



УДК 536.24

Е.А. Максимов, Е.П. Устиновский
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
г. Челябинск, Россия
E-mail: maksimov50@mail.ru
Дата поступления: 11.06.2017

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРАВКИ И МОЩНОСТИ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ЛИСТОВОЙ РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Аннотация

Уточнена методика расчета потребляемой мощности электродвигателя при правке толстых стальных листов, которая позволяют повысить точность расчетов мощности электродвигателя на 10-15% при проектировании агрегатов правки.

Приведена блок схема алгоритма расчета параметров правки и мощности электродвигателя, а также изгибающих моментов для РПМ. Приведен пример расчета потребляемой мощности электродвигателя для семироликовой РПМ, который составляет 200 кВт, для девятироликовой РПМ - 250 кВт, для одиннадцати роликовой - 281 кВт, для тринадцатирولیковой РПМ - 316 кВт, для семнадцати роликовой РПМ - 404 кВт.

Ключевые слова: правка толстых стальных листов, роликовая листовая правильная машина, расчет потребляемой мощности электродвигателя машины.

В настоящее время для расчетов мощности электродвигателя при проектировании правильных агрегатов пользуются известными методиками [1-8]. Анализ методов расчетов [1-8] показал, что при определении мощности электродвигателя РПМ не учитывается мощность, расходуемая на преодолении момента инерции. Кроме того, расчет мощность правки, затрачиваемая на изгиб листа, проводится без учета упрочнения листа при его выправлении роликами РПМ.

Целью работы является повышение точности расчетов параметров правки листового проката, а также уточнение методики расчета потребляемой мощности электродвигателя при проектировании агрегатов правки.

Правка листа с различной кривизной участков представляет собой знакопеременный перегиб, при этом наиболее интенсивный перегиб осуществляется на втором и третьем роликах, который затем постепенно уменьшается при продвижении листа через ролики машины.

Если лист, имеющий исходную кривизну $1/r_0$, будет изогнут роликом в противоположную сторону таким образом, чтобы под действием усилия правки он получил

кривизну $1/r_2$, то изменение кривизны будет равно $1/r = 1/r_0 + 1/r_2$. На основании о теоремы о разгрузке А.А. Ильшина после снятия нагрузки лист спружинивает на величину $1/r_{ПР}$ в сторону первоначальной кривизны

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_{ПР}}. \quad (1)$$

Суммарную кривизну листа после правки запишем в виде

$$\frac{1}{r_C} = \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_{ПР}}. \quad (2)$$

Принимая линейный закон изменения продольных напряжений по толщине листа (рисунок 1) деформацию листа при упруго-пластическом изгибе запишем в виде

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s Z}{E Z_0}, \quad (3)$$

где Z - расстояние от нейтральной линии сечения листа (0-X) до произвольного сечения по толщине;

Z_0 - граница зон упругой и пластической деформации по толщине листа при изгибе;

σ_s, E - предел текучести и модуль упругости материала листа.

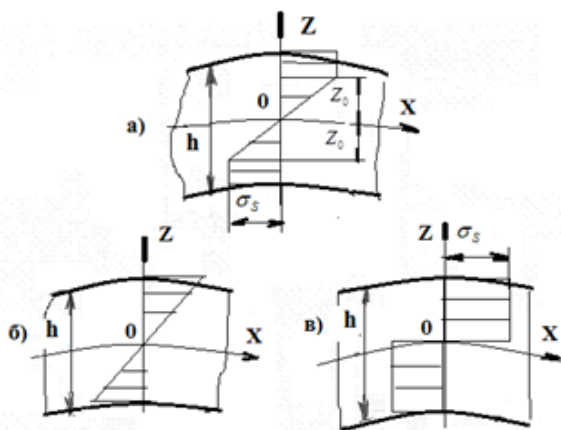


Рисунок 1. Распределение продольных напряжений по толщине полосы а – упругопластический изгиб, б – упругий изгиб, в – пластический изгиб (σ_s - предел текучести, h - толщина листа)

Коэффициент зоны упругой деформации по толщине листа запишем в виде

$$k = \frac{2Z_0}{h}, \quad (4)$$

где h - толщина листа.

