

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.982.47

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ НАТЯЖЕНИЙ ПОЛОСЫ И НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ИЗГИБО-РАСТЯЖНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНО-ТРАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): электропривод изгибо-растяжной машины (ИРМ) непрерывно-травильного агрегата выполнен многодвигательным с применением планетарных редукторов. Подобное исполнение приводов приводит к двум типам взаимосвязей между ними: через механическую часть – сложную цепь цилиндрических и планетарных редукторов, а также через технологический процесс – обрабатываемую полосу, находящуюся в состоянии упруго-пластической деформации. **Цель работы:** обеспечение безаварийной работы ИРМ за счет корректного задания установок моментов и скоростей электроприводов при различных сортаментах полосы. **Используемые методы:** сбор и обработка экспериментальных данных по распределению натяжения в ИРМ и смежных натяжных станциях путем осциллографирования моментов и скоростей электроприводов; математическое моделирование скоростных и силовых параметров на валах привода ИРМ. **Новизна:** заключается в разработке математического описания, устанавливающего взаимосвязь между моментами электроприводов изгибо-растяжной машины и натяжением полосы, создаваемым роликами натяжных станций. **Результат:** установлено, что благодаря планетарной передачи между вторым и третьим роликами ИРМ энергия заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через третий ролик превращается в переднее натяжение. В результате главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается приводом удлинения и задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. На основе анализа изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигателей главного привода и привода удлинения получены формулы для расчета натяжения полосы на участке ИРМ. Установлено, что натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения. **Практическая значимость:** полученные зависимости для расчета нагрузочных режимов позволяют скорректировать задания на скорости и моменты электроприводов таким образом, чтобы не допустить перегрузок привода удлинения и чрезмерных нагрузок на планетарную передачу, тем самым повысить ее ресурс и стабильность работы.

Ключевые слова: непрерывно-травильный агрегат, изгибо-растяжная машина, натяжение полосы, электропривод, математическая модель, привод удлинения, натяжная станция.

© Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., 2020

Для цитирования

Исследование взаимосвязи натяжений полосы и нагрузок электроприводов изгибо-растяжной машины непрерывно-травильного агрегата / Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 69–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

RESEARCH ON THE RELATIONS BETWEEN STRIP TENSION AND LOADS OF ELECTRIC DRIVES OF A TENSION LEVELLER ON A CONTINUOUS PICKLING LINE

Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khramshin T.R., Khramshin R.R.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance): The electric drive of the tension leveller (TL) of the continuous pickling line is multi-motor using planetary gears. Such a drive design leads to two types of relations between them: through a mechanical part - a complex chain of cylindrical and planetary gears, and also through a technological process - treated strips in a state of elastic-plastic deformation. **Objectives:** To ensure a trouble-free operation of TL by setting correct electric drive torques and speeds for a various product range of strips. **Methods Applied:** Experimental data on the distribution of strip tension in TL and adjacent tension stations were collected and processed by oscillography of drive torques and speeds; mathematical modeling of speed and power parameters on drive shafts of TL. **Originality:** It lies in the development of a mathematical description that establishes the relations between torques of the electric drives of TL and the strip tension created by rollers of the tension stations. **Findings:** It was found that due to the planetary gear between the second and third rollers of TL, energy of rear tension created by the elongation drive was transmitted forward by a mechanical transmission and converted into forward tension through the third roller. As a result, the main drive only adds front tension, but its main part is created by the elongation drive and rear tension mechanically transmitted forward. Based on the analysis of changes in the rear and front strip tension as a function of load of the main drive motors and the elongation drive, formulas are obtained for calculating the strip tension in the TL section. It was found that the load of the elongation drive directly determines the strip tension in front of TL. **Practical relevance:** The obtained dependences to calculate the load conditions make it possible to correct set values of speeds and torques of the TL electric drives to prevent elongation drive overloads and excessive loads on the planetary gear, thereby increasing its service life and stability.

Keywords: continuous pickling line, tension leveller, strip tension, electric drive, mathematical model, elongation drive, tension station.

