. Поэтому для определения окружного усилия может быть принята следующая окончательная формула:

$$T = ps \frac{v_n}{v} \frac{dF}{dx}. \quad /8.7/$$

Для разрезаемого проката прямоугольного сечения в установившемся режиме резания по всей толщине при постоянной скорости подачи /8.7/ дает постоянное значение T . В других случаях при постоянной скорости подачи окружное усилие T изменяется в зависимости от конфигурации поперечного сечения разрезаемого металла. Однако при соответствующем законе изменения скорости подачи, если $\frac{v_n}{v} \frac{dF}{dx}$ постоянно, окружное усилие может оставаться постоянным и для фасонного проката.

В современных схемах автоматического управления электроприводом предусмотрен специальный регулятор, обеспечивающий практическое постоянство окружного усилия для любого профиля проката. Поэтому в расчетах можно принять, что в процессе резания окружное усилие не изменяется, а его значение определяется установкой автоматического регулятора.

Для получения максимальной производительности пил целесообразно настройку такого регулятора произвести на максимальное усилие T_{max} (Н), допустимое по механической прочности диска.

В этом случае статический момент на валу электродвигателя вращения диска будет

$$M_c = \frac{T_{max} D}{2\eta} \frac{d_2}{d_1} + M_x, \quad /8.8/$$

где D - диаметр диска пилы, м; d_1 - диаметр шкива на валу диска, м; d_2 - диаметр шкива на валу электродвигателя, м; η - КПД клиноременной передачи, равный 0,98; M_x - момент холостого хода для электродвигателя вращения диска, составляющий 10...15% номинального момента электродвигателя, Н·м.

Если для самого тяжелого профиля задано время резания /или задана средняя скорость подачи и ширина разрезаемого металла/, а также время цикла $t_{рез}$, то эквивалентный момент для электродвигателя вращения диска будет

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_c^2 t_{рез} + M_x^2 (t_4 - t_{рез})}{t_4}}. \quad /8.9/$$

По полученному эквивалентному моменту выбирается асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Выбранный таким образом электродвигатель должен иметь перегрузочную способность не менее чем M_c/M_n .

6.2.2. Выбор электродвигателя для подачи диска

Усилие подачи диска согласно рис. 8.3 составляет

$$P = R \cos \alpha - T \sin \alpha \quad /8.10/$$

На основании экспериментальных данных для пил горячей резки радиальная сила R может быть принята равной $15T_{max}$. При этом значении R и максимальной величине T согласно /8.10/ запишем

$$P = (15 \cos \alpha - \sin \alpha) T_{max} \quad /8.11/$$

Угол α в /8.11/ определяется по высоте между осями диска и разрезаемого проката. Это расстояние

$$H = H_0 - \frac{h}{2} \quad /8.12/$$

где H_0 - расстояние между осью диска и верхней кромкой рольганга у ножиц; h - максимальная толщина разрезаемого проката.

При этом

$$\sin \alpha = \frac{2H_0 - h}{D} \quad /8.13/$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{2H_0 - h}{D}\right)^2} \quad /8.14/$$

Статический момент на валу электродвигателя подачи составляет

$$M_c = \frac{PD_{н.о}}{2\eta i} + M_{х.п.} \quad /8.15/$$

где $D_{н.о}$ - диаметр начальной окружности шестерни реечной передачи, м; η - КПД передаточного механизма, приблизительно равный 0,6; i - передаточное число редуктора.

Момент холостого хода механизма подачи пилы

$$M_{х.п.} = \frac{9,81 Q \mu D_{н.о}}{2\eta i} + M_x \quad /8.16/$$

где Q - масса верхней части пилы, перемещающейся на салазках, кг; μ - коэффициент трения салазок по каткам $\mu \approx 0,02$; $M_x = 0,05 M_n$ - дополнительная составляющая момента холостого хода, учитывающая неучтенные сопротивления.

Средний пусковой ток, допустимый по условиям коммутации для применяемого электродвигателя при разгоне до основной скорости n_n , может быть принят равным $1,5 I_n$. Такой же средний ток может быть принят при разгоне до максимальной скорости /от основной/.

При этом динамические моменты в периоды разгона и торможения составляют:

а/ при разгоне до основной скорости и торможения от основной скорости до остановки $M_{дин} = 1,5 M_n$;

б/ при разгоне от основной скорости до максимальной и торможения от максимальной до основной скорости

$$M_{дин} = 1,5 \frac{\omega_n}{\omega_{max}} M_n.$$

Моменты на валу электродвигателя при разгоне и торможении будут такими:

а/ при разгоне до основной скорости

$$M = 1,5 M_n - M_{х.п.} \quad /8.17/$$

б/ при разгоне от основной до максимальной скорости

$$M = 1,5 \frac{\omega_n}{\omega_{max}} M_n - M_{х.п.} \quad /8.18/$$

в/ при торможении от максимальной скорости до основной

$$M = 1,5 \frac{\omega_n}{\omega_{max}} M_n + M_{х.п.} \quad /8.19/$$

г/ при торможении от основной скорости до остановки

$$M = 1,5 M_n + M_{х.п.} \quad /8.20/$$

Продолжительность каждого из периодов разгона и торможения

$$t = Z \frac{\Delta \omega}{M_{дин}} \quad /8.21/$$

Здесь Z - суммарный момент инерции механизма и электропривода подачи диска, приведенный к валу предварительно выбранного электродвигателя; $\Delta \omega$ - изменение скорости электропривода в рассматриваемом периоде разгона или торможения.

Если заданы или получены расчетным путем средняя скорость подачи, геометрические размеры разрезаемого проката и путь, пройденный пилой при резании, то может быть рассчитано время резания и холостого хода при основной и максимальной скорости /возврат пилы/.

Кроме того, зная время паузы между перемещениями салазок, можно также построить нагрузочную диаграмму для электродвигателя подачи

палы и по ней определить эквивалентный момент электродвигателя. Так как некоторые периоды времени электродвигатель работает с ослабленным полем, то следует пользоваться не действительными, а приведенными значениями моментов /см. подразд. 1.4/. Эквивалентный момент не должен быть больше номинального момента предварительно выбранного электродвигателя.

9. ТОЛКАТЕЛИ И СТАЛКИБАТЕЛИ

9.1. Классификация и кинематические схемы

Конструкции и назначения этой группы механизмов весьма разнообразны. Рассмотрим основные из них [6].

Печные толкатели предназначены для загрузки слитков и заготовок в методические печи и для проталкивания их по поду печи. Скорость толкания определяется заданной производительностью става и обычно принимается:

| | | |
|--|-------|----------------|
| для квадратичной заготовки сечением 30...60 мм | | 50...80 мм/с |
| для квадратичной заготовки и слитков сечением 100...300 мм | | 100...120 мм/с |
| для слэбов шириной 500 мм и более | | 150 мм/с |

Усилие толкания определяется по значению силы трения передвигаемого металла по направляющим или по поду печи, Н:

$$F = 9,81 m \mu, \quad /9.1/$$

где m - масса передвигаемого металла, кг; μ - коэффициент трения.

Коэффициент трения принимается в зависимости от качества поверхности при движении заготовки: по чугунным направляющим $\mu = 0,2...0,5$; по стальным направляющим $\mu = 0,4...0,7$; по керамической поверхности пода печи $\mu = 0,6...1,0$; по глассажным трубам $\mu = 0,3$.

В зависимости от способа получения прямолинейного движения толкающей головки различают гидравлические, винтовые рычажные и реечные толкатели. Наибольшее распространение получили реечные толкатели с электрическим приводом.

На рис.9.1 показана кинематическая схема сдвоенного реечного печного толкателя. Штанга толкателя поддерживается направляющими роликами. Ограничение хода толкателя в крайних положениях достигается выключением электропривода путевыми выключателями.

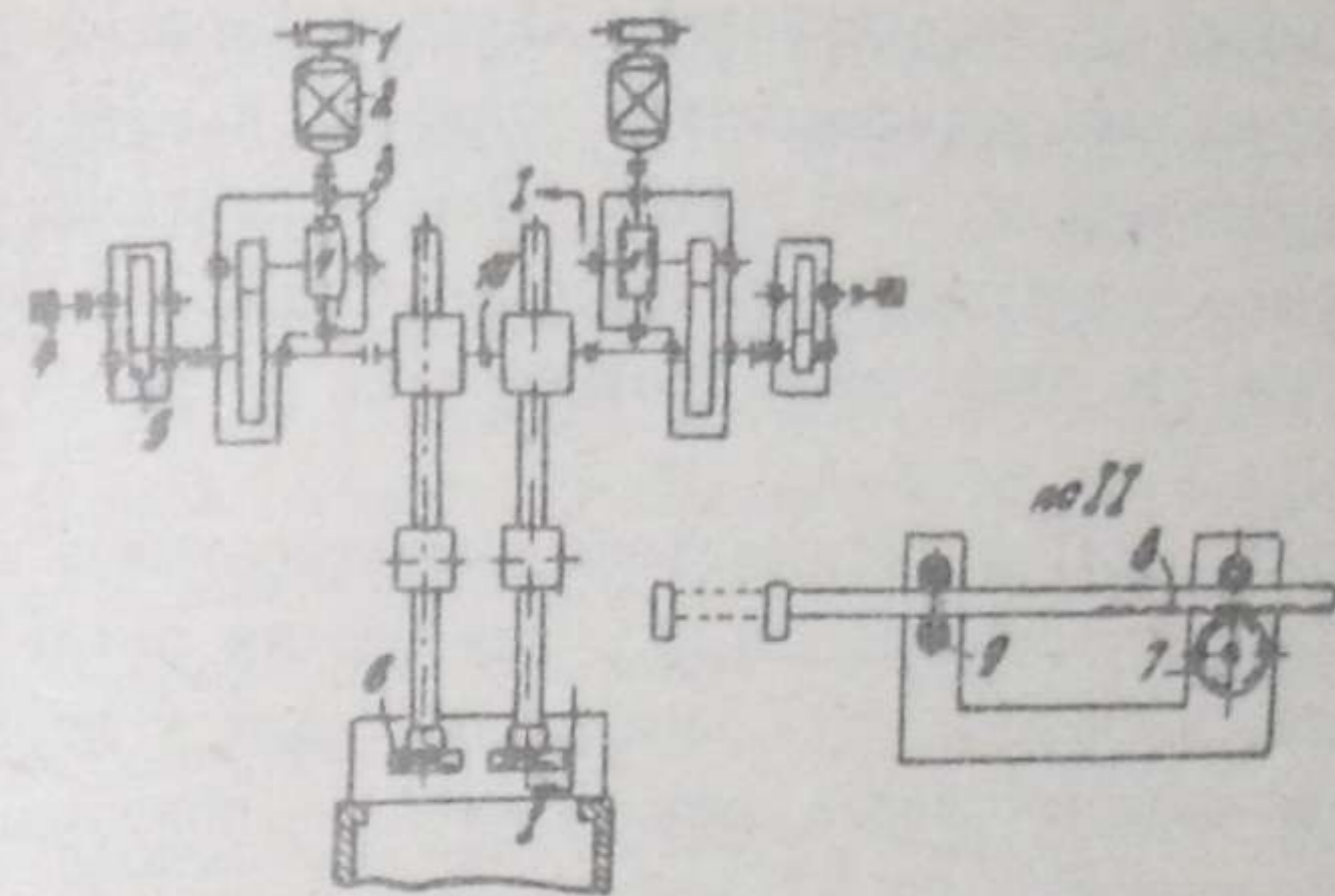


Рис.9.1. Кинематическая схема сдвоенного реечного печного толкателя: 1 - тормоз; 2 - электродвигатель; 3 - силовой редуктор; 4 - путевой выключатель; 5 - кинематический редуктор; 6 - слиток; 7 - реечная шестерня; 8 - толкающая штанга с зубчатой рейкой; 9 - направляющий опорный ролик; 10 - соединительная муфта

Два толкателя связаны соединительной муфтой, что позволяет осуществить их совместную или отдельную работу. Для подобных толкателей обычно применяются асинхронные электродвигатели с фазным ротором. Для выравнивания неравномерной нагрузки электродвигателей при совместной работе обоих толкателей в цепь ротора каждого электродвигателя включается небольшое $/3...5\% R_{\text{н}}/$ сопротивление. Режим работы электропривода печных толкателей - повторно-кратковременный.