Формула (4) позволяет описать пластическую деформацию $k = 0$, упругую деформацию $k = 1$ и упругопластическую деформацию $k \leq 1$.

С учетом зависимости (3) уравнение (4) примет вид

$$k = \frac{2\sigma_s}{Eh} \frac{1}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_2}}. \quad (5)$$

Если перегиб листа сопровождается только упругими деформациями, то кривизна пружения после снятия нагрузки восстанавливается до первоначальной

$$\frac{1}{r_{\text{ПР}}} = \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2}. \quad (6)$$

Для случая предельной упругой деформации ($k = 1$)

$$\frac{1}{r_{\text{УПР}}} = \frac{1}{r_{\text{ПР,НОМ}}} = \frac{2\sigma_s}{Eh}. \quad (7)$$

Относительную деформацию листа при перегибе запишем в виде

$$\Delta = \frac{1}{k} = \frac{Eh}{2\sigma_s} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_2}}{\frac{1}{r_{\text{ПР,НОМ}}}}. \quad (8)$$

После снятия нагрузки при пластической деформации ($\Delta \geq 1$) первоначальная кривизна не восстанавливается, то есть лист будет иметь остаточную кривизну. В этом случае максимальная величина пружения наблюдается при $\Delta \geq 3$

$$\frac{1}{r_{\text{ПР,МАС}}} = \frac{3\sigma_s}{Eh}. \quad (9)$$

Для упругопластического изгиба определим величину прогиба листа при выправлении под роликами РПМ

$$Z = C \frac{T^2}{r}. \quad (10)$$

где C - коэффициент, зависящий от места приложения нагрузки, $C = 0,5$;

T - шаг роликов.

Запишем уравнение (10) для максимальной величины упругого изгиба (начала пластической деформации)

$$Z_s = C \frac{T^2}{r_s}. \quad (11)$$

где $\frac{1}{r_s}$ - кривизна листа, соответствующая пластической деформации.

Подставляя (10) в (11), получим

$$Z_s = \frac{3\sigma_s}{Eh} C T^2. \quad (12)$$

Относительную величину прогиба листа под роликами РПМ запишем в виде

$$Z_s^* = \frac{Z}{Z_s} = \frac{\frac{1}{r}}{\frac{1}{r_s}} = \frac{1}{k}. \quad (13)$$

Решая уравнение (13) относительно величины « Z », получим

$$Z = \frac{1}{k} Z_s. \quad (14)$$

Для упругопластического изгиба при решении уравнения равновесия моментов внешних сил и моментов сил внутреннего сопротивления определим относительный изгибающий момент [10]:

$$m = \frac{M}{M_s} = 3 - k^2 + \eta \left(\frac{2}{k} - 3\psi + \psi^3 k^2 \right), \quad (15)$$

где $\psi = Z/Z_0$, $\eta = E^*/E$,

E - модуль упругости материала листа;
 E^* - модуль упрочнения листа при изгибе.

Подставляя (9) в (8), определим относительную деформацию листа для второго ролика

$$\Delta_2 = \frac{Eh}{2\sigma_s} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_{ПП.МАС}} \right) = \frac{Eh}{2\sigma_s r_0} + \frac{Eh}{2\sigma_s r_{ПП.МАС}}. \quad (16)$$

где $\sigma_s = \sigma_{s0} + E^*(\varepsilon - \varepsilon_s)$,

σ_{s0} - предел текучести материала листа в исходном состоянии,

E^* - модуль упрочнения листа при изгибе,

ε - деформация листа при изгибе.

ε_s - деформация листа, соответствующая пластическому изгибу.

