

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.74.047:62-83

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)Лукьянов С.И.<sup>1</sup>, Лукьянов Д.С.<sup>2</sup>, Логунова О.С.<sup>1</sup>, Никифоров Г.В.<sup>3</sup>, Красильников С.С.<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»<sup>2</sup>ООО «Компас Плюс»<sup>3</sup>ООО «Магнитогорскгазстрой»

## МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ НА МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОВОК

В работе представлены результаты исследования, направленные на решение проблемы рационального распределения электроприводов тянувших роликов вдоль технологической линии машины непрерывного литья заготовок и выбора минимального количества тянувших роликов на различных участках зоны вторичного охлаждения. Исследования включают: построение и ранжирование критериев для распределения приводных роликов вдоль технологической линии машины непрерывного литья заготовок; разработку методик и алгоритмов расчета требуемого распределения моментов нагрузки по тянувшим роликам и распределения электроприводов тянувших роликов вдоль зоны вторичного охлаждения в трех режимах работы электропривода тянуще-правильного устройства; удержание затравки в подготовительном к разливке режиме работы машины непрерывного литья заготовок; вытягивание затравки с головной частью слитка на начальной стадии разливки металла; вытягивание слитка в рабочем режиме разливки. Теоретические исследования проводились с использованием аналитических и численных методов решения алгебраических уравнений, методов структурного моделирования. Доказано, что за счет значительного сокращения количества тянувших роликов срок окупаемости замены на новых машинах непрерывного литья заготовок групповой схемы силового питания электродвигателей на индивидуальную уменьшается с 5,8–7,8 лет при традиционном распределении тянувших роликов вдоль зоны вторичного охлаждения до 2,8–3 лет при их рациональном распределении, рассчитанном по разработанным методикам. Результаты работы использованы при проектировании слябовой машины непрерывного литья заготовок криволинейного типа, предназначеннной для отливки широких заготовок до 2,5 м. По предложенной методике число электроприводов тянувших роликов сокращено до 56.

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок, электропривод, тянущий ролик, рациональное распределение, критерии распределения.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных тенденций в последние десятилетия развития черной металлургии в мире является производство слябовых заготовок на машинах непрерывной разливки стали. Конструкция машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) постоянно совершенствуется в направлении повышения качества макроструктуры отливаемых заготовок и производительности агрегатов [1–5] и, в частности, электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ) зоны вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ, реализующего собственно вытягивание слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО за счет приложения к слитку тянущих усилий, в значительной мере определяющей качество литьих заготовок [6–9].

При проектировании новых МНЛЗ сложилась концепция, основанная на мировом опыте непрерывной разливки стали, рассредоточения вдоль ЗВО большого числа (до 70) электроприводов тянувших роликов, что из-за высокой стоимости одного тиристорного преобразователя (ТП) является основной причиной применения на большинстве действующих МНЛЗ групповой схемы силового питания электродвигателей тянувших роликов от одного либо двух ТП [7, 10]. Однако экспериментальные исследования показали, что групповая схема силового питания электродвигателей тянувших роликов не позволяет ограничить растягивающие напряжения в затвердевающем слитке. Идеальным вариантом исполнения электропривода, обеспечивающим отливку заготовок высокого каче-

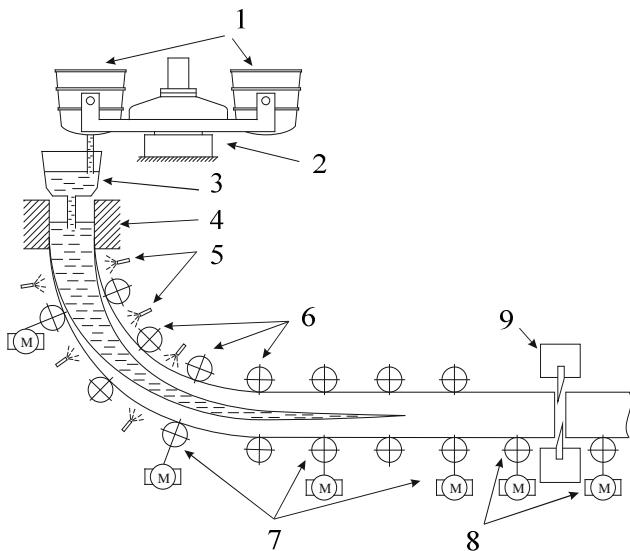
ства, является индивидуальная схема силового питания электродвигателей [10, 11].