Печные выталкиватели используются для выталкивания слитков и заготовок из методической печи через боковое окно. Наибольшее распространение получили фрикционные выталкиватели /рис.9.2/.

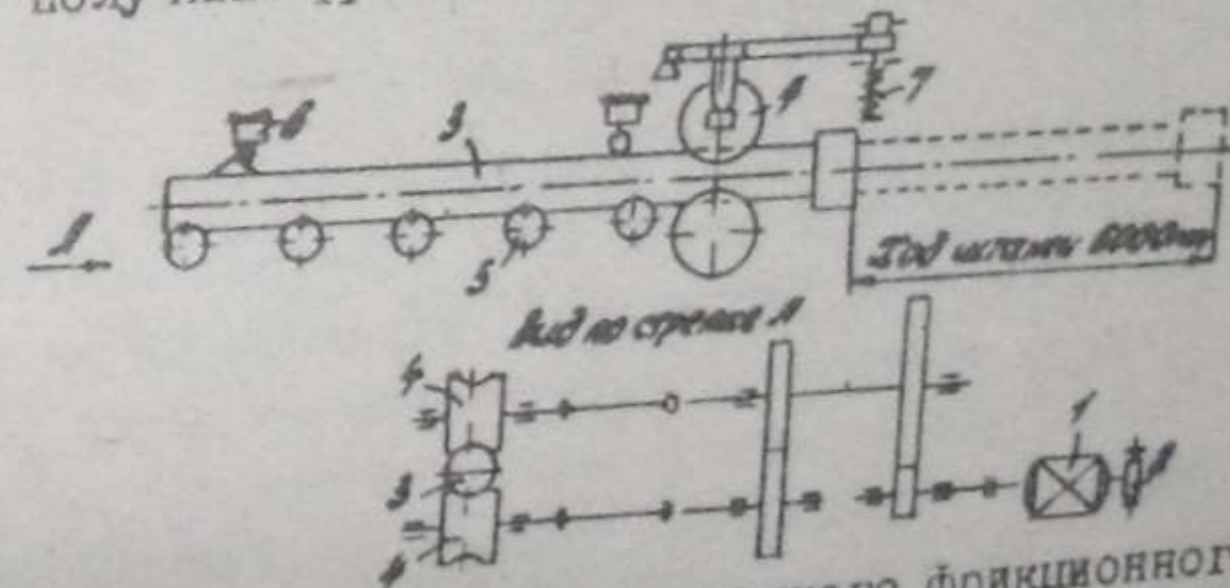


Рис.9.2. Кинематическая схема печного фрикционного выталкивателя: 1 - электродвигатель; 2 - тормоз; 3 - выталкивающая штанга; 4 - ведущие ролики; 5 - опорные ролики; 6 - конечный выключатель; 7 - пружина

Штанга выталкивателя передвигается двумя подающими роликами. Усилие толкания ограничено трением между роликами и штангой, что предохраняет выталкиватель от перегрузок. Ролики прижимаются к штанге специальным винтом и пружиной. Конструкция толкателя позволяет изменять направление его движения в соответствии с положением заготовки в печи.

При расчете мощности электропривода выталкивателей необходимо учитывать, кроме усилия толкания /9.1/, силы трения между подающими роликами и штангой, а также между опорными роликами и штангой.

Режим работы электропривода выталкивателя – повторно-кратковременный.

Выталкиватели у рабочих клеток применяются для точной подачи слэбов в первых проходах листовых станов, что способствует сохранению прямоугольной формы слэбов.

На рис.9.3 показана кинематическая схема таких выталкивателей слэбов уширительной клетки листового стана 1680. Один выталкиватель устанавливается перед клетью, а другой – за ней.

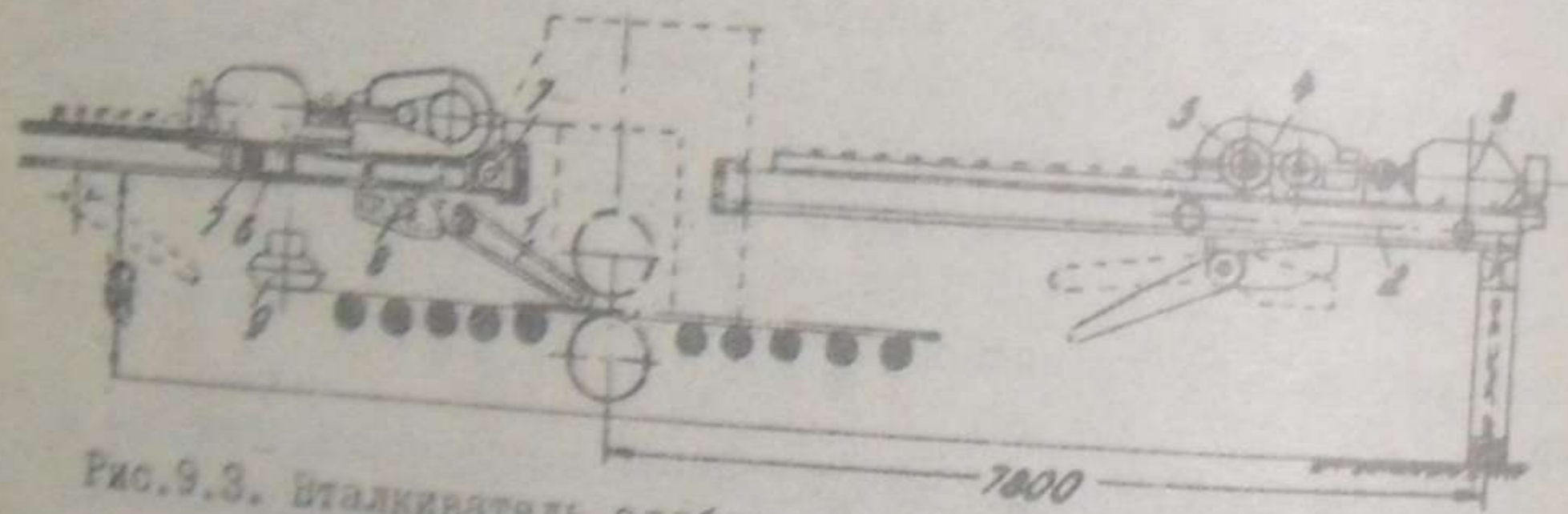


Рис.9.3. Выталкиватель слэбов уширительной клетки листового стана 1680: 1 – хобот; 2 – опорные балки; 3 – электродвигатель; 4 – червячный редуктор; 5 – реечные шестерни; 6 – рама; 7 – катки; 8 – пневматический цилиндр; 9 – вертикальные валки стана

Хобот выталкивателя 1 шарнирно подвешен к литой раме. Он имеет привод перемещения вдоль опорных балок 2 от электродвигателя 3 через червячный редуктор 4 и реечные шестерни 5, укрепленные на опорных балках. Электродвигатель и редуктор установлены на литой раме 6 с четырьмя катками 7. Конец хобота поднимается над рольгангом с помощью пневматического цилиндра 8. При задаче слэба в клеть пневматический цилиндр выключается, правый конец хобота под действием собственного веса опускается вниз, после чего включается механизм передвижения тележки по направлению к клетю. Режим работы электропривода – повторно-кратковременный.

Выталкиватели служат для сталкивания блямсов, слэбов или других заготовок на транспортерах или укладчиках, рольганги перед печами,

и т.д. Применяются сталкиватели с гидравлическим приводом, а также реечные и рычажные с электрическим приводом.

Реечные сталкиватели используются в основном для сталкивания блямсов и слэбов. По конструкции они подобны печным толкателям, но с меньшим усилием и ходом толкающей штанги. Для повышения производительности сталкивателя скорость холостого хода его повышается /0,6 м/с при ходе вперед и 0,8 м/с при ходе назад/ по сравнению со скоростью рабочего хода /0,2 м/с/. Электропривод реечных сталкивателей работает в повторно-кратковременном режиме.

Рычажные сталкиватели предназначены для сталкивания заготовок большой массы /до 300 кг/, сутунок, пакетов жести, для уборки обрезков ножниц и пил. Ход и сталкивающее усилие этих механизмов невелики.

На рис.9.4 и 9.5 показаны кинематические схемы рычажных сталкивателей.

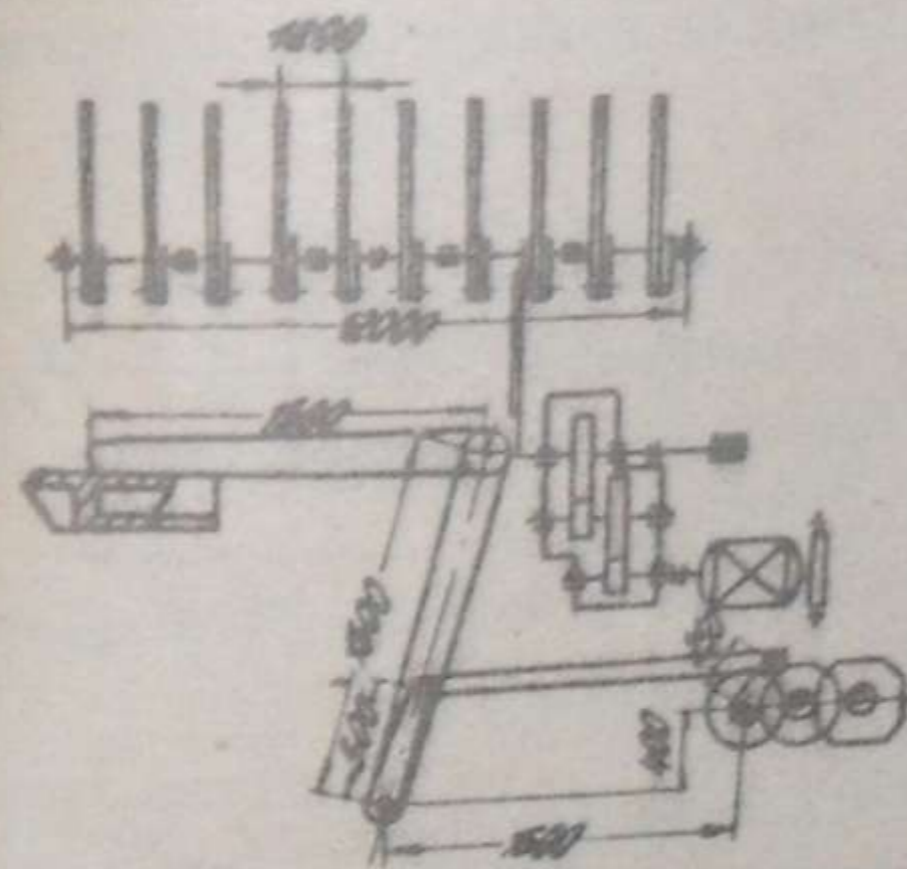


Рис.9.4. Кинематическая схема рычажного сталкивателя блямсов

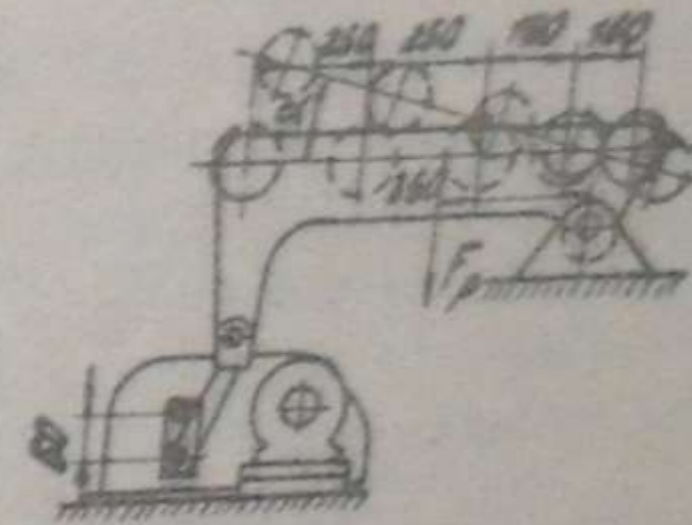


Рис.9.5. Кинематическая схема сбрасывателя пакетов жести на конвейер

Режим работы электропривода рычажных сталкивателей может быть либо перемежающимся, либо повторно-кратковременным, причем в последнем случае число включений электропривода в час может быть весьма велико /до 500/.