Расчеты относительной деформации листа при изгибе по формулам (8), (9), (16) с учетом упрочнения листа позволяют повысить точность расчетов мощности электродвигателя на 10-15% при проектировании агрегатов правки.

Для того, чтобы выправить лист с различной кривизной, имеющий выпуклую и вогнутую форму, необходимо лист подвергнуть знакопеременному изгибу роликами РПМ.

Так как вторым роликом РПМ выправляется только выпуклая кривизна, то на выходе из второго ролика участки с вогнутой кривизной останутся без изменений. На третьем ролике РПМ выправляется вогнутая кривизна листа, оставшаяся после второго ролика. Таким образом, как выпуклая, так и вогнутая кривизна листа будут постепенно уменьшаться.

Для i - ролика относительную деформацию листа при перегибе под роликами РПМ запишем в виде

$$\Delta_i = \Delta_2 \left(1 - \frac{i-2}{n-3} \right), \quad (17)$$

где i - порядковый номер ролика,
 n - количество роликов в РПМ.

Суммарную относительную деформацию листа для всех роликов РПМ запишем в виде

$$\Delta_c = \sum_2^{n-1} W_i. \quad (18)$$

Изгибающий момент для всех роликов РПМ [2, 5] определим по формуле

$$M_{II} = \frac{\sigma_s^2 B h D_p}{4E} \Delta_c, \quad (19)$$

где D_p - диаметр бочек рабочих роликов;

B, h - ширина и толщина листа;

σ_s, E - предел текучести и модуль упругости материала листа.

Аналогичная зависимость получена А.А. Королевым [13]. Различие в формуле (19) и зависимости А.А. Королева заключается в определении коэффициента « Δ_c ».

Блок-схема алгоритма расчета параметров правки и мощности электродвигателя представлена на рисунке 2.

Расчет параметров правки и мощности электродвигателя проводится в следующей последовательности.

В соответствии с алгоритмом проводится варьирование коэффициентов зоны упругой деформации на втором и третьем роликах в реально возможных пределах.

Для ролика №2. На первом шаге алгоритма задаем величину коэффициента зоны упругой деформации на втором ролике k_2 . С учетом исходной кривизны листа $1/r_0$ определяем: величину настроечного изгиба ролика Z_2 и остаточную кривизну листа после правки $1/r_2$. Далее рассчитываем параметры: Δ_2, M_{II2}, P_2 .

Для ролика №3. На втором шаге алгоритма задаем величину коэффициента зоны упругой деформации на третьем ролике k_3 и определяем аналогичные параметры.