Создание методики расчета числа приводных роликов и их рационального распределения вдоль технологического канала ЗВО позволит повысить качество заготовок за счет ограничения растягивающих продольных усилий в затвердевающем слитке средствами индивидуального электропривода тянувших роликов при одновременном сокращении их числа.

Целью исследования является повышение качества литьих заготовок за счет рационального распределения электроприводов тянувших роликов вдоль технологического канала ЗВО МНЛЗ и выбора минимального числа тянувших роликов на различных участках ЗВО и режимах работы МНЛЗ.

### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МНЛЗ КРИВОЛИНЕЙНОГО ТИПА И ИХ РОЛИКОВЫХ ПРОВОДОК

Типовая технологическая схема МНЛЗ криволинейного типа приведена на **рис. 1**. Согласно принятой технологии жидкую сталь от конвертера в ковшах 1 подают на сталеразливочный стенд 2 и далее через промежуточный ковш 3 в кристаллизатор 4, в котором выполняется первичное охлаждение жидкой стали и формирование по периметру корочки затвердевшего металла. Заготовка проходит зону вторичного охлаждения в составе форсунок 5 распыления охладителя, осуществляющих полную по сечению кристаллизацию слитка, не приводных 6 и приводных 7 удерживающих роликов до приемного рольганга 8, на котором происходит отделение затравки от слитка, и далее поступает на устройство разделения слитка на мерные длины (9).



**Рис. 1. Типовая технологическая схема МНЛЗ криволинейного типа**

Технологический канал ЗВО МНЛЗ криволинейного типа разделен на три участка: радиальный; криволинейный, в котором осуществляется разгиб заготовки; горизонтальный [1, 12]. Роликовая проводка ЗВО состоит из 98 пар роликов в верхнем и нижнем рядах. Все ролики в верхнем ряду выполнены неприводными, а в нижнем ряду установлены как приводные (тянущие) ролики, так и неприводные. Вытягивание слитка шириной 1150–2350 мм выполняется 70 приводными роликами.

Основными технологическими требованиями к электроприводу ТПУ с позиций распределения электроприводов тянущих роликов вдоль ЗВО являются: надежное удержание затравки в подготовительном режиме работы машины; гарантированное вытягивание затравки и головной части слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО на заданной скорости до отводящего рольганга в начальной стадии разливки металла; надежное (без буксиров) вытягивание заготовки из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО в рабочем режиме разливки стали; минимизация растягивающих продольных усилий в слитке средствами электропривода ТПУ за счет целесообразного распределения моментов вытягивания слитка между электроприводами тянущих роликов [13–15].

В известных публикациях по электроприводу ТПУ приведены общие методики расчета моментов нагрузки и мощности электропривода ТПУ с учетом особенностей вытягивания слитка на радиальном, криволинейном и горизонтальном участках ЗВО [1, 7, 10, 13]. При этом распределение тянущих роликов вдоль технологической линии ЗВО выполняется «на основе мирового опыта непрерывной разливки стали и опыта создания и совершенствования машин криволинейного типа» [1]. Единая научно обоснованная методика расчета числа тянущих роликов и их рационального, обеспечивающего выполнение технологических требований к электроприводу ТПУ, распределения вдоль ЗВО отсутствует [10].

## КРИТЕРИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ

Согласно основным технологическим требованиям, предъявляемым к электроприводу тянущих роликов, предложен следующий перечень критериев, которым должно удовлетворять распределение тянущих роликов вдоль ЗВО:

1. В подготовительном режиме работы МНЛЗ электропривод тянущих роликов должен приложить к ней требуемое по технологии общее усилие стопорения. Данное условие будет выполнено, если на контакте каждого тянущего ролика с затравкой будет выполняться условие

$$F_{stj} \leq F_{frj}, \quad j = 1 \dots m_{dr}, \quad (1)$$

где  $F_{stj}$  – усилие стопорения, прикладываемое к затравке  $j$ -м приводным роликом, Н;  $F_{frj}$  – усилие сцепления между  $j$ -м тянущим роликом и затравкой, Н;  $m_{dr}$  – количество приводных роликов, имеющих контакт с затравкой.