For citation

Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khramshin T.R., Khramshin R.R. Research on the Relations Between Strip Tension and Loads of Electric Drives of a Tension Leveller on a Continuous Pickling Line. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 69–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78>

Введение

На непрерывно-травильном агрегате (НТА) осуществляются следующие технологические процессы: размотка полосы из рулонов, взрыхление окалины, собственно травление полосы, ее последующая промывка, сушка и намотка в рулоны. Изгибо-растяжная машина предназначена для правки профиля полосы и взрыхления окалины, возникающей на поверхности полосы после процесса горячей прокатки [2, 4, 5]. В настоящей работе исследуется ИРМ, разработанная и поставленная итальянской фирмой Techint для обработки полос широкого сортамента: толщиной полосы от 2 до 4 мм, шириной от 1250 до 1850 мм. Конструктивной особенностью исполнения механической части машины является применение трех планетарных редукторов в составе электроприводов натяжных станций (НС). Опыт эксплуатации показал, что в элементах

планетарных передач возникают чрезмерные усилия, приводящие к выходу их из строя [7, 12]. Стабильность работы изгибо-растяжной машины напрямую влияет на работу всего агрегата НТА [3, 6, 8, 1].

Целью настоящей статьи является обеспечение безаварийной работы ИРМ за счет корректного задания установок моментов и скоростей электроприводов при различных сортаментах полосы. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: вывод формул, связывающих моменты на валу электроприводов с натяжениями полосы до и после ИРМ (рис. 1), а также на входе в травильные ванны; анализ влияния моментов главного привода и привода удлинения на натяжения полосы; установление взаимосвязи между передним и задним натяжениями полосы; корректировка уставок задания приводов, недопускающая чрезмерных нагрузок на планетарные передачи.

Расчет моментов электроприводов в зависимости от натяжения полосы в ИРМ

В составе непрерывно-равильной линии следует выделить две группы электроприводов: электроприводы, регулирующие скорость полосы (в зарубежной литературе Speed Master – «ведущий по скорости») и электроприводы, регулирующие натяжение полосы. Электроприводы, регулирующие натяжение, составляют большую

часть. Поскольку прямое регулирование натяжения требует установки датчика натяжения, что не всегда возможно ввиду компактной конструкции агрегата, то на практике чаще применяется косвенный метод, при котором регулируют момент электропривода, величина которого пропорциональна натяжению.

Обозначение натяжений полосы, используемое фирмой Techint, показано на **рис. 2**.

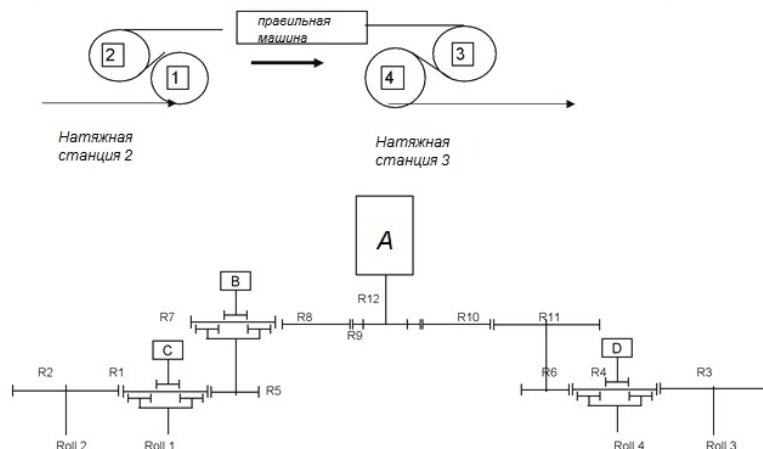


Рис. 1. Схема расположения зубчатых колес редукторов ИРМ: А – двигатель главного привода; В – двигатель привода удлинения; С – двигатель НС №2; D – двигатель НС №3; 1 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем С; 2 – ролик, который расположен на входе в ИРМ; 3 – ролик, расположенный на выходе из ИРМ; 4 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем D

Fig. 1. A layout diagram of gear wheels of gears on TL: A is a main drive motor; B is an elongation drive motor; C is a motor of tension station no. 2; D is a motor of tension station no. 3; 1 is a roller related to motor C via the planetary gear; 2 is a roller located on the section when the strip enters TL; 3 is a roller located on the section when the strip exits TL; 4 is a roller related to motor D via the planetary gear