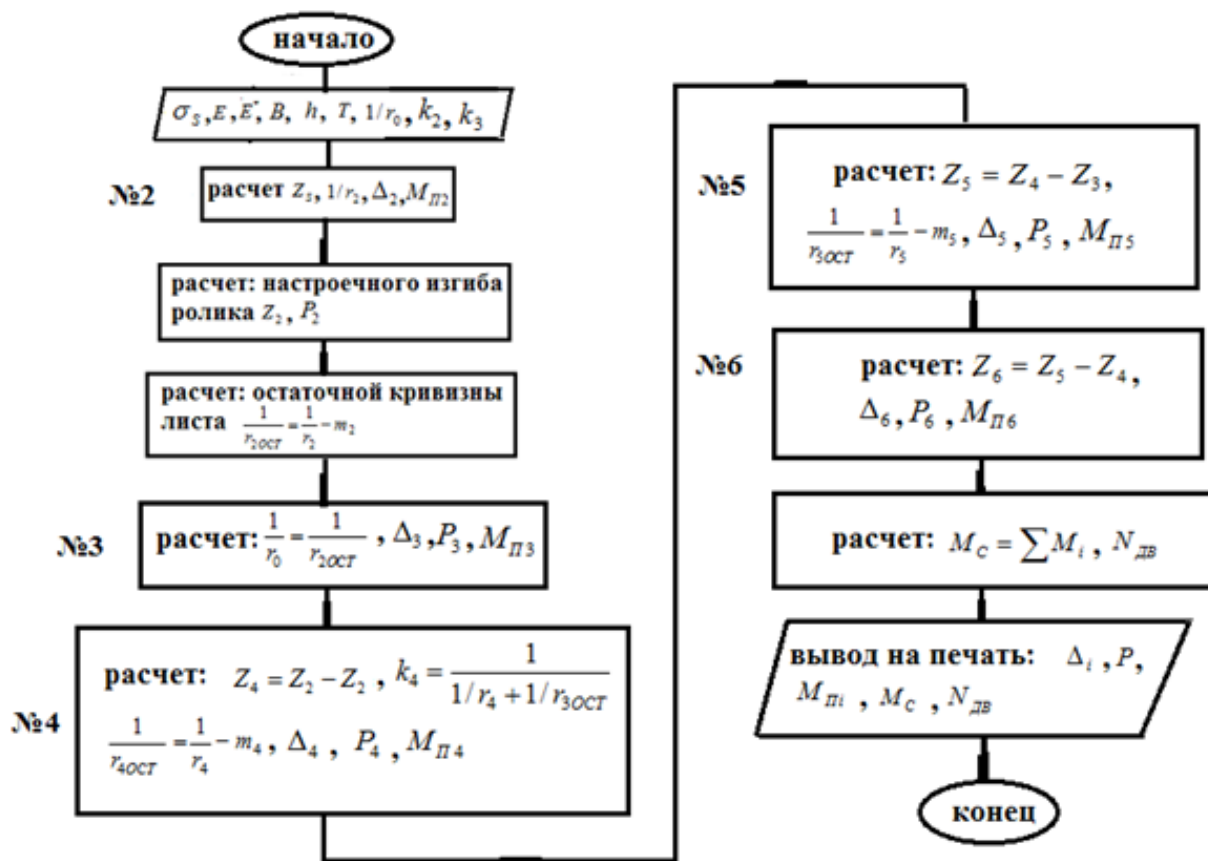


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета параметров правки и мощности электродвигателя

Для ролика №4. На третьем шаге алгоритма рассчитываем коэффициент зоны упругой деформации k_4 , величину настроечного изгиба ролика Z_4 и остаточную кривизну листа после правки $1/r_4$, а также параметры: $\Delta_2, M_{п2}, P_2$. При расчётах остаточная кривизна от третьего ролика является исходной для четвертого ролика. Величина настроечного изгиба для четвертого ролика определяется по ранее рассчитанным настройкам второго и третьего роликов и определяется $Z_4 = Z_3 - Z_2$.

Для ролика №5. На четвертом шаге алгоритма рассчитываем коэффициент зоны упругой деформации k_5 , величину настроечного изгиба ролика Z_5 и остаточную кривизну листа после правки $1/r_5$, а также параметры: $\Delta_5, M_{п5}, P_5$. Величина настроечного изгиба для пятого ролика определяется $Z_5 = Z_4 - Z_3$.

Для ролика №6. На пятом шаге алгоритма рассчитываем коэффициент зоны

упругой деформации k_6 , величину настроечного изгиба ролика Z_6 и остаточную кривизну листа после правки $1/r_5$, а также параметры: $\Delta_6, M_{п6}, P_6$. Величина настроечного изгиба для пятого ролика определяется $Z_6 = Z_5 - Z_4$.

По алгоритму рассчитываем суммарную величину изгибающий момент для всех роликов РПМ $M_c = \sum M_i$, а также потребляемую мощность электродвигателя $N_{дв}$.

Адекватность модели проверяли путем сравнения результатов расчета с данными промышленных экспериментов [5], разброс при этом не превышал 15%, что свидетельствует об адекватности предложенной модели и о возможности практического использования алгоритма и программы для расчетов параметров правки.

Номограмма расчета изгибающих моментов для РПМ представлена на рисунке 3.