2. В начальной стадии разливки стали электропривод тянущих роликов должен приложить к затравке и заготовке общее усилие вытягивания, достаточное для надежного (без буксиров) их перемещения на заданной скорости [14, 17]. Для выполнения этого на контактах всех тянущих роликов с затравкой и головной частью слитка должно выполняться условие

$$\begin{cases} F_{pj} < F_{frj}; \\ F_{p fir j} < F_{fr fir j}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_{pj}$  – усилие вытягивания, прикладываемое  $j$ -м тянувшим роликом, Н;  $F_{frj}$  – усилие сцепления между  $j$ -м тянувшим роликом и слитком, Н;  $j$  – номер тянущего ролика, при  $j=1 \dots n_{dr}$ , имеющего контакт со слитком, и при  $j=(n_{dr}+1) \dots m_{dr}$ , имеющего контакт с затравкой;  $F_{p fir j}$  – усилие вытягивания, прикладываемое  $j$ -м тянувшим роликом к затравке, Н;  $F_{fr fir j}$  – усилие сцепления между  $j$ -м тянувшим роликом и затравкой, Н;  $m_{dr}-n_{dr}$  – количество тянущих роликов в данном положении затравки, имеющих с ней контакт.

3. В рабочем режиме электропривод тянущих роликов должен обеспечить вытягивание слитка с требуемым по технологии усилием с учетом увеличения момента сопротивления вытягиванию слитка на низкой скорости в  $k_c$  раз в случае вытягивания слитка на низкой скорости при замене промежуточного ковша и погружного стакана. При этом на контакте каждого тянущего ролика должно выполняться условие

$$F_{pj} \leq F_{frj}. \quad (3)$$

4. На рабочей скорости разливки стали в каждом межроликовом пространстве ЗВО величина растягивающих продольных усилий должна быть ограничена на минимально возможном уровне (в идеальном случае на уровне нуля):

$$F_{strj} \leq \sup\{F_{str}\} \text{ при } F_{str} \rightarrow 0, \quad (4)$$

где  $F_{str}$  – величина растягивающих продольных усилий,

создаваемых в слитке электроприводом тянувших роликов, Н;  $F_{strj}$  – величина растягивающих продольных усилий в каждом межроликовом пространстве ЗВО, Н.

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ВДОЛЬ ЗВО ПО КРИТЕРИЮ УДЕРЖАНИЯ ЗАТРАВКИ В ПОДГОТОВИТЕЛЬНОМ К РАЗЛИВКЕ РЕЖИМЕ**

Предложена следующая методика расчета распределения тянувших роликов вдоль ЗВО по критерию удержания затравки в подготовительном к разливке режиме работы МНЛЗ. Методика основана на выполнение следующих действий.

1. С учетом того, что первый тянувший ролик по техническим причинам не может быть расположен ближе  $l_0$  к кристаллизатору рассчитываются номера  $n_i$  и число  $M$  роликовых пар, имеющих контакт с затравкой:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_0-1} t_{Stepi} &< l'_{fir} - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_0} t_{Stepi}; \\ \sum_{i=1}^{n_1-1} t_{Stepi} &< l_0 - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_1} t_{Stepi}; \\ \sum_{i=1}^{n_2} t_{Stepi} &< l'_{fir} + l_{fir} - l_{Cr} < \sum_{i=1}^{n_2+1} t_{Stepi}; \\ M &= n_2 - n_0 + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $n_0$  – номер ближайшей к кристаллизатору роликовой пары, имеющей контакт с телом затравки;  $n_1$  – номер роликовой пары, расположенной от кристаллизатора на расстоянии  $l_0$ ;  $n_2$  – номер дальней от кристаллизатора роликовой пары, имеющей контакт с телом затравки;  $t_{Stepi}$  – шаг установки роликов в ЗВО, м;  $l_{Cr}$  – расстояние от кристаллизатора до первой пары роликов, м;  $l'_{fir}$  – расстояние от кристаллизатора первой пары роликов, имеющей контакт с телом затравки, м;  $l_{fir}$  – длина тела затравки, м.