9.2. Пример расчета мощности электродвигателя реечного печного толкателя

9.2.1. Исходные данные

Толкатель /см. рис.9.1/ предназначен для перемещения слитков массой $m_{сл} = 270$ кг. Максимальная масса всех слитков, перемещаемых одновременно при работе толкателя, $\Sigma m_{сл} = 56000$ кг, ширина

заготовки $B = 0,25$ м, скорость перемещения слитков $v = 0,025$ м/с. Толкатель подает в печь 300 заготовок в час.

Механизм толкателя имеет следующие технические данные: ход штанги $H = 0,25 \dots 2,5$ м; масса штанги $m_{ш} = 2700$ кг; передаточное число редуктора $i = 478$; КПД редуктора $\eta_p = 0,86$; КПД реечной передачи $\eta_n = 0,9$; общий КПД механизма при полной нагрузке $\eta = 0,775$; КПД механизма при холостом ходе $\eta_x = 0,4$; диаметр цапф направляющих роликов $d_{ч} = 0,15$ м; диаметр начальной окружности реечной шестерни $D = 0,320$ м.

Коэффициент трения между слитками и подом печи $\mu = 0,7$; коэффициент трения цапф осей направляющих роликов в подшипниках качения $\mu_{ч} = 0,003$; коэффициент трения качения штанги о ролики $f = 0,0015$ м.

Для привода предварительно выбираются два электродвигателя переменного тока закрытого исполнения со следующими техническими данными: $U_N = 380$ В; $P_N = 16$ кВт при ПВ = 25%; $n_n = 720$ об/мин; $M_N = 212$ Н·м; $J_p = 0,68$ Н·м·с².

Суммарный момент инерции механизма толкателя, приведенный к валу электродвигателя / без инерции момента перемещаемых слитков/, $J_1 = 0,86$ Н·м·с². Суммарный момент инерции механизма и слитков, приведенный к валу электродвигателя, $J_2 = 0,86$ Н·м·с².

Поскольку кинематическая схема двоярного толкателя симметрична, расчет ведется для одного электродвигателя.

9.2.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Статический момент при холостом ходе

$$M_x = \frac{9,81 m_{ш} \left(\frac{d_{ч}}{2} \mu_{ч} + f \right)}{i \cdot \eta_x} = \frac{9,81 \cdot 2700 \left(\frac{0,15}{2} \cdot 0,003 + 0,0015 \right)}{478 \cdot 0,4} \approx 0,24 \text{ Н·м.}$$

Статический момент при толкании слитков в печь

$$M_c = M_x + \frac{9,81 \sum m_{сл} \cdot \mu D}{2 i \eta} = 0,24 + \frac{9,81 \cdot 56000 \cdot 0,07 \cdot 0,32}{2 \cdot 478 \cdot 0,775} \approx 8,33 \text{ Н·м.}$$

9.2.3. Расчет тахограммы работы электропривода

На рис.9.6 изображена тахограмма работы электропривода толкателя, а в табл.9.1 приведены результаты расчета времени движения, выполненного для следующих исходных данных:

а/ полный путь перемещения штанги толкателя равен ширине заготовки $B = 0,25$ м; б/ пусковой момент электродвигателя принят равным $159 \text{ Н·м} / M_n = 1,5 M_n \times 100\% = 1,5 \cdot 0,5 M_n = 1,5 \cdot 0,5 \times 212 = 159 \text{ Н·м}$; в/ тормозной момент, развиваемый механическим тормозом, принят $106 \text{ Н·м} / M_T = M_n \cdot 100\%$.

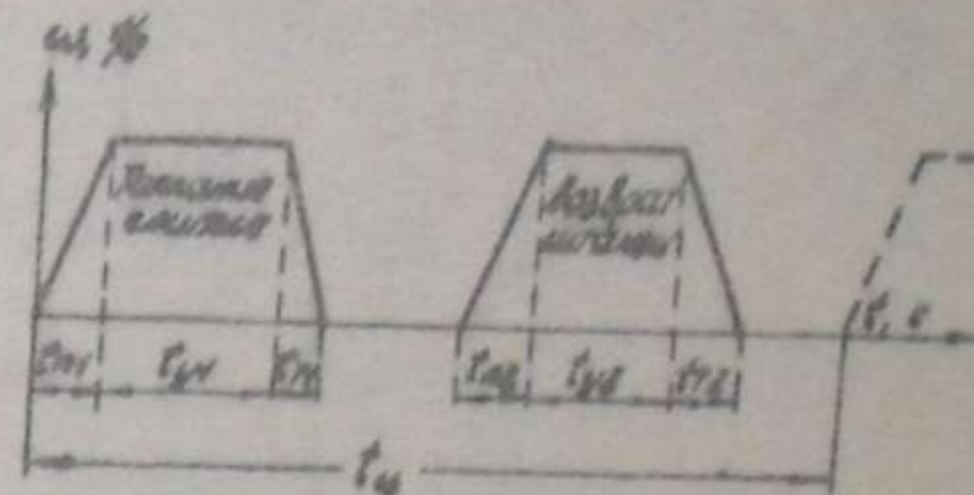


Рис.9.6. Тахограмма работы электропривода печного толкателя

Суммарное время разгона электродвигателя $t_n = t_{n1} + t_{n2} = 0,86 + 0,41 = 1,27$ с.

Таблица 9.1

Время движения электропривода толкателя, с

| Режим работы | Разгон | Установившееся движение | Торможение |
|---------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| Вталкивание слитка в печь | $t_{n1} = 0,86$ | $t_{y1} = 9,4$ | $t_{T1} = 0,34$ |
| Возврат штанги толкателя | $t_{n2} = 0,41$ | $t_{y2} = 9,5$ | $t_{T2} = 0,6$ |

Суммарное время включения $t_{вкл} = t_n + t_{y1} + t_{y2} = 1,27 + 9,4 + 9,5 = 20,17$ с.

При производительности 300 заготовок в час одна толкающая штанга задает 150 заготовок в час. Продолжительность цикла работы электропривода толкателя будет

$$t_{ц} = \frac{3600}{150} = 24 \text{ с.}$$

а фактическая относительная продолжительность включения электропривода

$$\varepsilon = \frac{20,17}{24} = 0,84.$$

9.2.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Эквивалентный момент электродвигателя, отнесенный к фактической продолжительности включения,

$$M_{\epsilon} = \sqrt{\frac{M_a^2 t_a + M_c^2 t_{y1} + M_x^2 t_{y2}}{\alpha t_a + t_{y1} + t_{y2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{159^2 \cdot 1,27 + 8,33^2 \cdot 0,94 + 0,24^2 \cdot 9,5}{0,75 \cdot 1,27 + 0,94 + 9,5}} \approx 44,1 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где $\alpha = 0,75$ - коэффициент, учитывающий ухудшение вентиляции при разгоне электродвигателя.

Эквивалентный момент, пересчитанный на каталожное значение относительной продолжительности включения,

$$M_{\epsilon k} = M_{\epsilon} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_k}} = 44,1 \sqrt{\frac{0,84}{0,25}} = 80,84 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Загрузка выбранного электродвигателя по моменту составляет

$$\frac{M_{\epsilon k}}{M_n} = \frac{80,84}{212} \approx 0,38.$$

9.3. Пример расчета мощности электродвигателя фрикционного выталкивателя

9.3.1. Исходные данные

Механизм предназначен для выталкивания из печи одновременно двух слитков массой $m_{сл} = 270$ кг каждый со скоростью $v = 2$ м/с. В течение часа из печи выталкивается 300 слитков /150 выталкиваний/.

Выталкиватель имеет следующие технические данные: катящийся диаметр ведущих роликов $d_b = 0,167$ м, диаметр опорных роликов $d_o = 0,13$ м; диаметр цапф опорных роликов $d_{ч} = 0,04$ м; длина штанги $l_w = 9$ м; диаметр штанги $d_w = 0,133$ м; масса штанги $m_w = 500$ кг; максимальное толкающее расчетное усилие $F = 3800$ Н; расчетное усилие зажатия штанги ведущими роликами $P = 10000$ Н; передаточное число редуктора $i = 3,7$; КПД редуктора $\eta_p = 0,95$;

КПД механизма $\eta_m = 0,9$; общий КПД выталкивателя $\eta = 0,855$; коэффициент трения ведущих роликов по штанге $f = 0,0015$ м; коэффициент трения скольжения в цапфах опорных роликов $\mu_{ч} = 0,007$; коэффициент трения между слитками и подом печи $\mu = 0,7$.

Предварительно выбран электродвигатель переменного тока закрытого исполнения со следующими техническими данными: $U_n = 380$ В; $P_n = 11$ кВт при ПВ = 25%; $n_n = 955$ об/мин; $M_n = 110,9$ Н·м; $J_1 = 0,263$ Н·м·с².

Суммарный момент инерции механизма, приведенный к валу электродвигателя /без момента инерции выталкиваемых слитков/, $J_1 = 0,74$ Н·м·с². Суммарный момент инерции механизма и выталкиваемых слитков, приведенный к валу электродвигателя $J_2 = 0,97$ Н·м·с².

9.3.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Статический момент при холостом ходе

$$M_x = \frac{2P \cdot f + 2m_{сл} \cdot \frac{d_{ч}}{2} \cdot \mu_{ч}}{i \eta} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10000 \cdot 0,0015 + 2 \cdot 270 \cdot \frac{0,04}{2} \cdot 0,07}{3,7 \cdot 0,855} = 9,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Статический момент при выталкивании слитков из печи

$$M_c = M_x + \frac{2 \cdot 270 \cdot \frac{d_b}{2} \cdot \mu}{i \eta} =$$

$$= 9,7 + \frac{2 \cdot 270 \cdot \frac{0,167}{2} \cdot 0,7}{3,7 \cdot 0,855} \approx 105 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

9.3.3. Расчет тахограммы работы электропривода

Тахограмма работы электропривода выталкивателя аналогична изображенной на рис.9.6 тахограмме работы толкателя. Расчет времени движения электропривода выполнен для следующих условий работы: а/ полный путь перемещения штанги выталкивателя равен 5 м; б/ пусковой момент электродвигателя $M_n = 1,5$ $M_n = 166,4$ Н·м; в/ тормозной момент, развиваемый механическим тормозом, $M_T = M_n = 110,9$ Н·м; г/ перед началом выталкивания разгон электропривода производится

входоступ; д/ торможение электропривода начинается после окончания выталкивания слитков.

В результате расчетов получены следующие значения времени движения электропривода: $t_{n1} = t_{n2} = 0,47$ с; $t_{r1} = t_{r2} = 0,61$ с; $t_{y1} = t_{y2} = 1,96$ с.

Суммарное время включения электродвигателя составляет $t_{вкл} = t_{n1} + t_{n2} + t_{y1} + t_{y2} = 0,47 + 0,47 + 1,96 + 1,96 = 4,86$ с.

Продолжительность цикла работы

$$t_{ц} = \frac{3600}{150} = 24 \text{ с.}$$

фактическая относительная продолжительность включения электродвигателей

$$\epsilon = \frac{t_{вкл}}{t_{ц}} = \frac{4,86}{24} = 0,2.$$

9.3.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Эквивалентный момент электродвигателя, отнесенный к фактической продолжительности включения

$$M_{\epsilon} = \sqrt{\frac{M_n^2 (t_{n1} + t_{n2}) + M_c^2 t_{y1} + M_x^2 t_{y2}}{\alpha (t_{n1} + t_{n2}) + t_{y1} + t_{y2}}}$$

$$= \sqrt{\frac{166,4^2 (0,47 + 0,47) + 105^2 \cdot 1,96 + 9,7^2 \cdot 1,96}{0,75 (0,47 + 0,47) + 1,96 + 1,96}} \approx 101,7 \text{ Н.м.}$$

Эквивалентный момент, пересчитанный на каталожное значение относительной продолжительности включения,

$$M_{\epsilon k} = M_{\epsilon} \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_k}} = 101,7 \sqrt{\frac{0,2}{0,25}} \approx 91 \text{ Н.м.}$$

Загрузка выбранного электродвигателя по моменту

$$\frac{M_{\epsilon k}}{M_n} = \frac{91}{110,9} \approx 0,82.$$

9.4. Пример расчета мощности электродвигателя рычажного сталкивателя

9.4.1. Исходные данные

Механизм предназначен для сталкивания разрезаемого ножницами проката с рольганга в карман. Наибольшая масса сталкиваемого слитка $m_{сл} = 270$ кг. Средняя скорость перемещения штанг сталкивателя $v = 1$ м/с. Число включений электропривода в час $Z = 300$.