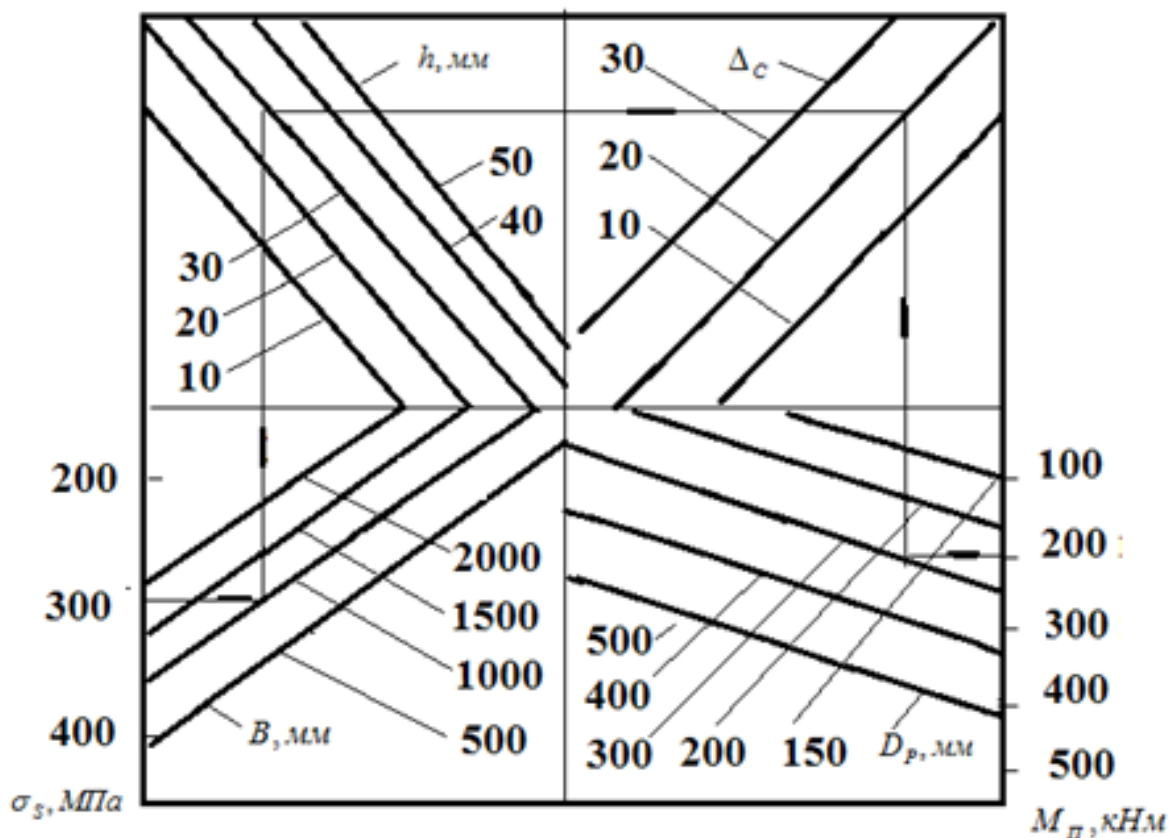


Рисунок 3. Номограмма расчета изгибающих моментов для РПМ

Направление расчета изгибающих моментов представлено стрелками. Например, для $\sigma_s = 300$ МПа, $B = 1500$ мм, $h = 30$ мм, $\Delta_c = 20$, $D_p = 300$ мм изгибающий момент равен $M_{II} = 200$ кНм.

При реверсивной работе РПМ потребляемую мощность электродвигателя [2, 9] определим по формуле

$$N_{дв} = N_{II} + N_{TK} + N_{ШО} + N_{дин}, \quad (20)$$

где N_{II} - мощность правки, затрачиваемая на изгиб листа;

N_{TK} - мощность, затрачиваемая на трение качения роликов по листу;

$N_{ШО}$ - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на шейках опорных роликов;

$N_{дин}$ - мощность, расходуемую на преодоление динамического момента.