2. По методикам [7, 10] рассчитывается требуемая величина усилий стопорения и сцепления. Расчет выполняется для самых тяжелых условий удержания затравки: минимальных значений сил сцепления затравки с роликами и наибольших значений сил тяжести.

3. Выполняется расчет требуемого числа  $m_{dr}$  приводных роликов:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m_{dr}-1} F_{fr firj} &< G_{M \max} + G_{fir} \times \\ &\times \cos \alpha_{fir} - \sum_{i=1}^M F_{fir} < \sum_{j=1}^{m_{dr}} F_{fr firj}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $G_{M \max}$  – сила тяжести жидкого металла в кристаллизаторе, Н;  $G_{fir}$  – сила тяжести затравки;  $\alpha_{fir}$  – угол между вертикалью и касательной к телу затравки в центре её тяжести;  $M$  – число пар роликов, имеющих контакт с телом затравки;  $F_{fir}$  – усилие сопротивления протягиванию затравки через  $i$ -ю пару роликов, Н.

Для технологических условий и параметров промышленной МНЛЗ на основе предложенной методики разработана математическая модель расчета распреде-

ления тянувших роликов на радиальном участке ЗВО. В результате исследования на модели установлено, что надежное удержание затравки в роликовой проводке ЗВО и жидкого металла в кристаллизаторе происходит естественным образом без участия электропривода тянувших роликов за счет сил трения между роликами и затравкой от распорного давления в камерах затравки на неприводные ролики ЗВО:  $F_{st} = -39,4$  кН < 0.

**МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ВДОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАНАЛА ЗВО В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗЛИВКИ**

Методика основана на выполнении следующих действий.

1. Исходными условиями для расчета распределения электроприводов тянувших роликов вдоль ЗВО выбираются:

- ближайший к кристаллизатору тянущий ролик может быть установлен в позиции  $n_1$ ;
- ролики имеют паспортные размеры (износ и остаточный прогиб бочки отсутствуют);
- тянущий ролик может занимать любую позицию в нижнем ряду роликовой проводки ЗВО, начиная с номера  $n_1$  до номера последнего ролика в ЗВО.

2. Для каждого положения головной части слитка, начиная от кристаллизатора до последней пары роликов ЗВО, по известным математическим соотношениям [10, 12, 16] вычисляются массивы значений: усилий сцепления между роликами и затравкой; усилий давления слитка на ролики; усилий сцепления между роликами и слитком; усилий сопротивления вытягиванию слитка и затравки из каждой пары роликовой проводки. Расчет выполняется для самых неблагоприятных условий вытягивания слитка и затравки из ЗВО:

- наименьших значений коэффициентов сцепления между слитком и роликом;
- наибольших значений коэффициентов трения в опорах роликов и на контактах роликов со слитком и затравкой;
- наибольшей ширины отливаемой заготовки.

3. На начальной стадии расчета при положении переднего конца заготовки в кристаллизаторе принимается решение: первый тянувший ролик занимает позицию в нижнем ряду с номером  $n_1$  в общей нумерации роликовых пар.

4. Для этого положения слитка по данным массива п. 2 выполняется проверка неравенства

$$F_{fr} + F_{fr fir} > F_{Cr} + F_C + F_{fir} - G, \quad (7)$$

где  $F_{fr} = \sum_{j=1}^{n_{dr}} F_{frj}$  – общее усилие сцепления приводных роликов со слитком, Н;  $F_{frj}$  – усилие сцепления  $j$ -го приводного ролика и слитка, рассчитанное по условиям п. 2;  $n_{dr}$  – число приводных роликов, имеющих контакт со слитком;  $F_{fr fir} = \sum_{j=n_{dr}+1}^{m_{dr}} F_{fr firj}$  –

общее усилие сцепления приводных роликов с затравкой, Н;  $F_{fr fir j}$  – усилие сцепления приводного