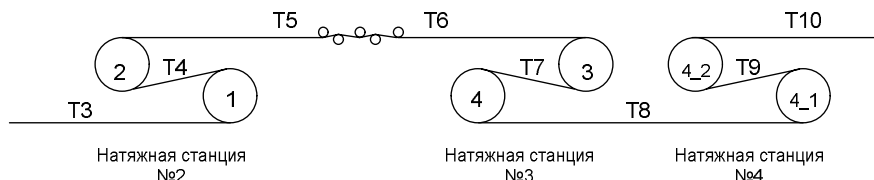


Рис. 2. Обозначение натяжений на участке натяжной станции (НС) №2-4: T3 – натяжение в полосе на выходе из накопителя; T4 – натяжение в полосе между роликами НС №2; T5 – натяжение на входе в ИРМ; T6 – натяжение на выходе из ИРМ; T7 – натяжение между роликами НС №3; T8 – натяжение между 3-й и 4-й натяжными станциями; T9 – натяжение между роликами НС №4; T10 – натяжение после НС №4 (на входе в ванны)

Fig. 2. Tension on the section of tension stations (TS) no. 2-4: T3 is strip tension when the strip exits the looper; T4 is strip tension between rollers of TS no. 2; T5 is tension when the strip enters TL; T6 is tension when the strip exits TL; T7 is tension between rollers of TS no. 3; T8 is tension between TS no. 3 and 4; T9 is tension between rollers of TS no. 4; T10 is tension after TS no. 4 (when the strip enters the baths)

Входной накопитель, НС №2 и привод удлинения своим суммарным действием задают заднее натяжение Т5 на входе в ИРМ. Главный электропривод, НС №3 и 4 вытягивают полосу из роликов ИРМ и обеспечивают требуемый уровень натяжения на входе в ванны. Согласно технологическому режиму, предложенному фирмой Techint, в ИРМ основной регулируемой координатой является не натяжение, а удлинение полосы. Это связано с тем фактом, что датчики скорости, которые необходимы для контроля удлинения, обладают более высокой надежностью, чем датчики натяжения. Информация о натяжении полосы в ИРМ очень важна, потому что при завышенных натяжениях происходит ускоренный износ и поломка механического оборудования. Ситуация осложняется также наличием нескольких планетарных передач и взаимосвязи через них электроприводов НС №2 и 3.

Натяжение полосы на выходе из ИРМ (переднее натяжение) складывается из натяжений, создаваемых натяжными станциями №3,4 и натяжения полосы на входе в ванны Т10:

$$T6 = T_{\Sigma НС3} + T_{\Sigma НС4} + T10. \quad (1)$$

Натяжение полосы на входе в ИРМ (заднее натяжение) складывается из натяжений, создаваемого натяжной станцией №2, и натяжения входного накопителя

$$T5 = T_{\Sigma НС2} + T3. \quad (2)$$

Согласно технической документации максимальное переднее натяжение составляет 600 кН, в то время как максимальное заднее натяжение только 300 кН. Очевидно, что разность между двумя натяжениями покрывается за счет пластической деформации полосы между роликами ИРМ.

Максимальное переднее натяжение в 2 раза больше заднего, в этой связи логичным является установка на выходе ИРМ двух натяжных станций НС №3 и 4, которые своими четырьмя роликами способны создать в два раза больше усилия, чем два ролика в составе натяжной станции №2, расположенной на входе в ИРМ.

Выясним, как распределены натяжения между двумя роликами в составе натяжной станции №4. Логичным было бы поделить суммарное усилие поровну, однако мощность двигателей, приводящих эти ролики, неодинакова, поэтому рационально распределить усилия между роликами пропорционально мощности двигателя.

На рис. 3 показаны графики зависимости натяжений от толщины полосы, создаваемые каждым роликом натяжной станции №4 и их суммарное натяжение. Была рассчитана доля натяжения, вносимого каждым роликом: для 1-го ролика – 0,64–0,62, для 2-го ролика – 0,35–0,37. Полученные данные полностью согласуются с распределением мощности двигателей НС №4, которое представлено в табл. 1, ролик 1–0,60, ролик 2–0,38. Таким образом, можно утверждать, что нагрузки натяжной станции №4 выбраны верно.