Мощность правки, затрачиваемую на изгиб листа между роликами РПМ [2], запишем в виде

$$N_{II} = \frac{1}{\eta} \sum_2^{n-1} M_{II} \frac{V}{D_p}, \quad (21)$$

где V - скорость правки;

n - количество роликов правильной машины;

D_p - диаметр рабочего ролика;

M_{II} - суммарный изгибающий момент.

Для расчета мощности правки необходимо знать суммарную величину изгибающих моментов M_{II} для всех роликов РПМ.

Мощность, соответствующая трению качения роликов по листу [2] может быть записана в виде

$$N_{TK} = P_{\Sigma} f_{TK} \left(\frac{2V}{D_p} \right), \quad (22)$$

где f_1 - коэффициент трения качения в подшипниках роликов;

D_p - диаметр бочек рабочих роликов.

Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на шейках опорных роликов, имеющих диаметр D_o , запишем в виде [2]:

$$N_{ШО} = f_o \varphi P \frac{d_o}{2} \frac{2V}{D_o}, \quad (23)$$

где D_o - диаметр бочек опорных роликов,

P - усилие правки;

f_0 - коэффициент трения в подшипниках опорных роликов;
 d_o - диаметр цапф опорных роликов;

φ - коэффициент, показывающий, какую часть суммарного усилия правки воспринимают опорные ролики, $\varphi = 0,8$.

Схема главного привода семироликовой РПМ приведена на рисунке 4.