Механизм сталкивателя имеет следующие технические данные: длина хода штанг $H = 1,5$ м; количество штанг $K = 10$; расстояние между штангами $= 1,2$ м; масса штанги $m_w = 50$ кг; передаточное число редуктора $i = 40,2$; общий КПД $\eta = 0,85$; коэффициент трения скольжения штанги сталкивателя о направляющие настила $\mu = 0,5$; радиус кривошипа редуктора $R = 0,25$ м; радиус кривошипа качающегося рычага $R = 0,5$ м; длина качающегося рычага $l = 1,5$ м; длина катуны $l_w = 1,5$ м.

Предварительно выбирается электродвигатель переменного тока закрытого исполнения со следующими данными: $U_n = 380$ В; $P_n = 7,5$ кВт при $\eta_B = 25\%$; $n_n = 946$ об/мин; $M_n = 75,5$ Н.м; $J_p = 0,143$ Н.м.с². Электродвигатель работает в нереверсивном повторно-кратковременном режиме.

Суммарный момент инерции механизма, приведенный к валу электродвигателя /без момента инерции сталкиваемого проката/, $J_1 = 0,4$ Н.м.с².

Суммарный момент инерции механизма и сталкиваемого проката, приведенный к валу электродвигателя, $J_2 = 0,45$ Н.м.с².

9.4.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Статическая сила F , действующая на качающийся рычаг сталкивателя O, c /рис.9.7/, создается суммарной массой штанг $K m_w$ и массой сталкиваемого слитка $m_{сл}$:

$$F = 9,81 (0,6 K m_w + m_{сл}) \mu = 9,81 (0,6 \cdot 10 \cdot 50 + 270) \cdot 0,5 \approx 2305 \text{ Н.}$$

где коэффициент 0,6 учитывает, что только часть веса штанг опирается на настил.

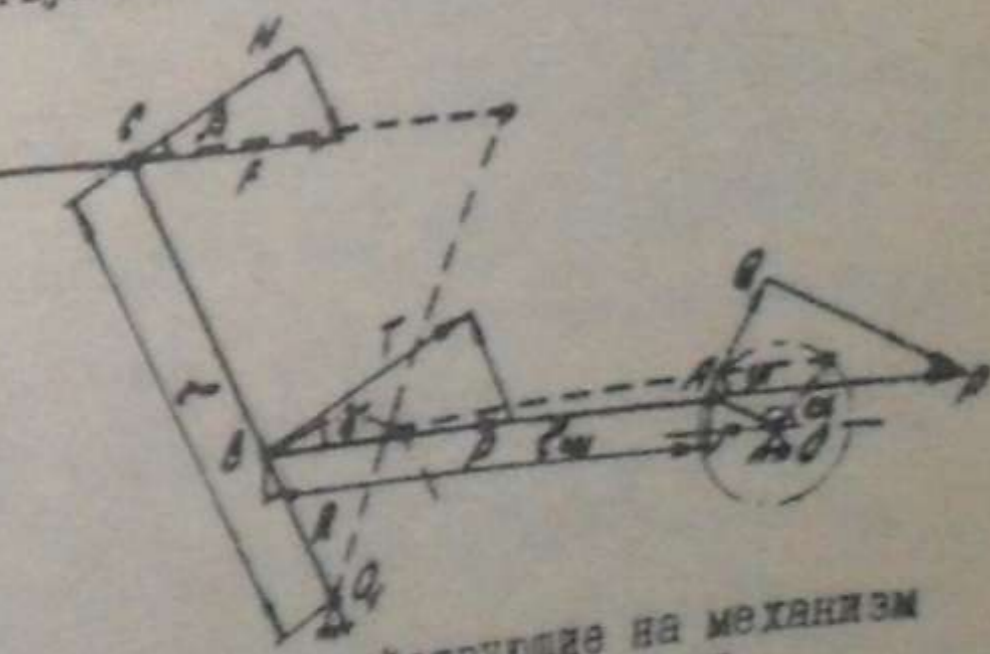


Рис.9.7. Силы, действующие на механизм рычажного сталкивателя

Статический момент, приведенный к валу электродвигателя,

$$M_c = \frac{Qr}{i\eta}, \quad /9.3/$$

где Q - тангенциальное усилие, действующее на кривошип редуктора. Из схемы действия сил на механизм сталкивателя следует, что

$$Q = P \cos \varphi, \quad /9.4/$$

где P - усилие, действующее вдоль шатуна AB .

Сила определяется по значению тангенциального усилия T на кривошипе качающегося рычага:

$$T = P \cos \gamma. \quad /9.5/$$

Усилие T создает на валу момент TR , который обеспечит в точке C качающегося рычага наличие силы N , действующей перпендикулярно к OC , причем эта сила

$$N = \frac{TR}{r}. \quad /9.6/$$

Силы N и F , действующие в точке C , связаны соотношением

$$N = F \cos \beta. \quad /9.7/$$

При совместном решении приведенных выражений получим следующую формулу для определения M_c по значению статического усилия F :

$$M_c = Fl \frac{\cos \beta}{R \cos \gamma i \eta}. \quad /9.8/$$

В рассматриваемой конструкции сталкивателя

$$\cos \beta \approx \cos \gamma. \quad /9.9/$$

Угол φ и угол α поворота кривошипа редуктора связаны между собой соотношением

$$\cos \varphi = \sin \alpha \left(\sqrt{1 - \frac{r^2}{\rho^2} \sin^2 \alpha} - \frac{r}{\rho} \cos \alpha \right). \quad /9.10/$$

Величина $\frac{r}{\rho} = k$, для кривошипных механизмов рычажных сталкивателей достаточно мала ($k, < 0,2$), поэтому $\frac{r^2}{\rho^2} \sin^2 \alpha \ll 1$, что позволяет упростить выражение /9.10/ и представить его в виде

$$\cos \varphi \approx \sin \alpha (1 - k_1 \cos \alpha). \quad /9.11/$$

С учетом /9.9/ и /9.11/ формулу /9.8/ запишем в окончательном виде так:

$$M_c = Fl \frac{r}{R} \frac{1}{i\eta} \sin \alpha (1 - k_1 \cos \alpha). \quad /9.12/$$

Числовые значения M_c в период сталкивания для рассматриваемого примера рассчитываются следующим образом:

$$M_c = 2305 \cdot 1,5 \frac{0,25}{0,5} \frac{1}{10,2 \cdot 0,85} \sin \alpha \left(1 - \frac{0,25}{1,5} \cos \alpha \right) = 50,6 \sin \alpha (1 - 0,167 \cos \alpha). \quad /9.13/$$

При возврате штанг $\alpha = 180 \dots 360^\circ$ усилие, действующее на сталкиватель, уменьшается и составляет

$$F = 9,81 \cdot 0,6 \text{ кт}_w \mu = 9,81 \cdot 0,6 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 0,5 = 1471,5 \text{ Н.}$$

В соответствии с этим для периода возврата штанг числовые значения M_c будут такими:

$$M_c = 1471,5 \cdot 1,5 \frac{0,25}{0,5} \frac{1}{10,2 \cdot 0,85} \sin \alpha \left(1 - \frac{0,25}{1,5} \cos \alpha \right) = 32,4 \sin \alpha (1 - 0,167 \cos \alpha).$$

В табл.9.2 приведены результаты расчетов M_c для различных значений α , а на рис.9.8 показана нагрузочная диаграмма $M_c = f(\alpha)$.

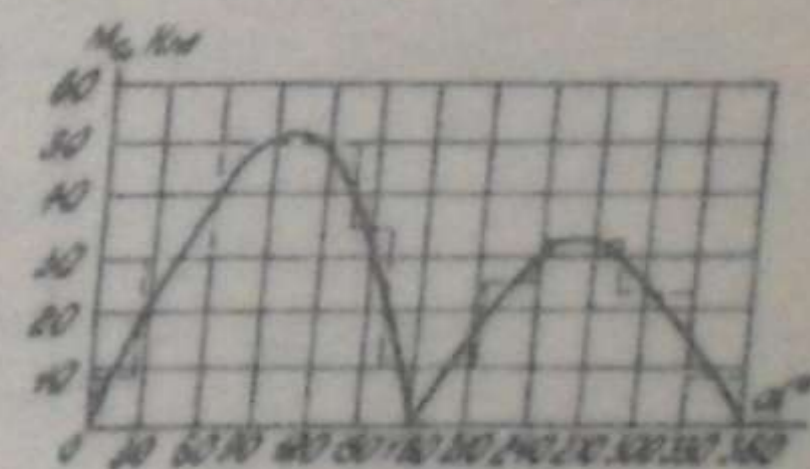


Рис.9.8. Изменение статической нагрузки на валу кривошипа рычажного сталкивателя

Таблица 9.2

Статическая нагрузка рычажного сталкивателя

| α, \dots | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | 360 |
|--------------------|---|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|
| $M_c, \text{ Н·м}$ | 0 | 21,6 | 40,0 | 50,7 | 47,6 | 28,9 | 0 | 16,4 | 30,4 | 32,4 | 25,5 | 13,8 | 0 |

9.4.3. Расчет тахограммы работы электропривода

Время соответственно разгона и торможения электропривода:

$$t_n = \frac{J_2 \omega_n}{M_n - M_c'}, \quad /9.14/$$

$$t_T = \frac{J_1 \omega_n}{M_T + M_c''}, \quad /9.15/$$

где M_n - средний пусковой момент, равный $1,75 M_n = 132 \text{ Н}\cdot\text{м}$; M_T - средний тормозной момент, создаваемый механическим тормозом $/M_T = M_n = 75,5 \text{ Н}\cdot\text{м}/$; M_c' , M_c'' - средние значения статического момента соответственно при пуске и торможении, определяемые из диаграммы $M_c = f(\alpha)$.

Угол поворота кривошипа редуктора при пуске (α_T) и торможении

$$\alpha = \frac{90 \omega_n t}{\pi i}, \quad /9.16/$$

а путь и время работы с установившейся скоростью:

$$\alpha_y = 360 - (\alpha_n + \alpha_T); \quad /9.17/$$

$$t_y = \frac{\alpha_y i \pi}{180 \omega_n}. \quad /9.18/$$

Результаты расчета тахограммы работы электропривода сталкивателя сведены в табл.9.3.

Таблица 9.3

Расчетные значения параметров тахограммы работ электропривода сталкивателя

| Режим работы | $M_c, \text{ Н}\cdot\text{м}$ | α, \dots° | $t, \text{ с}$ |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------|
| Разгон | $M_c = 8,83$ | $\alpha_n = 25$ | $t_n = 0,36$ |
| Установившееся движение | По диаграмме $M_c = f(\alpha)$ | $\alpha_y = 302$ | $t_y = 2,14$ |
| Торможение | $M_c = 7,85$ | $\alpha_T = 33$ | $t_T = 0,48$ |

Суммарное время включения электродвигателя

$$t_{вкл} = t_n + t_y = 0,36 + 2,14 = 2,5 \text{ с.}$$

Продолжительность цикла работы электропривода при 300 включениях в час

$$t_ч = \frac{3600}{Z} = \frac{3600}{300} = 12 \text{ с.}$$

Фактическая относительная продолжительность включения

$$\epsilon = \frac{t_{вкл}}{t_ч} = \frac{2,5}{12} = 0,208.$$

9.4.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

На рис.9.9 изображена нагрузочная диаграмма электропривода $M = f(t)$, построенная по диаграмме $M_c = f(\alpha)$ /см. рис.9.8/. Эквивалентный момент электродвигателя при $\epsilon = 0,208$, рассчитанный по этой диаграмме с учетом коэффициента ухудшения вентиляции при разгоне $\alpha = 0,75$, составляет $M_E = 60,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Пересчет на каталожное значение $\epsilon_K = 0,25$ дает

$$M_{EK} = M_E \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_K}} = 60,3 \sqrt{\frac{0,208}{0,25}} = 55,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Загрузка электродвигателя по моменту составляет

$$\frac{M_{EK}}{M_n} = \frac{55,1}{75,5} = 0,73.$$

9.5. Пример расчета мощности электродвигателя сбрасывателя пакетов на распределительный конвейер

9.5.1. Исходные данные

Механизм предназначен для сбрасывания пакетов жести на распределительный конвейер. За один рабочий цикл кривошип сбрасывателя делает I оборот, причем за это время производится два включения электродвигателя /при подъеме и при опускании рамы сбрасывателя/.