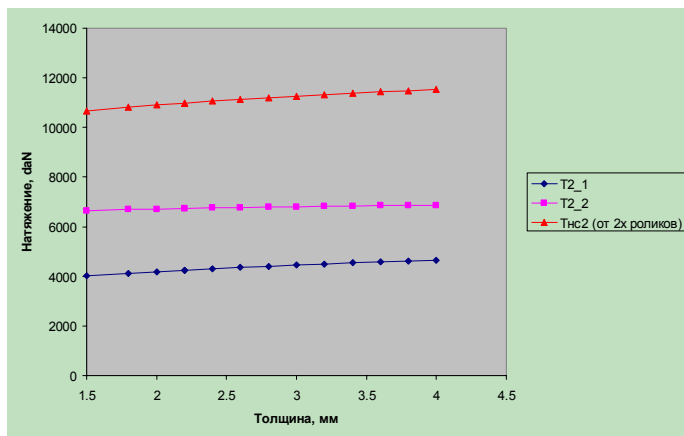


Рис. 3. Диаграмма натяжений полосы в НС №4 (ширина 1850 мм)

Fig. 3. Diagram of strip tension in TS no. 4 (width: 1850 mm)

Таблица 1. Данные по приводам НС №4
Table 1. Data on drives of TS no. 4

Параметр	Ролик 1	Ролик 2
Мощность двигателя	600 кВт	380 кВт
Передаточное число редуктора	20,3	20,3
Диаметр ролика	1250 мм	1250 мм

Проанализируем работы натяжной станции № 2. Согласно документации фирмы Techint задача этой натяжной станции состоит в создании заднего натяжения перед роликами ИРМ. Натяжную станцию №2 образуют два ролика – 1-й и 2-й (см. **рис. 2**). Очевидно, что распределение натяжений между ними также должно согласовываться с распределением мощностей приводных двигателей. Ситуация несколько осложняется тем, что механическая связь между роликами и двигателями осуществляется посредством двух планетарных передач.

Приведем уравнения, связывающие натяжения, создаваемые роликами, с моментами двигателей С и В – M_c и M_b (см. **рис. 2**).

$$T2_1 = M_c \cdot 147,965 / (D / 2); \quad (3)$$

$$T2_2 = (M_b - M_c \cdot 147,965 / 203,468) \cdot 184,191 / (D / 2) \quad (4)$$

где 147,965 – передаточное отношение между двигателем С и роликом 1; 203,468 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 1; 184,191 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 2 [1, **табл. 3**].

В **табл. 2** приведен расчет максимальных натяжений, создаваемых роликами 1 и 2 натяжной станции №2.

Таблица 2. Данные по приводам НС № 2 (максимальные натяжения)

Table 2. Data on drives of TS no. 2 (maximum tension)

Мощность двигателя В	180	кВт
Мощность двигателя С	60	кВт
Момент двигателя В	1 185,5	Н·м
Момент двигателя С	395,2	Н·м
Коэффициент загрузки В и С	100	%
Натяжение (ролик 1)	93,5	кН
Натяжение (ролик 2)	264,7	кН
Натяжение НС №2 (суммарное)	358,2	кН

Таким образом, соотношение между натяжениями первых двух роликов составляет $264,9:93,5=2,8$, что приблизительно равно соотношению мощностей двигателей $180:60=3$.

Суммарное натяжение НС №2 определится как

$$\begin{aligned} T_{НС2} &= T2_1 + T2_2 = \\ &= M_c \cdot 147,965 / (D / 2) + \\ &+ (M_b - M_c \cdot 147,965 / 203,468) \cdot 184,191 / (D / 2) = \\ &= (M_b \cdot 184,191 + M_c \cdot 14,01) / (D / 2) \end{aligned} \quad (5)$$

На основе формулы (5) был выполнен расчет, результаты которого приведены в **табл. 3**.

Таблица 3. Влияние момента двигателя С на суммарное натяжение НС №2

Table 3. Effect of torque of motor C on aggregate tension of TS no. 2

Коэффициент загрузки В	50%	50%	50%
Коэффициент загрузки С	50%	10%	-50%
Натяжение (ролик 1), кН	46,7	9,35	-46,7
Натяжение (ролик 2), кН	132,3	166,2	217,0
Натяжение НС №2 (суммарное), кН	179,1	175,6	170,2

Момент привода В был принят равным 50% от номинального значения и не менялся. Момент привода С изменялся в диапазоне от -50 до 50% от номинала. Как следует из **табл. 3**, суммарное натяжение при этом изменилось лишь на 5% с 179,1 кН до 170,2 кН. Объяснение этому заключается в следующем: изменение натяжения, создаваемое 1-м роликом компенсируется соответствующим изменением натяжения, создаваемым 2-м роликом, так, что их сумма приблизительно постоянна.