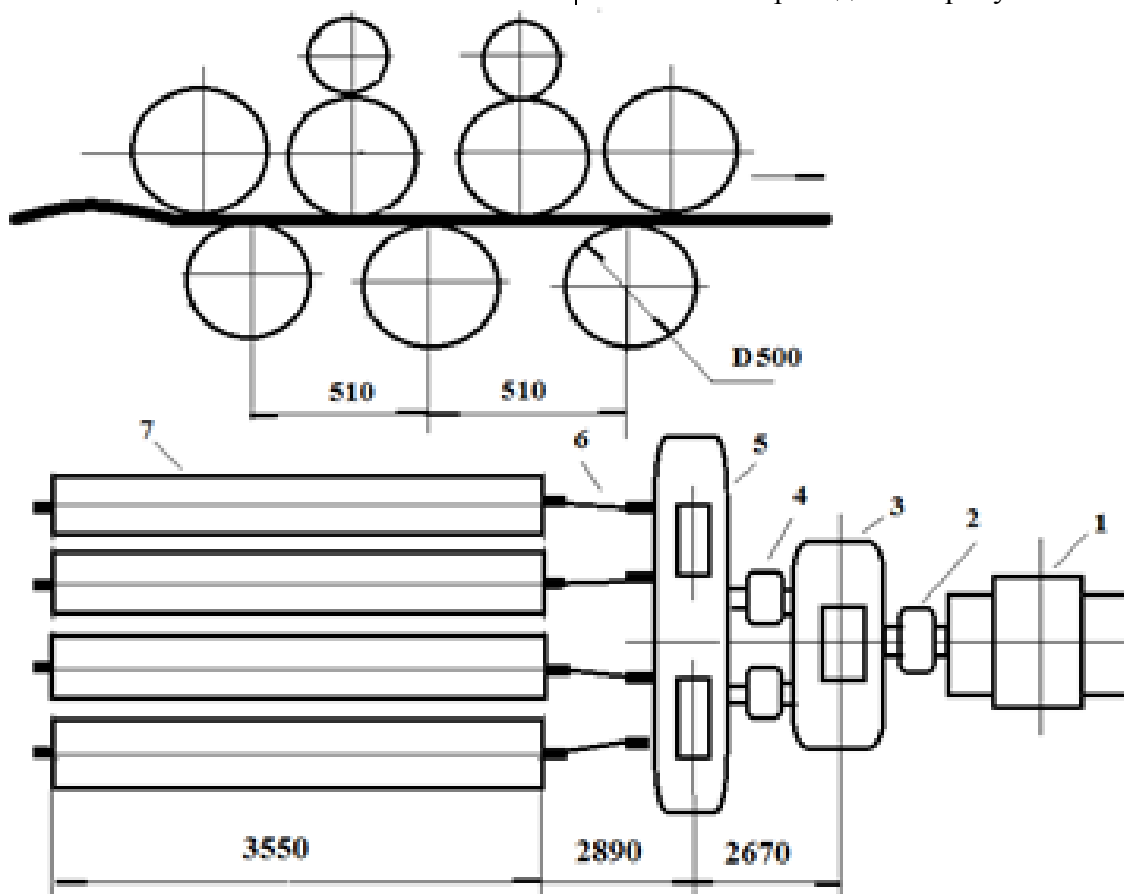


Рисунок 4. Схема главного привода семироликовой РПМ:

1- электродвигатель, 2- муфта, 3- редуктор, 4- муфта, 5- шестеренная клеть, 6- универсальные шпиндели, 7- рабочие ролики

Мощность [2], расходуемую на преодоление динамического момента, запишем в виде

$$N_{дин} = M_{дин} \omega, \quad (24)$$

где $\omega = 2\pi n$ - частота вращения электродвигателя.

Динамический момент [2] определим по формуле

$$M_{дин} = \sum \frac{mD_i^2}{4} \frac{d\omega}{dt}, \quad (25)$$

где $mD_i^2/4$ - маховый момент, приведенный к валу электродвигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение.

Для двухступенчатого редуктора приведенный к валу двигателя динамический момент запишем в виде

$$M_{дин} = \frac{1}{4} (mD_{я}^2 + mD_M^2) + \frac{mD_{p2}^2}{i_1^2} + (mD_{p3}^2 + mD_{ш}^2 + mD_{шp}^2 + mD_P^2) / i^2, \quad (26)$$

где $mD_{я}^2$ - маховый момент якоря электродвигателя;

mD_M^2 - маховый момент муфты и первого вала редуктора;

mD_{p2}^2 - маховый момент второго вала редуктора;

mD_{p3}^2 - маховый момент третьего вала редуктора;

$mD_{ш}^2$ - маховый момент шестеренной клетки;

$mD_{шп}^2$ - маховый момент шпинделей;

mD_p^2 - маховый момент рабочих роликов;

i - передаточное число для всего редуктора;

i_1 - передаточное число для первой ступени редуктора.

Для электродвигателя П112 при $n = 1500$ об/мин маховый момент составляет $\frac{1}{4}mD_{я}^2 = 225,6 Нм^2$, для муфты

упруго – пальцевой МУВП маховый момент составляет $\frac{1}{4}mD_M^2 = 36 Нм^2$, для двухступенчатого редуктора Ц2-750 момент составляет $mD_{р3}^2 = 23 кНм$, для главного привода РПМ динамический момент составляет $M_{дин} = 350 Нм$, мощность составляет $N_{дин} = 50 кВт$.

Расчет потребляемой мощности электродвигателя для семи- девяти-, одиннадцати-, семнадцати- роликовых правильных машин представлен в таблице 1.

Таблица 1

Расчет потребляемой мощности электродвигателя для семи- девяти-, одиннадцати-, семнадцати- роликовых РПМ

Завод	Ашинский МЗ	Алчевский МК	Кузнецкий МК	Красный октябрь	Донецкий МЗ
Количество роликов в РПМ	7	9	11	13	17
h , мм	6-30	до 20	до 20	5-25	5-20
B , мм	до 2650	1200-1800	до 1800	До 1800	1250-2200
D_p , мм	360	170	170	150	320
M_1 , Нм	13600	14000	16000	18000	23000
M_2 , Нм	36700	3800	43200	48600	62000
M_3 , Нм	9500	10000	11200	12600	16100
M_{II} , Нм	59820	62400	70400	79200	101000
N_{II} , кВт	200	250	281	316	404