ролика и затравки, рассчитанное по условия п. 2, Н;  $m_{dr} \cdot n_{dr}$  – число приводных роликов, имеющих контакт с затравкой;  $F_{Cr}$  – усилие сопротивления вытягиванию слитка из кристаллизатора, Н;  $F_C = \sum_{i=1}^N F_{Ci}$  – общее усилие сопротивления вытягиванию слитка из роликовых пар, Н;  $F_{ci}$  – усилие сопротивления вытягиванию слитка из  $i$ -й пары роликов, Н;  $N$  – количество роликовых пар, имеющих контакт со слитком;  $F_{fir} = \sum_{i=1}^M F_{fri}$  – общее усилие сопротивления вытягиванию затравки из  $M$  роликовых пар, Н;  $M$  – количество роликовых пар, имеющих контакт с затравкой;  $G$  – сумма сил тяжести металла в кристаллизаторе и продольных составляющих сил тяжести слитка в ЗВО и затравки, Н.

Если неравенство (7) не выполняется, то по выражению (8) рассчитывается требуемое число тянувших роликов  $m_{dr}$ :

$$F_{fir} \cdot (m_{dr} - 1) < F_{fir} \left( \frac{M - m_{dr}}{M} + 1 \right) - G_{firT} + F_T < F_{fir} \cdot m_{dr}, \quad (8)$$

где  $G_{firT}$  – продольная составляющая силы тяжести затравки, Н;  $G_T$  – продольная составляющая силы тяжести слитка, Н.

Далее осуществляется переход к следующему положению переднего конца слитка (в пространстве между первой роликовой парой и второй).

5. Тянувшие ролики равномерно распределяются в роликовом пространстве между  $n_1$  и  $n_2$  роликовыми парами. Позиции тянувших роликов фиксируются и осуществляется переход к следующей позиции слитка.

6. Для нового положения затравки и слитка вновь выполняется расчет составляющих неравенства (7), и оно проверяется на соответствие. Если неравенство выполняется, то осуществляется переход к следующему положению слитка и затравки. В противном случае следующий тянущий ролик устанавливается в позиции роликовой пары, наиболее удаленной от кристаллизатора и имеющей контакт с затравкой. После этого вновь проверяется условие (7), и если оно выполняется, то осуществляется переход к следующей позиции головной части слитка.

Расчет продолжается до тех пор, пока головная часть слитка не выйдет из последней роликовой пары ЗВО.

В результате расчета распределения тянувших роликов вдоль ЗВО по предложенной методике для параметров промышленной МНЛЗ установлено (рис. 2): общее число электроприводов тянувших роликов в начальной стадии разливки металла можно существенно сократить (с 70 до 21 тянущего ролика); при этом на радиальном участке число приводных роликов можно сократить с 16 до 7, на криволинейном – с 20 до 5 и на горизонтальном – с 34 до 9, причем в первой группе горизонтального участка с 10 до 3 и во второй группе с 24 до 5.

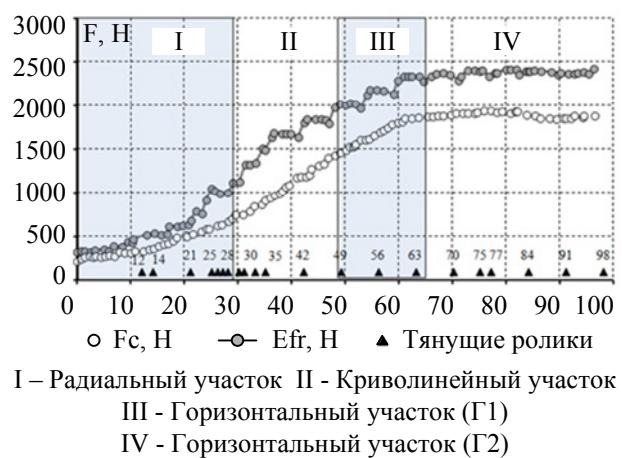


Рис. 2. Распределение электроприводов тянувших роликов вдоль ЗВО по критерию вытягивания затравки с головной частью слитка