Число включений в час $Z = 400$; максимальная масса сбрасываемого пакета $m_{ca} = 45$ кг; масса рамы сбрасывателя с роликами $m_p = 230$ кг; угол подъема рамы сбрасывателя $\alpha = 10^\circ 30'$; диаметр цапф рамы $d_1 = 65$ мм; радиус кривошипа $r = 60$ мм; диаметр цапф кривошипа $d_2 = 40$ мм; передаточное число редуктора $i = 18$; КПД редуктора $\eta_p = 0,8$; коэффициент трения в цапфах кривошипа и в цапфах рамы $\mu_1 = \mu_2 = 0,1$.

Предварительно выбирается электродвигатель переменного тока закрытого исполнения с короткозамкнутым ротором, имеющий следующие данные: $P_H = 5$ кВт при $\cos \varphi = 25\%$; $U_H = 380$ В; $n_H = 905$ об/мин; $I = 13,6$ А; $\cos \varphi_H = 0,765$; $M_H = 52,8$ Н·м; $M_H = 2,84 M_H = 150,1$ Н·м; $I_{пуск} = 4,4$, $I_H = 60$ А; $J_p = 0,1$ Н·м·с².

Суммарный маховой момент, приведенный к валу электродвигателя, $J = 0,225$ Н·м² / момент инерции поступательно движущихся частей механизма не учитывается вследствие его малости/.

9.5.2. Расчет моментов статических сопротивлений

Полный статический момент на валу электродвигателя

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3, \quad /9.19/$$

где M_1 - момент, необходимый для перемещения рамы сбрасывателя; M_2 , M_3 - момент трения в цапфах соответственно кривошипов редуктора и рамы.

Для рассматриваемого примера нет необходимости в строгом построения нагрузочной диаграммы в функции угла поворота кривошипа, так как статическая нагрузка на валу электропривода незначительна, а нагрев электродвигателя, в основном, определяется пусковыми токами при частых включениях механизма.

Максимальное значение статического момента M_{cmax} намного меньше пускового момента двигателя:

$$M_{cmax} = M_{1max} + M_2 + M_3; \quad /9.20/$$

$$M_{1max} = \frac{9,81(m_p + m_{ca})r}{2i\eta} = \frac{9,81(230 + 45) \cdot 0,06}{2 \cdot 18 \cdot 0,8} = 5,05 \text{ Н·м}; \quad /9.21/$$

$$M_2 = \frac{9,81(m_p + m_{ca})d_2}{2i\eta} \mu_2 = \frac{9,81(230 + 45) \cdot 0,04 \cdot 0,1}{2,18 \cdot 0,8 \cdot 2} = 0,19 \text{ Н·м} \quad /9.22/$$

$$M_3 = \frac{9,81(m_p + m_{ca})d_1}{2i\eta} \mu_1 = \frac{9,81 \cdot (230 + 45) \cdot 0,065 \cdot 0,1}{2 \cdot 18 \cdot 0,8 \cdot 2} = 0,3 \text{ Н·м} \quad /9.23/$$

$$M_{cmax} = 5,05 + 0,19 + 0,3 = 5,54 \text{ Н·м.}$$

Для дальнейших расчетов принимаем постоянное значение $M_c = 6$ Н·м, что значительно меньше значения пускового момента $M_H = 150,1$ Н·м.

9.5.3. Расчет тахограммы работы электропривода

Тахограмма работы электропривода сбрасывателя рассчитана так же, как и в примере подразд. 9.4. Тормозной момент $M_T = 2 M_H = 105,6$ Н·м, а средний пусковой момент $M_{п.ср} = 0,8 M_H = 120,1$ Н·м. Учтено, что при опускании рамы сбрасывателя изменяется направление действия момента статической нагрузки.

Результаты расчета сведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Параметры тахограммы работы сбрасывателя

| Движение рамы | Разгон | | Установившееся движение | | Торможение | |
|---------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| | $t_n, \text{с}$ | $\alpha_n, \text{град}$ | $t_y, \text{с}$ | $\alpha_y, \text{град}$ | $t_r, \text{с}$ | $\alpha_r, \text{град}$ |
| Подъем | $t_{n1} = 0,19$ | $\alpha_{n1} = 29$ | $t_{y1} = 0,41$ | $\alpha_{y1} = 122$ | $t_{r1} = 0,19$ | $\alpha_{r1} = 29$ |
| | $t_{n2} = 0,17$ | $\alpha_{n2} = 26$ | $t_{y2} = 0,41$ | $\alpha_{y2} = 122$ | $t_{r2} = 0,21$ | $\alpha_{r2} = 32$ |
| Опускание | $\Sigma t_n = 0,36$ | $\Sigma \alpha_n = 55$ | $\Sigma t_y = 0,82$ | $\Sigma \alpha_y = 244$ | $\Sigma t_r = 0,4$ | $\Sigma \alpha_r = 61$ |

Суммарное время включения электропривода

$$t_{вкл} = \Sigma t_n + \Sigma t_y = 0,36 + 0,82 = 1,18 \text{ с.}$$

Продолжительность цикла

$$t_H = \frac{3600}{Z/2} = \frac{3600}{200} = 18 \text{ с.}$$

Фактическая относительная продолжительность включения электропривода

$$\epsilon = \frac{t_{вкл}}{t_H} = \frac{1,18}{18} = 0,066.$$

9.5.4. Проверка мощности выбранного электродвигателя по нагреву

Предварительно выбранный электродвигатель проверяется по значению допустимых потерь путем определения возможного числа включений его в час при заданных значениях статической и динамической нагрузок /см. п.1.7.2/.

Допустимое число включений в час рассматривают по /1.79/.

Величины, входящие в /1.79/, имеют следующие числовые значения: коэффициент ухудшения вентиляции двигателя $\beta = 0,5$; коэффициент нагрузки электродвигателя по току $\chi \approx 0$ /статическая нагрузка электродвигателя очень мала/, коэффициент отношения постоянных потерь к переменным потерям при номинальной нагрузке $\alpha = 0,5$.

Потери в электродвигателе при номинальной относительной продолжительности включения и номинальной нагрузке будут

$$\Delta P_{EM} = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N I_N - P_N = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 13,6 \cdot 0,765 - 5000 = 1850 \text{ Вт.}$$

Электропривод не имеет электрического торможения, поэтому $\Delta A_T = 0$. Пренебрегая влиянием незначительной статической нагрузки на пусковые потери, определим ΔA_n , Вт·с:

$$\Delta A_n = A_0 \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = 2 \frac{\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right),$$

где r_1 - сопротивление обмотки статора; r_2' - приведенное сопротивление обмотки ротора. Для выбранного двигателя $r_1 = 1,11 \text{ Ом}$, $r_2' = 1,862 \text{ Ом}$;

$$\Delta A_n = 0,225 \frac{104,7^2}{2} \left(1 + \frac{1,11}{1,862}\right) \approx 1924 \text{ Вт·с.}$$

Здесь

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ 1/с.}$$

Как следует из табл.9.4, продолжительность пуска и торможения электродвигателя за одно включение $t_n + t_r = 0,38 \text{ с}$.

Допустимое число включений электродвигателя в час при этом

$$\xi = 3600 \cdot \frac{[(1-\beta)\epsilon + \beta] \epsilon_H - \frac{\alpha + \chi^2}{\alpha + 1} \epsilon}{\frac{\Delta A_n + \Delta A_T}{\Delta P_{EM}} - \left(\frac{\alpha + \chi^2}{\alpha + 1} - \frac{1-\beta}{2} \epsilon_H\right) (t_n + t_r)} =$$

$$= 3600 \frac{[(1-0,5)0,066 + 0,5]0,25 - \frac{0,5}{0,5+1} 0,066}{\frac{1924}{1850} - \left(\frac{0,5}{0,5+1} - \frac{1-0,5}{2} 0,25\right) 0,38} = 427,$$

что несколько больше фактического числа включений электродвигателя в час, равного 400.

10. НАМОТОЧНО-СВЕРТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

В современных прокатных станах применяются намоточно-свертывающие машины трех основных типов [7; 8]:

- 1/ барабанные моталки с намоточно-натяжными барабанами;
- 2/ роликовые моталки /свертывающие машины/;
- 3/ моталки для мелкосортного проката и проволоки.

Рассмотрим некоторые конструктивные особенности и расчеты мощности электродвигателей моталок первых двух типов.

Моталки для мелкосортного проката и проволоки не рассматриваются, так как электропривод этих машин весьма прост, а мощность электродвигателей обычно выбирается на основании практических данных по эксплуатации аналогичных установок.

10.1. Барабанные моталки

Применяются для сматывания в рулоны листов и ленты при холодной прокатке, горячей рулонной прокатке и при различных непрерывных технологических процессах обработки листов /например, на линиях непрерывного травления/.

На реверсивных одноклетовых станах холодной прокатки моталки устанавливаются по обе стороны рабочей клетки. На неререверсивных станах холодной прокатки устанавливается только одна моталка со стороны выхода металла. При наматывании /и сматывании в реверсивных станах/ полосы на барабан моталки происходит значительное ее натяжение, что снижает давление металла на валки прокатного стана, уменьшает коробчатость полосы, способствует правильному и плотному наматыванию металла на барабан моталки.

Скорость прокатки, а следовательно, и наматывания полосы на современных станах весьма велика и достигает 15 м/с для трехклетевых станов и до 35 м/с и выше - для пятиклетевых.

С целью повышения производительности и уменьшения отходов при прокатке стремятся к увеличению массы рулонов. На современных многоклетевых непрерывных станах холодной прокатки масса рулона составляет до 10 т и более на 1 м ширины полосы. Диаметр рулона D в основном, определяется толщиной h прокатываемой полосы:

$$D = /150 \dots 200/h \quad - \text{ для стальных полос и лент;}$$

$$D = /120 \dots 170/h \quad - \text{ для полос и лент из цветных металлов.}$$

Моталки современных станов холодной прокатки приводятся во вращение самостоятельными электродвигателями постоянного тока с регулируемой скоростью /диапазон регулирования 4:1/, что обеспечивает согласование скорости моталки и клетей стана, а также постоянство натяжения прокатываемой полосы. У реверсивных станов в периоды сматывания полосы с барабана моталка электродвигатель последней работает в генераторном режиме с рекуперацией энергии в сеть.

Режим работы электропривода моталки - длительный с практически постоянной нагрузкой. Поэтому мощность электродвигателя может быть определена следующим образом, кВт:

$$P = (M_{\text{нат}} - M_{\text{деф}} + M_{\text{тр}}) \frac{v \cdot 10^{-3}}{R \eta} \quad /10.1/$$

где $M_{\text{нат}}$ - момент, необходимый для создания натяжения сматываемой полосы, Н·м; $M_{\text{деф}}$ - момент, необходимый для пластического изгиба полосы при наматывании, Н·м; $M_{\text{тр}}$ - момент трения в подшипниках вала барабана моталки, Н·м; v - максимальная окружная скорость намотки, м/с; R - минимальный радиус бунта /радиус барабана/, м; η - КПД редуктора электропривода моталки.

Значения моментов, входящих в /10.1/, определяются так:

$$M_{\text{нат}} = TR \text{ [Н·м];} \quad /10.2/$$

$$T = \sigma F \text{ [Н],} \quad /10.3/$$

где T - усилие натяжения полосы, Н; $F = \sigma h$ - площадь сечения полосы, мм²; σ - напряжение в полосе при ее натяжении, Н/мм².

Значения напряжений в полосе при холодной прокатке приведены в табл. 10.1 / σ_s - предел текучести материала полосы, Н/мм² /.