В технологической инструкции фирмы Techint предусмотрен специальный режим работы НС №2, связанный с прохождением сварного шва, групповым толчком и созданием предварительного натяжения перед запуском линии. В этом режиме привод удлинения переходит в регулирование момента, величина которого определяется исходя из следующих натяжений НС №2 на 1-м и 2-м роликах:

$$T2_1 = 2,0351 \cdot H^{-0,8462} \cdot H \cdot B, \quad (6)$$

$$T2_2 = 3,545 \cdot H^{-0,966} \cdot H \cdot B, \quad (7)$$

где H и B – толщина и ширина полосы соответственно.

На **рис. 4** показаны графики зависимости натяжений от толщины полосы для НС №2, причем согласно документации при прохождении сварного шва по натяжению должен быть дополнительно учтен понижающий коэффициент 0,2. Представленные графики построены без учета этого коэффициента.

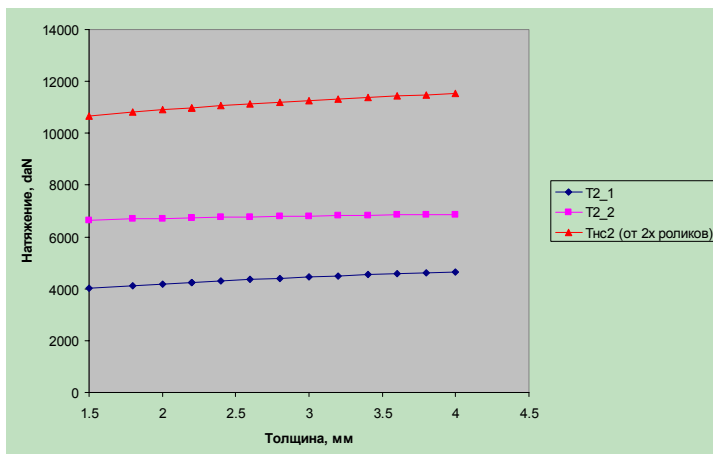


Рис. 4. Диаграмма натяжений полосы в HC №2 (ширина 1850 мм) (при пропуске сварного шва натяжения следует умножить на 0,2)

Fig. 4. Diagram of strip tension in TS no. 2 (width: 1850 mm) (during the passage of a welding joint, tension should be multiplied by 0.2)

Перейдем к анализу работы натяжной станции №3. Данные по приводам HC №3 представлены в **табл. 4**.

Таблица 4. Данные по приводам HC №3
Table 4. Data on drives of TS no. 3

Мощность двигателя А	1650	кВт
Мощность двигателя Д	70	кВт
Момент двигателя А	10866,8	Н·м
Момент двигателя Д	461,0	Н·м
Максимальное натяжение (ролик 4)	180,0	кН

Особенностью работы данной натяжной станции является механическая связь через планетарную передачу между двигателями А и В, а также А и Д.

Момент на валу двигателя А зависит от моментов на валу роликов 3 и 4 (см. **рис. 1**) и момента двигателя В:

$$Ma = \frac{M3}{18,683} + \frac{M4}{19,617} - \frac{Mb \cdot 170,777}{18,683}, \quad (8)$$

где 18,683 – передаточное отношение между двигателем А и роликом 3 (см. **табл. 1**);

19,617 – передаточное отношение между двигателем А и роликом 4, 170,77 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 3 [1, **табл. 3**]. Знак «-» перед моментом двигателя В обусловлен тем, что привод А работает в двигательном режиме (момент положителен), а при-

вод В – в генераторном режиме (момент отрицателен). Расчет натяжения полосы, создаваемого HC №3, в зависимости от нагрузок двигателей А и В приведен в **табл. 5**.

Таблица 5. Зависимость натяжения HC №3 от загрузки двигателей А и В (Полоса 2,2×1850 мм)

Table 5. Dependence of tension of TS no. 3 on load of motors A and B (strip dimensions: 2.2×1850 mm)

ka	kb	T3_4	T3_3	T _{исз} (от 2-х роликов)
		кН	кН	кН
10%	10%	111,5	53,7	165,2
10%	20%	111,5	86,1	197,6
10%	30%	111,5	118,5	230,0
10%	40%	111,5	150,9	262,3
10%	50%	111,5	183,2	294,7
20%	10%	111,5	86,2	197,7
20%	20%	111,5	118,6	230,1
20%	30%	111,5	151,0	262,4
20%	40%	111,5	183,3	294,8
20%	50%	111,5	215,7	327,2
30%	10%	111,5	118,7	230,2
30%	20%	111,5	151,1	262,5
30%	30%	111,5	183,4	294,9
30%	40%	111,5	215,8	327,3
30%	50%	111,5	248,2	359,7

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

– Натяжение, создаваемое двигателем Д, равно 111,5 кН и не зависит от режима работы двигателей А и В.