Анализ данных, приведенных в таблице 1 показал, что для семироликовой РПМ потребляемой мощности электродвигателя составляет 200 кВт, для девяти роликовой РПМ потребляемой мощности электродвигателя составляет 250 кВт, для одиннадцати роликовой потребляемой мощности электродвигателя составляет 281 кВт, для тринадцати роликовой РПМ потребляемой мощности электродвигателя составляет 316 кВт, для семнадцати роликовой РПМ потребляемой мощности электродвигателя составляет 404 кВт.

Заключение

1. Уточнена методика расчета потребляемой мощности электродвигателя при правке толстых стальных листов, обеспечивающая повышение точности расчетов на 10-15% и выбор характеристики электродвигателя при проектировании агрегатов правки.

2. Приведена блок схема алгоритма расчета параметров правки и мощности электродвигателя, а также изгибающих моментов для РПМ. Из анализа данных моделирования следует, что применение алгоритма и математической модели позволяет

рассчитывать параметров правки с точность до 15%. Это позволяет рекомендовать данную модель и алгоритм для расчетов параметров правки при проектировании РПМ.

3. Приведен пример расчета потребляемой мощности электродвигателя для семироликовой РПМ, который составляет 200 кВт, для девятироликовой РПМ - 250 кВт, для одиннадцати роликовой – 281 кВт, для тринадцати роликовой РПМ - 316 кВт, для семнадцати роликовой РПМ - 404 кВт.

Библиографический список

1. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Степанов П.П. Современные технологии антикоррозийных покрытий металлопроката, трубопроводов и профилей. Челябинск. ЮУрГУ, 2015.- 333с.
2. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Литвинова Н.Н. Исследование усилия протягивания оцинкованных полос на правильной машине агрегата непрерывного горячего цинкования // Металлург. 2014. № 5. с.79-82.
3. Максимов Е.А. Шаталов Р.Л. О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката (Сообщение1) // Сталь. 2014. № 1. – С.49-51.
4. Максимов Е.А. Шаталов Р.Л. О настройке натяжных многороликовых устройств при обработке полосового проката (Сообщение 2) // Сталь .2014. № 5. С.53-57.
5. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. Аква-Пресс,- Екатеринбург: 2003. 256 с.
6. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков /А.А. Королев.- М : Металлургия , 1983. 371 с.
7. Слоним А.З. Машины для правки листового и сортового проката. М: Металлургия, 1987. 132 с.
8. Хольцмюллер Г. Комплексное определение параметров толстого листа // Черные металлы. 2007. № 6. с.58-62.
9. Мошнин Е.Н. Правка и гибка полос. М.: Машиностроение, 1987, –132 с.
10. Семенов Ю.Л. Машины для правки проката. – М.: Металлургиздат , 1961. –206 с.

Information about the paper in English

E.A. Maksimov, E.P. Ustinovsky
Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Education
“South Ural State University
(national research university)”
Chelyabinsk, Russian Federation
E-mail: maksimov50@mail.ru
Received 11.06.2017

METHOD FOR CALCULATING THE PROCESS PARAMETERS AND THE MAIN MOTOR POWER DRAW FOR A PLATE ROLLER LEVELER

Abstract

The authors offer an optimised method for calculating the power draw of an electric motor used in a plate leveler. The optimised method can provide a 10-15% improvement in the calculation accuracy when designing leveling machines.

The article includes a block diagram for calculated process parameters, motor power draw and bending moments for a roller leveler. An example is given of calculating the motor power draw for levelers with different number of rollers. The following values were obtained depending on the number of rollers: 7 rollers – 200 kW, 9 rollers – 250 kW, 11 rollers – 281 kW, 13 rollers – 316 kW, 17 rollers – 404 kW.

Keywords: plate leveling, roller plate leveler, motor power draw calculation.