Таблица 10.1

Напряжение σ при холодной прокатке

| Толщина прокатываемой полосы, мм | σ , Н/мм ² |
|----------------------------------|------------------------------|
| 0,3...1 | /0,5...0,8/ σ_s |
| 1...2 | /0,2...0,5/ σ_s |
| 2...4 | /0,1...0,2/ σ_s |

При намотке полосы на барабан образуется упругопластический изгиб. Однако зона упругой деформации невелика, поэтому можно приближенно принять, что он наблюдается по всей толщине полосы. Момент, необходимый для пластического изгиба, Н·м;

$$M_{\text{деф}} = \frac{A}{\varphi}, \quad /10.4/$$

где A - работа пластического изгиба, Н·м,

$$A = \frac{\sigma_s^2}{E} V = \frac{\sigma_s^2}{E} L \sigma h, \quad /10.5/$$

E - модуль упругости материала полосы, Н/мм²; V - объем наматываемого на барабан металла, м·мм²; L - длина полосы, м; σ - ширина полосы, мм; h - толщина полосы, мм; φ - угловой путь наматываемой полосы, рад.

$$\varphi = \omega t, \text{ где } \omega = \frac{v}{R} \text{ и } t = \frac{L}{v}.$$

Учитывая эти соотношения, имеем

$$\varphi = \frac{L}{R}. \quad /10.6/$$

Подставив в /10.4/ значение A из /10.5/ и φ из /10.6/, получим, Н·м:

$$M_{\text{деф}} = \frac{\sigma_s^2}{E} \sigma h R. \quad /10.7/$$

При практических расчетах часто принимают

$$M_{\text{деф}} \approx M_s = \sigma_s S \cdot 10^{-3} = \sigma_s \frac{\sigma h^2}{4} 10^{-3}, \quad /10.8/$$

где S - пластический момент сопротивления площади сечения полосы, мм³.

Суммарный момент трения в подшипниках вала барабана моталки, Н·м:

$$M_{тр} = \Sigma P \frac{d}{2} \mu, \quad /10.9/$$

где ΣP - суммарное усилие от массы барабана и массы максимального бунта, Н; d - диаметр цапф вала барабана, м; μ - коэффициент трения в подшипниках /для роликовых подшипников $\mu = 0,005/$.

Пример. Определить мощность электродвигателя моталки стана холодной прокатки, предназначенной для сматывания стальной полосы $1000 \times 0,8 \text{ мм}^2$ с максимальной скоростью 12 м/с . Параметры моталки следующие: $D = 0,2 \text{ м}$; $\eta = 0,9$; $d = 0,1 \text{ м}$; $\mu = 0,005$; $\Sigma P = 54,9 \text{ кН}$. Материал полосы имеет $\sigma_s = 250 \text{ Н/мм}^2$; $E = 2 \times 10^5 \text{ Н/мм}^2$. По приведенным формулам находим значения моментов, входящих в /10.1/, принимая, что напряжение в полосе $\sigma = 0,5 \sigma_s = 125 \text{ Н/мм}^2$ /табл.10.1/.

$$M_{нат} = TR = \sigma b h R = 125 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 0,1 = 10000 \text{ Н·м};$$

$$M_{деф} = \frac{\sigma_s^2}{E} b h R = \frac{250^2}{2 \cdot 10^5} \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 0,1 = 25 \text{ Н·м};$$

$$M_{тр} = \Sigma P \frac{d}{2} \mu = 54,9 \frac{0,1}{2} \cdot 0,005 \cdot 10^3 = 13,7 \text{ Н·м};$$

$$P = (\Sigma P_{нат} + M_{деф} + M_{тр}) \frac{v}{R \eta} \cdot 10^{-3} =$$

$$= /10000 + 25 + 13,7/ \frac{12 \cdot 10^{-3}}{0,1 \cdot 0,9} = 1339 \text{ кВт.}$$

Приведенный пример показывает, что почти вся мощность электродвигателя моталки расходуется на создание натяжения прокатываемой полосы. Поэтому приближенно можно определить мощность электродвигателя по усилию натяжения, кВт:

$$P = \frac{T v}{\eta} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma b h v \cdot 10^{-3}}{\eta} \quad /10.10/$$

Для указанных в примере данных мощность двигателя, определенная по /10.10/, будет

$$P = \frac{125 \cdot 1000 \cdot 0,8 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 1333 \text{ кВт.}$$

10.2. Роликовые моталки

Предназначены для свертывания в рулоны холодных и горячих полос толщиной до 6 мм, поэтому они называются также свертывающими машинами.

Эти машины устанавливаются у непрерывных тонколистовых станков и на линиях непрерывного травления полосы. Преимущество свертывающих машин перед наматывающими - зависимость скорости свертывания от диаметра рулона, что дает возможность задавать полосу в машину всегда с максимальной скоростью, доходящей до 10 м/с .

На рис.10.1 показана кинематическая схема трехроликовой свертывающей машины. Подающими роликами 1 полоса подается в гибочные ролики 2. Нижние гибочные ролики сближены с верхним настолько, чтобы можно было придать полосе необходимый радиус кривизны. Загнутый передний конец полосы выходит вверх; полоса свертывается в рулон на опорных роликах 3. Края рулона с торцов направляются боковым роликом /на рисунке не показаны/. По окончании свертывания с помощью пневматического устройства рулон сталкивается на примыкающий к машине рольганг.

Все ролики свертывающей машины - приводные от общего электродвигателя через комбинированный редуктор и универсальные шпиндели. Мощность этого электродвигателя, кВт:

$$P = [M_{деф} + TR + \Sigma P (f + \mu \frac{d}{2}) \frac{R}{R_1}] \frac{v \cdot 10^{-3}}{R \eta} \quad /10.11/$$

где $M_{деф}$, R , v , μ , d и η имеют тот же смысл, что и в формулах, приведенных в 10.1; R_1 - радиус подающих и гибочных роликов, м; f - коэффициент трения качения гибочных и подающих роликов по свертываемой полосе, в расчетах принимается $f = 0,0008 \text{ м}$; ΣP - суммарное давление полосы на гибочные и подающие ролики, Н; T - усилие, действующее вдоль полосы и зависящее от условий свертывания, Н.

При горячем свертывании, например, скорость полосы во избежание образования складок берется на $10...15\%$ больше скорости рольганга. Поэтому часть мощности привода свертывающей машины расходуется на преодоление сил трения о ролики рольганга. Наибольшая мощность расходуется на трение в начале процесса свертывания /при максимальной длине

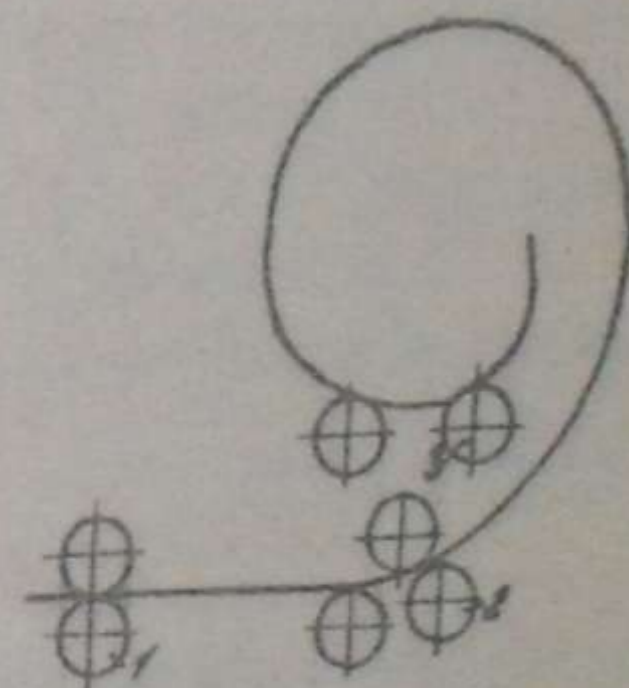


Рис.10.1. Кинематическая схема трехроликовой свертывающей машины: 1 - подающие ролики; 2 - гибочные ролики; 3 - опорные ролики

полосы, находящейся на рольганге/. При транспортировании тонких полос вследствие меньшей жесткости их полоса прогибается между роликами под действием собственной массы, что вызывает дополнительные затраты мощности.

Учитывая приведенные соображения,

$$T = 9,81 m \lambda,$$

/10.12/

где m - масса полосы, кг; λ - приведенный коэффициент сопротивления движению полосы по роликам рольганга.

Коэффициент λ учитывает расход энергии на трение скольжения по роликам и на перегибы полосы.

По опытным данным коэффициент λ имеет следующие значения в зависимости от толщины полосы:

| | | | |
|--------------------|------------|------------|-------------|
| Толщина полосы, мм | 2...3 | 4...5 | 6...8 |
| λ | 0,35...0,3 | 0,25...0,2 | 0,12...0,08 |

Суммарное давление ΣP должно иметь такое значение, чтобы создать силы трения, обеспечивающие требуемое усилие T и изгиб полосы при свертывании. С учетом двукратного запаса на пробуксовывание давление необходимо определять из условия

$$\Sigma P \mu_i \geq 2 \left(T + \frac{M_{деф}}{R} \right),$$

/10.13/

где μ_i - коэффициент трения полосы о ролики машины.

11. ПРАВИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

11.1. Классификация и основные параметры машин

Правильные машины предназначаются для придания прокату ровной и гладкой поверхности /для листов/ или правильной геометрической формы по длине /для сортовых профилей/ [6; 8].

В соответствии с этим правильные машины разделяют на две группы: листоправильные и сортоправильные.

Наибольшее распространение для правки листов получили многорольковые листоправильные машины с параллельным /рис.11.1,а/ или с наклонным /рис.11.1,б/ расположением роликов. На первых правят толстые /свыше 12 мм/ листы, а на вторых - тонкие. Если ролики расположены параллельно, то лист одинаково прогибается на всем пути своего движения; если наклонно, то наибольший прогиб наблюдается под первыми роликами. По мере продвижения листа прогиб его уменьшается, а у последних роликов кривизна полностью устраняется, что является преимуществом машин с наклонным расположением роликов.

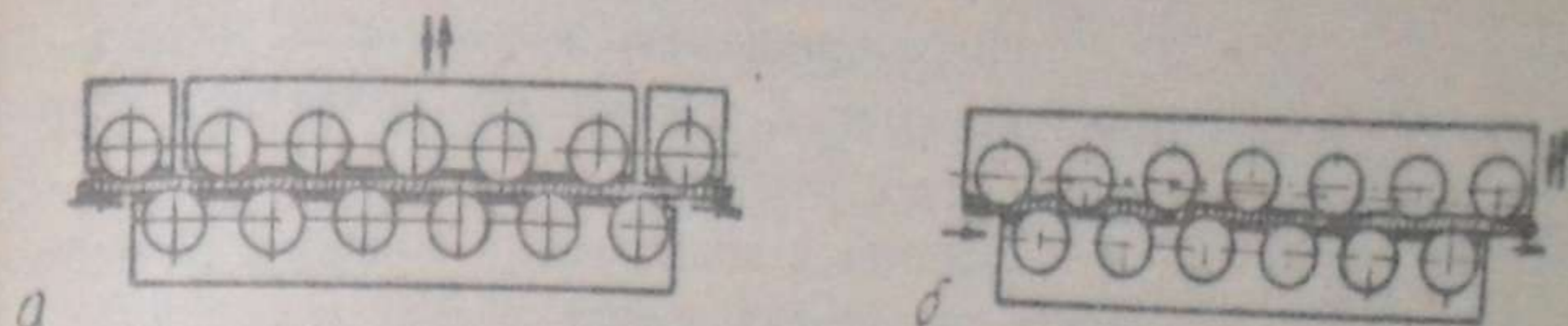


Рис.11.1. Листоправильная машина: а - с параллельным, б - с наклонным расположением роликов

Основные параметры многорольковых листоправильных машин: шаг роликов t , мм; диаметр роликов d , мм; длина бочки роликов L , мм; толщина листов, подвергаемых правке на данной машине δ , мм.

Шаг роликов определяет качество правки и давление на ролики правильной машины. Точность правки повышается с уменьшением шага роликов. Однако при этом одновременно повышается давление на ролики, что вынуждает усложнять конструкцию машины. Вопрос о теоретическом расчете оптимального шага роликов еще не разрешен. Поэтому шаг выбирается на основании практических данных в зависимости от сечения листов, подвергаемых правке.