– Изменение нагрузки привода удлинения (двигатель В) напрямую связано с изменением натяжения, создаваемого 3-м роликом, например, при изменении коэффициента загрузки привода В kb от 10 до 50% натяжение увеличилось с 53,7 до 183,2 кН (для случая, когда привод А был нагружен на 10% от номинальной мощности). Аналогичное изменение переднего натяжения, создаваемого 3-м роликом, наблюдается и при других нагрузках привода А, например, если привод А загружен на 30%, то при изменении нагрузки привода В от 10 до 50% переднее натяжение изменяется от 118,7 до 248,2 кН.

Выясним, как при изменении заднего натяжения ИРМ меняется переднее натяжение.

Формулы для расчета заднего и переднего натяжений, создаваемых роликами № 1, 2, 3 и 4 ИРМ сведены в **табл. 6**.

Таблица 6. Расчет заднего и переднего натяжений ИРМ
Т а б л и ц а 6. Calculation of rear and forward tension of TL

$T_{HC2} = (Mb \cdot 184,191 + Mc \cdot 14,01) / (D / 2)$	(9)
$T_{HC3} = (Ma \cdot 18,683 + Mb \cdot 170,777) / (D / 2) + T3 \cdot 4 \cdot (1 - 18,683 / 19,617)$	(10)

Анализ формул из **табл. 6** показывает, что благодаря планетарной передаче между 2-м и 3-м роликами ИРМ 92% = 170,777 / 184,191 · 100% энергии заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через 3-й ролик превращается в переднее натяжение. Это объясняет, почему при изменении нагрузки привода удлинения нагрузка главного привода не меняется: главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. Одновременно с изменением заднего натяжения меняется и переднее, причём поскольку датчика натяжения прямого действия на ИРМ не установлено, то указанные изменения переднего натяжения невозможно зафиксировать.

При перегрузках привода удлинения, обусловленных некорректным ведением технологического процесса, нагрузка на планетарную передачу также значительно возрастает, поскольку

через нее передается энергия заднего натяжения, которое многократно вырастает. Очевидно, что подобная ситуация приводит к ускоренному износу и выходу из строя планетарной передачи.

Анализ изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигателей главного привода и привода удлинения

Выше была проанализирована работа каждой из трех натяжных станций № 2, 3 и 4 в отдельности. Дальнейший материал обобщает полученные выше результаты и дает общую картину распределения натяжений полосы в ИРМ.

Были выделены четыре участка, в которых рассчитывалось натяжение:

- натяжение Т3 полосы на выходе из накопителя;
- натяжение Т5 полосы на входе в ИРМ;
- натяжение Т6 полосы на выходе из ИРМ;
- натяжение Т10 полосы перед ваннами.

Натяжение полосы на выходе из накопителя и перед ваннами рассчитывалось по формулам фирмы Techint. Натяжение полосы перед ИРМ складывалось из натяжения в накопителе и натяжения от НС №2. Натяжение полосы после ИРМ складывалось из натяжения полосы перед ваннами, плюс натяжение полосы от НС №3 и 4.

Формулы для расчета натяжения полосы сведены в **табл. 7**.

Таблица 7. Формулы для расчета натяжения полосы на участке ИРМ
Т а б л и ц а 7. Formulas used to calculate strip tension on the TL section

$T3 = 2,6449 \cdot H^{-0,6405} \cdot H \cdot B$	(11)
$T10 = 1,111 \cdot H^{-0,0606} \cdot H \cdot B$	(12)
$T5 = T3 + T_{HC2} = T3 + (Mb \cdot 184,191 + Mc \cdot 14,01) / (D / 2)$	(13)
$T6 = T10 + T_{HC3} + T_{HC4} = T10 + (Ma \cdot 18,683 + Mb \cdot 170,777) / (D / 2) + T3 \cdot 4 \cdot (1 - 18,683 / 19,617) + T_{HC4}$	(14)

В **табл. 8** представлены результаты расчета натяжений для нескольких вариантов. Варьировалась нагрузка привода удлинения и главного привода, а также толщина полосы. Ширина принималась равной 1850 мм.