Диаметр роликов обычно принимается $d \approx 0,9t$, а длина бочки роликов - в соответствии с шириной выпрямляемого листа.

Точность правки зависит также от количества роликов в машине, причем чем их больше, тем лучше качество правки. В табл.11.1 приведены основные параметры роликовых листоправильных машин.

Таблица 11.1

Основные параметры роликовых листоправильных машин

| Шаг роликов t , мм | Диаметр роликов d , мм | Толщина листа δ , мм | Количество роликов |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 30...50 | 25...45 | 0,25...1,5 | 17...19 |
| 65...130 | 60...120 | 0,6...8,0 | 11...17 |
| 160...400 | 150...370 | 3,0...40,0 | 7...11 |

Скорость правки выбирается в зависимости от требуемой производительности машин и обычно принимается в пределах 1...5 м/с.

Для уменьшения прогиба рабочих роликов небольшого диаметра и достижения таким образом большей точности правки применяют опорные хвостовые ролики, устанавливаемые в шахматном порядке по отношению к рабочим роликам /рис.11.2/.

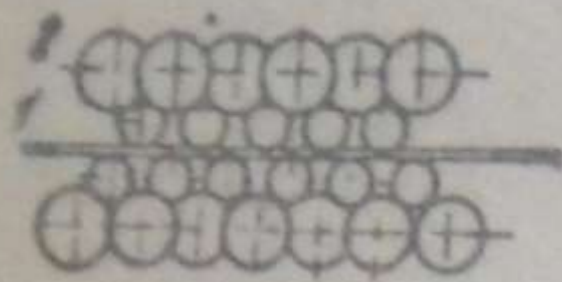


Рис. 11.2. Расположение холостых роликов в правильных машинах: 1 - рабочие ролики; 2 - опорные холостые ролики

Сортоправильные машины выполняются двух типов: а/ с консольными роликами; б/ с двухопорными роликами.

Машины с консольными роликами применяются только для правки мелких и средних профилей.

Основные параметры сортоправильных машин: шаг роликов t , мм; максимальная высота выпрямляемого профиля h , мм; момент сопротивления сечения профиля W , см³, и максимальная скорость правки v , м/с /табл. 11.2/

Основные параметры сортоправильных машин

Таблица 11.2

| Шаг роликов t , мм | Момент сопротивления выпрямляемого сечения W , см ³ | Максимальная высота выпрямляемого профиля h , мм | Максимальная скорость правки v , м/с |
|----------------------|--|--|--|
| 200 | 5 | | |
| 300 | 15 | 60 | 2,0 |
| 400 | 35 | 70 | 2,0 |
| 500 | 75 | 80 | 2,0 |
| 600 | 125 | 110 | 1,5 |
| 700 | 185 | 140 | 1,5 |
| 800 | 250 | 170 | 1,5 |
| 900 | 450 | 200 | 1,2 |
| 1100 | - | 230 | 1,2 |
| 1300 | - | 260 | 1,0 |
| | | 300 | 0,8 |

Количество роликов сортоправильных машин составляет 5... 9 при правке крупных сортов и 7... 13 при правке мелких и средних профилей.

11.2. Режим работы машин и системы электроприводов

Электропривод роликов правильных машин /главный привод/ работает в продолжительном режиме с постоянной нагрузкой. Темп подачи металла в правильную машину обычно весьма высок, и паузы в работе главного привода незначительны. Режим работы правильных машин нереверсивный, однако в схемах управления электроприводом роликов предусматривается возможность реверса, что необходимо при ревизиях машин или при ликвидации аварий.

Большинство роликовых правильных машин требует регулирования скорости правки с целью получения оптимального режима для различных сортов и сечений выпрямляемого металла. Диапазон регулирования определяется в каждом отдельном случае конкретными условиями работы правильной машины.

Наиболее рациональным оказывается регулирование скорости при постоянной мощности за счет изменения потока возбуждения. Для главного привода правильных машин используются электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения защищенного или закрытого исполнения с диапазоном регулирования скорости в пределах до 3:1 за счет ослабления магнитного потока.

В некоторых случаях, когда требуется большой диапазон регулирования, скорость правки регулируют изменением как потока возбуждения, так и напряжения на якоре электродвигателя /привод по системе "управляемый преобразователь - двигатель"/.

Для изменения расстояния между рабочими роликами в зависимости от толщины листа и кривизны его используют специальный механизм настройки, имеющий отдельный реверсивный электропривод, работающий кратковременно и не требующий регулирования скорости.

Для привода механизма настройки применяются короткозамкнутые асинхронные электродвигатели с повышенным пусковым моментом, что обусловлено большой статической нагрузкой при пуске и в зоне малых скоростей повышенного трения в червячных передачах механизма настройки.

Стрела прогиба роликов для улучшения качества правки коробоватых листов регулируется специальным механизмом прогиба с отдельным реверсивным электроприводом, также работающим кратковременно и не требующим регулирования скорости.

Для привода механизма прогиба роликов применяются асинхронные короткозамкнутые электродвигатели с повышенным скольжением, так как этот механизм работает на упор.

11.3. Расчет мощности электродвигателей

Мощность главного привода правильной машины, работающей в длительном режиме, кВт:

$$N = \frac{2M_c v}{d \eta} \cdot 10^{-3} \quad /11.1/$$

где M_c - максимальный суммарный статический момент нагрузки, Н·м;
 v - минимальная скорость правки, соответствующая номинальной скорости электродвигателя, м/с; d - диаметр рабочих роликов машины, м;
 η - КПД передач /среднее значение $\eta = 0,9$ /.

Как видно из /11.1/, расчет мощности электродвигателя сводится к определению момента статической нагрузки M_c , который для роликовых правильных машин представляет собой сумму трех моментов:

$$M_c = M_{тр1} + M_{тр2} + M_{деф} \quad /11.2/$$

где $M_{тр1}$ - момент, необходимый для преодоления сил трения при скольжении и качении роликов по полосе; $M_{тр2}$ - момент, необходимый для преодоления сил трения в подшипниках роликов; $M_{деф}$ - момент, необходимый для пластической и упругой деформации выпрямляемой полосы.

Моменты $M_{тр1}$ и $M_{тр2}$, входящие в /11.2/, определяются следующим образом, Н·м:

$$M_{тр1} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i f_i \quad /11.3/$$

$$M_{тр2} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i \mu \frac{d_{ч}}{2} \quad /11.4/$$

где $\sum_{i=1}^{i=n} P_i$ - суммарное давление на все ролики правильной машины, Н;
 f - коэффициент трения качения роликов по полосе, учитывающий также наличие трения скольжения; при правке стальных листов $f = 0,0001$ м, при правке листов из меди и алюминия $f = 0,0002$ м^к; μ - коэффициент трения в подшипниках роликов; для подшипников скольжения $\mu = 0,06 \dots 0,1$; для шариковых подшипников $\mu = 0,003$; для роликовых подшипников $\mu = 0,005$; для игольчатых подшипников $\mu = 0,01$; $d_{ч}$ - средний диаметр цапф роликов /при наличии опорных роликов берется средний диаметр цапф опорных роликов/, м.

В настоящее время нет единой теории, объясняющей процесс правки. Существует несколько методов для определения момента упругопластической деформации и суммарного давления на ролики правильной машины.

Далее приводятся расчетные формулы для основных из применяемых методов расчета.

Метод А.И.Целикова. Давление на ролики правильной машины определяется так /индекс обозначает порядковый номер ролика/:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{2M_s}{t}; & P_2 &= \frac{6M_s}{t}; & P_3 &= \frac{8M_s}{t}; \\ P_n &= \frac{2M_w}{t}; & P_{n-1} &= \frac{6M_w}{t}; & P_{n-2} &= \frac{8M_w}{t} \end{aligned} \quad /11.5/$$

* А.И.Целиков предлагает принимать следующие значения: при правке листов $f = 0,0008$ м; при правке сортового проката $f = 0,0008 \dots 0,0012$ м.

где $M_s = \sigma_s S$ - момент пластического изгиба, Н·мм; $M_w = \sigma_s W$ - момент упругого изгиба, Н·мм; t - шаг роликов, мм; S - пластический момент сопротивления площади сечения, мм³; W - упругий момент сопротивления площади сечения, мм³; σ_s - предел текучести выправляемого металла, Н/мм².

На промежуточных роликах давление среднее между P_3 и P_{n-2} . Для прямоугольного сечения величины S и W , мм³, определяются так:

$$S = \frac{bh^2}{4} \quad /11.6/$$

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad /11.7/$$

где b и h - соответственно ширина и высота изгибаемого сечения, мм.

Соотношение $S:W$ для различных сечений сортового проката:

| | |
|----------------------------|-----------|
| Прямоугольник | 1,5 |
| Круг | 1,7 |
| Квадрат /по диагонали/ | 2,0 |
| Равносторонний треугольник | 2,37 |
| Угловое железо | 1,4...1,6 |
| Двутавровая балка /лежа/ | 1,5...1,6 |
| Швеллер /лежа/ | 1,1...1,2 |

Момент, необходимый для пластической деформации выправляемой полосы, Н·м:

$$M_{деф} = \frac{M_s d}{4R_{min}} \quad /11.8/$$

где d - диаметр роликов, м; $R_{min} = \frac{IE}{M_s}$ - минимальный радиус кривизны выправляемого металла, мм; $I = \frac{bh^3}{12}$ - момент инерции изгибаемого сечения, мм⁴; E - модуль упругости металла, Н/мм²; M_s - момент пластического изгиба, Н·мм.

Подставив в /11.8/ значения M_s и R_{min} после упрощений получим

$$M_{деф} = 0,75 \frac{\sigma_s^2 b h d}{4E} \quad /11.9/$$

Величины, входящие в /11.9/, имеют следующие единицы: σ_s - Н/мм²; b - мм; h - мм; d - м; E - Н/мм².

Метод А.А.Королева. Суммарное давление на ролики правильной машины, Н:

$$\sum P = \frac{\sigma_s b h^2}{t} \frac{2}{3} (2 + k_2) (n - 2) \quad /11.10/$$

где t - шаг роликов в правильной машине, мм; K_2 - максимальное значение степени пластической деформации сечения полосы под вторым роликом; для мягкой стали $K_2 = 0,7 \dots 0,85$; для твердой стали $K_2 = 0,6 \dots 0,7$; n - число роликов в правильной машине.

Момент, необходимый для упругопластической деформации выправляемой полосы, Н·м:

$$M_{деф} = a_{y-n} \frac{\sigma_s^2 \delta h d}{4E}, \quad /11.11/$$

где a_{y-n} - коэффициент упругопластической деформации

$$a_{y-n} = K_2^2 \left[\frac{1}{1-K_2} + K_2(n-3) + \frac{1}{6}(n-2) \right]. \quad /11.12/$$

В /11.11/ обозначения и единицы величин аналогичны /11.9/. Значения коэффициента a_{y-n} , рассчитанного по /11.12/, приведены в табл. 11.3.

Для углеродистых сталей и $n = 13 \dots 17$ коэффициент $a_{y-n} \approx \frac{n}{1,5}$, поэтому величину $M_{деф}$ для этого случая можно определять по приближенной формуле

$$M_{деф} = \frac{\sigma_s^2 \delta h d}{6E} n. \quad /11.13/$$

Метод ЦКБММ ЦНИИТмаш. Давление на ролики правильной машины, Н:

$$P_i = \frac{2(M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1})}{t}, \quad /11.14/$$

где t - шаг роликов, мм; M_i, M_{i-1} и M_{i+1} - изгибающие моменты, действующие на данный ролик и на два смежных ролика, Н·мм.

Изгибающие моменты, Н·мм:

$$M_i = \frac{\sigma_s \delta h^2}{4} (1 - 0,33 K_i^2), \quad /11.15/$$

где K_i - коэффициент, учитывающий степень пластической деформации:

а/ для второго ролика

$$K_2 = \frac{4\sigma_s}{Eh \left(\frac{1}{P_2} + \frac{1}{60h} \right)}; \quad /11.16/$$

б/ для остальных роликов

$$K_i = \frac{2\sigma_s}{Eh \left(\frac{1}{P_i} + \frac{1}{P_{i-1}} - \frac{3\sigma_s}{Eh} \right)}. \quad /11.17/$$

Таблица 11.3

Значения коэффициентов a_{y-n} при различном количестве роликов правильной машины

| K_2 | Количество роликов в машине | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 |
| 0,6 | 1,52 | 2,07 | 2,62 | 3,18 | 3,73 | 4,28 | 4,83 | 5,39 | 5,94 | 6,49 | 7,04 | 7,59 | 8,14 |
| 0,65 | 1,96 | 2,65 | 3,34 | 4,03 | 4,71 | 5,40 | 6,09 | 6,78 | 7,47 | 8,16 | 8,85 | 9,54 | 10,24 |
| 0,7 | 2,54 | 3,71 | 4,83 | 5,94 | 7,05 | 8,16 | 9,27 | 10,38 | 11,49 | 12,60 | 13,71 | 14,82 | 15,93 |
| 0,75 | 3,4 | 4,44 | 5,48 | 6,52 | 7,56 | 8,6 | 9,65 | 10,68 | 11,7 | 12,75 | 13,8 | 14,8 | 15,85 |
| 0,8 | 4,52 | 5,74 | 7,05 | 8,26 | 9,47 | 10,7 | 12,0 | 13,2 | 14,2 | 15,6 | 16,8 | 18,2 | 19,4 |
| 0,85 | 6,39 | 7,87 | 9,13 | 10,8 | 12,28 | 13,73 | 15,18 | 16,63 | 18,13 | 19,58 | 21,03 | 22,53 | 23,98 |

В приведенных соотношениях σ_s и E - соответственно предел текучести и модуль упругости выпрямляемого металла, Н/мм²; h - толщина выпрямляемого металла, мм; ρ_i - радиус кривизны металла, мм.

Для практических расчетов радиус кривизны металла под вторым роликом следует принимать в следующих пределах:

| | |
|----------------------------|-------------------|
| число роликов: 7 - 9 | $\rho_2 = 50h$; |
| 11 - 19 | $\rho_2 = 90h$; |
| 19 - 29 | $\rho_2 = 150h$. |

При правке алюминиевых листов рекомендуется принимать $\rho_2 = 40 \dots 50/h$ при любом количестве роликов в машине.

Радиус кривизны предпоследнего ролика, полагая, что он осуществляет только упругий изгиб металла, определяют по формуле

$$\rho_{n-1} = \frac{hE}{2\sigma_s} \quad /11.18/$$

По известной кривизне $\frac{1}{\rho_2}$ на втором ролике и $\frac{1}{\rho_{n-1}}$ на предпоследнем ролике строится график кривизны /рис.11.3/ для определения ее на всех промежуточных роликах.

Если в /11.17/ получится, что $\frac{3\sigma_s}{Ek} \geq \frac{1}{\rho_i}$, то коэффициент

$$k_i = \frac{\rho_i 2\sigma_s \rho_i}{Ek} \quad /11.19/$$

Момент, необходимый для деформации выпрямляемого металла, Н·м:

$$M_{деф} = \frac{6\sigma_s^2 bhd}{4E} \sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + 0,33k_i - 1 \right) \quad /11.20/$$

Метод А.И.Шейнмана и Л.А.Горнштейна. Момент, необходимый для пластической деформации выпрямляемого металла,

$$M_{деф} = \frac{6\sigma_s^2 bhd}{4E} \sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + k_i - 2 \right) \quad /11.21/$$

где k_i - коэффициент зоны упругой деформации. Авторы метода на основании некоторых допущений предлагают следующие формулы для приближенного определения суммы, входящей в правую часть /11.21/:

- 1/ для машин с параллельными рядами роликов:
а/ при волнистых листах

$$\sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + k_i - 2 \right) \approx 2,8n - 7; \quad /11.22/$$

- б/ при "коробоватых" листах

$$\sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + k_i - 2 \right) \approx 7n - 20; \quad /11.23/$$

- 2/ для машин с наклонным верхним рядом роликов
а/ при волнистых листах

$$\sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + k_i - 2 \right) \approx 1,2n + 0,6; \quad /11.24/$$

- б/ при "коробоватых" листах

$$\sum_{i=2}^{i=n-1} \left(\frac{1}{k_i} + k_i - 2 \right) \approx 3n. \quad /11.25/$$

Суммарное давление на ролики правильной машины определяется так же, как по методу А.А.Королева.

11.4. Пример расчета мощности главного электропривода листопрямительной машины

В табл.11.4 приведены результаты расчетов мощности главного электропривода листопрямительной машины с параллельными рядами роликов, имеющей следующие параметры: $n = 17$; $d = 90$ мм; $t = 100$ мм; $d_u = 54,6$ мм; $i = 2,35$; $\eta = 0,9$; подшипники игольчатые, все ролики приводные.

Таблица 11.4

Сравнительные результаты расчетов главного электропривода листопрямительной машины

| Метод расчета | Расчетные величины | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------|
| | $\Sigma P, 10^4$ Н | $M_{гр1},$ Н·м | $M_{гр2},$ Н·м | $M_{деф},$ Н·м | $M_c,$ Н·м | $N,$ кВт |
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| По А.И.Целикову | 300 | 300 | 817 | 69 | 1186 | 28,7 |
| По А.А.Королеву $k_2 = 0,7$ | 324 | 324 | 885 | 700 | 1909 | 46,2 |

Окончание табл. 11.4

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------|-----|-----|-----|------|------|-------|---|
| По ЦКСММ | | | | | | | |
| ЦНИИТМаш $P_2 = 30A$ | 335 | 335 | 915 | 3900 | 5150 | 124,5 | |
| По А.И.Шейману | | | | | | | |
| и Л.А.Герштейну | 324 | 325 | 885 | 3770 | 4979 | 120,0 | |

Машина предназначена для правки стальных волнистых листов со следующими данными: $\delta = 2500$ мм; $h = 4$ мм; $E = 22 \cdot 10^4$ Н/мм². Скорость правки $v = 1$ м/с. Значение коэффициентов трения принято $f = 0,0001$ м; $\mu = 0,01$.

Как видно из табл. 11.4, результаты, полученные при использовании различных методов расчета, весьма различаются. Поэтому при выборе мощности электродвигателя правильной машины желательно выполнить расчет, пользуясь несколькими методами. Кроме того, необходимо сравнить результаты расчета с фактической мощностью электродвигателей, установленных на аналогичных правильных машинах.

Список литературы

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
2. Зеленов А.Б., Карочкин А.В., Самчелев Ю.П., Школьников В.И. Автоматизированный электропривод и следящие системы. - Харьков: ХГУ, 1965. - 364 с.
3. Зеленов А.Б., Тертичников В.Н. О расчете допустимого числа выключений в час асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Тр. КИИ. - 1958. - Т. XII. - Вып. I. - С. 71-75.
4. Зеленов А.Б., Тертичников В.Г., Гулякин В.Г. Электропривод механизмов прокатных станков / Под ред. А.Б.Зеленова. - Харьков: Металлургия, 1963. - 344 с.
5. Зеленов А.Б. Расчет эквивалентной нагрузки позиционного электропривода упрощенным методом средних перемещений // Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1975. - Вып. 20. - С. 3-8.
6. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков. - М.: Металлургия, 1985. - 376 с.
7. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных станков. - М.: Металлургия, 1987. - 480 с.
8. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И.Целиков, П.И.Полукин, В.М.Требеник и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1988. - 680 с.

Оглавление

| | |
|---|-----|
| Введение | 3 |
| 1. Общие методы выбора мощности электропривода | 4 |
| 1.1. Постановка задачи выбора мощности электропривода | 7 |
| 1.2. Оптимальное передаточное число редуктора | 10 |
| 1.3. Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы | 13 |
| 1.4. Выбор мощности двигателя при перемежающихся режимах работы | 21 |
| 1.5. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы | 23 |
| 1.6. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременных режимах работы | 32 |
| 1.7. Выбор электродвигателя по допустимому числу выключений в час | 35 |
| 2. Специальные методы выбора мощности электропривода | 39 |
| 2.1. Определение времени движения электропривода при треугольной тахограмме | 44 |
| 2.2. Метод эквивалентных ускорений | 46 |
| 2.3. Метод средних перемещений | 53 |
| 2.4. Метод предельно допустимого времени работы механизма | 58 |
| 3. Нажимные устройства /механизмы для установки валков/ | 59 |
| 3.1. Классификация и кинематические схемы | 61 |
| 3.2. Режим работы | 62 |
| 3.3. Расчет моментов статических сопротивлений | 68 |
| 3.4. Расчет динамических моментов и ускорений | 71 |
| 3.5. Пример расчета мощности электродвигателей нажимного устройства с грузовым уравновешиванием | 73 |
| 4. Манипуляторы | 74 |
| 4.1. Классификация и кинематические схемы | 82 |
| 4.2. Режим работы | 84 |
| 4.3. Расчет моментов статических сопротивлений | 86 |
| 4.4. Расчет динамических моментов и ускорений | 91 |
| 4.5. Пример расчета мощности электродвигателей манипулятора обжимного прокатного стана | 93 |
| 5. Рольганги и станинные ролики | 94 |
| 5.1. Классификация и основные параметры рольгангов | 100 |
| 5.2. Режим работы электроприводов рольгангов | 105 |
| 5.3. Расчет моментов статических сопротивлений | |
| 5.4. Расчет динамических моментов и ускорений | |
| 5.5. Определение пути перемещения слитка по рабочим рольгангам | |
| 5.6. Пример расчета мощности электродвигателей группового электропривода рабочего рольганга чистовой клети крупно-сортиного стана 650 | |
| 5.7. Пример расчета мощности электродвигателей индивидуально-го электропривода рольганга за ножницами блеминга 850 | |
| 5.8. Станинные ролики | |

| | |
|--|-----|
| 6. Подъемно-качающиеся столы | |
| 6.1. Кинематические схемы и режим работы | 108 |
| 6.2. Соотношения между скоростями стола, рычагов и кривошипа | 109 |
| 6.3. Расчет моментов статических сопротивлений | 113 |
| 6.4. Расчет приведенного момента инерции на валу электродвигателя | |
| 6.5. Расчет тахограммы и нагрузочной диаграммы электропривода | 118 |
| 6.6. Пример расчета мощности электродвигателя подъемно-качающегося стола клетки трио среднелистового стана | 120 |
| 7. Ножницы | |
| 7.1. Классификация и кинематические схемы | 126 |
| 7.2. Расчет моментов статических сопротивлений для ножниц с параллельными ножами | 131 |
| 7.3. Выбор расчетного сортамента для ножниц с параллельными ножами | 136 |
| 7.4. Предварительный выбор электродвигателей для ножниц с параллельными ножами | 137 |
| 7.5. Пример расчета мощности электродвигателей ножниц с параллельными ножами | 150 |
| 7.6. Усилие резания и выбор электродвигателя для ножниц с наклонным ножом | 156 |
| 7.7. Требования, предъявляемые к электроприводу, и выбор электродвигателей для летучих ножниц | 157 |
| 8. Пилы | |
| 8.1. Классификация и кинематические схемы | 160 |
| 8.2. Выбор электродвигателей для салазковой пилы горячей резки | 162 |
| 9. Толкатели и сталкиватели | |
| 9.1. Классификация и кинематические схемы | 166 |
| 9.2. Пример расчета мощности электродвигателя реечного печного толкателя | 169 |
| 9.3. Пример расчета мощности электродвигателя фрикционного выталкивателя | 172 |
| 9.4. Пример расчета мощности электродвигателя рычажного сталкивателя | 175 |
| 9.5. Пример расчета мощности электродвигателя сбрасывателя пакетов на распределительный конвейер | |
| 10. Намотно-свертывающие машины | |
| 10.1. Барабанные моталки | |
| 10.2. Роликовые моталки | |
| 11. Правильные машины | |
| 11.1. Классификация и основные параметры машин | 188 |
| 11.2. Режим работы машин и системы электроприводов | 190 |
| 11.3. Расчет мощности электродвигателей | 191 |
| 11.4. Пример расчета мощности главного электропривода листодровильной машины | 197 |
| Список литературы | 198 |