Таблица 8. Расчет натяжений полосы на участке ИРМ
Table 8. Calculation of strip tension on the TL section

Толщина, мм	2,2	2,2	2,2	2,2
Нагрузка главного привода	10%	20%	10%	20%
Нагрузка привода удлинения	20%	30%	40%	50%
Натяжение - входной накопитель, кН	64,9	64,9	64,9	64,9
Натяжение перед ИРМ, кН	134,8	169,7	204,6	239,6
Натяжение после ИРМ, кН	337,0	401,9	401,8	466,7
Натяжение перед ваннами, кН	43,1	43,1	43,1	43,1

Толщина, мм	4,0	4,0	4,0	4,0
Нагрузка главного привода	10%	20%	10%	20%
Нагрузка привода удлинения	20%	30%	40%	50%
Натяжение - входной накопитель, кН	80,5	80,5	80,5	80,5
Натяжение перед ИРМ, кН	150,3	185,3	220,2	255,1
Натяжение после ИРМ, кН	419,3	484,2	484,1	548,9
Натяжение перед ваннами, кН	75,6	75,6	75,6	75,6

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения, с увеличением нагрузки от 20 до 50% при толщине полосы 2,2 мм натяжение растет от 134,8 до 239,6 кН, при толщине полосы 4,0 мм – 150,3 до 255,1 кН, причем в обоих случаях изменение составляет 105 кН;
- при минимальных нагрузках главного привода и привода удлинения (10 и 20% соответственно) натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 2 раза больше, чем во входном накопителе, то есть натяжная станция №2 дополнительно создает такое же натяжение, как и во входном накопителе;
- при загрузке привода удлинения на 50% натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 4 раза больше, чем во входном накопителе;
- отношение между натяжениями полосы после и до ИРМ составляет порядка 2,0–2,5, то есть приблизительно половина переднего натяжения уравнивает заднее натяжение, а вторая по-

лови́на идет на пластическую деформацию изгиба полосы между роликами;

– сравнивая натяжение полосы после ИРМ с натяжением полосы на входе в ванны, следует отметить, что для тонких полос 2,2 мм их отношение достигает порядка 10, а для толстых полос 4,0 мм – порядка 7. Столь высокий порядок соотношения натяжений очевидно потребовал установки двух натяжных станций №3 и 4. Для сравнения – во входной части ИРМ данный показатель не превышает 4, поэтому достаточно одной натяжной станции №2.

Заключение

В результате анализа работы привода ИРМ получены зависимости переднего и заднего натяжений от моментов главного привода и привода удлинения. Установлено, что натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения, при его нагрузке на 50% натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 4 раза больше, чем во входном накопителе. Показано, что отношение между натяжениями полосы после и до ИРМ составляет порядка 2,0–2,5, причем половина переднего натяжения уравнивает заднее натяжение, а вторая половина идет на пластическую деформацию изгиба полосы между роликами. Благодаря планетарной передаче между 2-м и 3-м роликами ИРМ 92% энергии заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через 3-й ролик превращается в переднее натяжение. Таким образом, главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. Полученные зависимости для расчета нагрузочных режимов позволяют скорректировать задания на скорости и моменты электроприводов таким образом, чтобы не допустить перегрузок привода удлинения и чрезмерных нагрузок на планетарную передачу, тем самым повышается ресурс и стабильность ее работы.

Список литературы

1. Исследование привода изгибо-растяжной машины непрерывно-тривильного агрегата холодной прокатки / Г.П. Корнилов, А.М. Филатов, О.А. Филатова, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 71–79.
2. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжную окалиноматер непрерывно-тривильного агрегата / Д.В. Суфьянов, Н.Н. Огарков, Е.А. Мурзаева, В.В. Курбан, С.В. Денисов // Производство проката. 2012. №10. С. 31–34.
3. Оптимизация параметров настройки машины правки для эффективного разрушения окалины / В.Л. Корнилов, Г.А. Куницын, В.А. Дьяконов, А.П. Буданов, П.П. Полецков // Сталь. 2009. №10. С. 77–78.

4. Девятченко Л.Д., Маяченко Е.П. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. Steel in translation. 2013. Том 43. № 2. С.59–63.
5. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension Controllers for a Strip Tension Levelling Line. Advances in Systems, Control and Automation. 2018, pp 33–44.
6. Полецков П.П. Об изменении показателей профиля и плоскостности тонколистового проката в процессе правки растяжением с изгибом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3 (35). С. 60–62.
7. Исследование систем управления непрерывного стана на математической модели / И.А. Селиванов, В.М. Салганик, И.Г. Гун, О.И. Петухова, Ю.И. Мамлеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3 (35). С. 11–14.
8. Совершенствование модели настройки изгибно-растяжного окалиноломателя для автоматизированного проектирования скоростного режима непрерывно-равильного агрегата, совмещенного с прокатным станом / М.И. Румянцев, И.Д. Зелинов, И.О. Новицкий, Ю.А. Зелинова // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 122–130.
9. Magura D., Kyslan K., Padmanaban S., Fedák V. Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines. Energies 2019, 12, 3010.
10. Mathieu N., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveler. International Journal of Mechanical Sciences. Volume 122, March 2017, 267–276.
11. Zhang J., Zhou C.L., Li H.B., Zhang X. C. and Li M. Influence of Tension Leveling Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel Strip. JOM 69 (2017), 937–941.
12. Nigam, Aditya, Jain, Sandeep. Modelling and Structural Analysis of Planetary Geared Winch. Inter-national Journal of Science and Research (IJSR). Volume 4, January 2015, 330–333.

References

1. Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khrashin T.R., Khrashin R.R. Studying drives of the tension leveler on the continuous pickling line of the cold rolling mill. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol.18, no. 1, pp. 71–79. (In Russ.)
2. Sufianov D.V., Ogarkov N.N., Murzaeva E.A., Kurban V.V., Denisov S.V. Theoretical research on hot rolled strips passing through a tension-bending scale breaker of a continuous pickling line. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2012, no. 10, pp. 31–34. (In Russ.)
3. Kornilov V.L., Kunitsyn G.A., Dyakonov V.A., Budanov A.P., Poletskov P.P. Optimizing settings parameters of the straightening machine for efficient scale breaking. *Stal* [Steel], 2009, no. 10, pp. 77–78. (In Russ.)
4. Devyatchenko L.D., Mayachenko E.P. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. Steel in Translation, 2013, volume 43, no. 2, pp. 59–63.
5. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension controllers for a strip tension levelling line. Advances in Systems, Control and Automation, 2018, pp. 33–44.
6. Poletskov P.P. On the change in profile and flatness of rolled sheets during flattening by tension and bending. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3 (35), pp. 60–62. (In Russ.)
7. Selivanov I.A., Salganik V.M., Gun I.G., Petukhova O.I., Mamleeva Yu.I. Research on control systems of a continuous rolling mill using a mathematical model. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 3 (35), pp. 11–14. (In Russ.)
8. Rumyantsev M.I., Zelinov I.D., Novitsky I.O., Zelinova Yu.A. Improving a model for setting the tension-bending scale breaker for a computer-aided design of speed of the continuous pickling line combined with the rolling mill. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Engineering Sciences – from Theory to Practice], 2015, no. 53, pp. 122–130. (In Russ.)
9. Magura D., Kyslan K., Padmanaban S., Fedák V. Distribution of the strip tensions with slip control in strip processing lines. *Energies*, 2019, 12, 3010.
10. Mathieu N., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveler. International Journal of Mechanical Sciences, volume 122, March 2017, 267–276.
11. Zhang J., Zhou C.L., Li H.B., Zhang X.C., Li M. Influence of tension leveling parameters on the microstructure and mechanical properties of steel strip. JOM 69 (2017), 937–941.
12. Nigam Aditya, Jain Sandeep. Modelling and structural analysis of planetary geared winch. International Journal of Science and Research (IJSR), volume 4, January 2015, 330–333.

Поступила 14.05.2020; принята к публикации 07.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 14/05/2020; revised 07/09/2020; published 25/09/2020

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Филатова Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: feleodor@mail.ru.

Филатов Анатолий Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: filam50@mail.ru.

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: timur.hramshin@mail.ru.

Храмшин Рифхат Рамазанович – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: hramshinrr@mail.ru.

Gennadiy P. Kornilov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: korn_mgn@mail.ru.

Olga A. Filatova – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: feleodor@mail.ru.

Anatoliy M. Filatov – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: filam50@mail.ru.

Timur R. Khramshin – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: timur.hramshin@mail.ru.

Rifkhat R. Khramshin – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: hramshinrr@mail.ru.