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ МНЛЗ

С целью определения реального изменения общего момента сопротивления  $M_{c2}$  при вытягивании слитка на низких скоростях во время замены промежуточного ковша или погружного стакана относительно величины момента  $M_{c1}$  при вытягивании слитка на рабочей скорости выполнена обработка временных диаграмм изменения общего тока нагрузки электропривода ТПУ. В результате дисперсионного и регрессионного анализа изменения величины коэффициента  $k_c = M_{c2}/M_{c1}$  (объем выборки  $N=1536$  наблюдений) получено уравнение регрессии и рассчитан его доверительный интервал изменения коэффициента  $k_c$  в функции временного интервала  $\Delta t$  вытягивания слитка на низкой скорости. Установлено, что наибольшая величина коэффициента составляет  $k_c = 1,62$ , что позволяет выполнить более точный расчет распределения приводных роликов вдоль ЗВО по третьему критерию.

Методика расчета распределения тянувших роликов вдоль ЗВО по критерию надежного вытягивания слитка из кристаллизатора и роликовой проводки ЗВО в рабочем режиме работы МНЛЗ с учетом увеличения общего момента сопротивления вытягиванию слитка в  $k_c$  раз на низкой скорости вытягивания слитка включает следующую последовательность расчета.

#### 1. Исходные допущения:

- прогиб и износ бочки роликов ЗВО отсутствуют;
- выставка роликового полотна МНЛЗ и растворы роликовых пар соответствуют их паспортным параметрам;
- закрытие лунки жидкой фазы в слитке на рабочей скорости разливки происходит в районе 64 роликовой пары ЗВО;
- первый тянущий ролик установлен в нижнем ряду роликовой пары  $n_1$ , расположенной на расстоянии  $l_0$  от кристаллизатора;
- приводной ролик может быть установлен в нижнем ряду роликовой пары, начиная с номера  $n_1$  до номера последней роликовой пары.

2. Рассчитываются массивы усилий давления слитка на ролики  $P_i$  и усилие  $F_{Cr}$  сопротивления вытягиванию слитка из кристаллизатора для самых неблагопри-

ятных условий вытягивания слитка из ЗВО на рабочей скорости разливки стали.

Величина кратности  $k_c$  увеличения момента сопротивления вытягиванию слитка при разливке на низкой скорости принята экспериментально определенной величине.

В соответствии с последним по данным исходного массива  $P_i$  выполняется расчет усилий давления  $P'_i$  на ролики при разливке стали на низкой скорости по выражению

$$P'_i = k_c \cdot P_i. \quad (9)$$

С учетом  $P'_i$  на разработанной математической модели [10] выполняется расчет массивов усилий сопротивления  $F'_{ci}$  вытягиванию слитка и усилий сцепления  $F'_{frj}$ .

3. С учетом того, что первый тяущий ролик установлен в нижнем ряду роликовой пары с номером  $n_1$ , выполняется расчет величины дисбаланса усилий  $\Delta F_{p1}$  между требуемой по технологии величиной усилия  $F_{p1}$  вытягивания слитка из кристаллизатора и первых  $n_1$  пар роликов и величиной реального усилия вытягивания  $F'_{p1}$ , которое по условию сцепления ролика со слитком способен приложить электродвигатель первого тяущего ролика к заготовке:

$$\Delta F_{p1} = F_{p1} - F'_{p1}, \quad (10)$$

$$\text{где } F'_{p1} = F'_{fr1}(1 - 0,05); \quad (11)$$

$F'_{fr1} \cdot 0,05$  – принятый в расчете запас усилий для предотвращения срыва контакта между тяущим роликом и слитком.

4. Позиция  $n_2$  второго тяущего ролика определяется из системы неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta F_{p1} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} F'_{ci} - \sum_{i=n_1+1}^{n_2} G_{Ti} < F'_{fr2(n_2)} \cdot (1 - 0,05); \\ \Delta F_{p1} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2+1} F'_{ci} - \sum_{i=n_1+1}^{n_2+1} G_{Ti} > F'_{fr2(n_2+1)} \cdot (1 - 0,05), \end{array} \right. \quad (12)$$

где  $F'_{fr2}$  – усилие сцепления второго тяущего ролика со слитком при условии, что он занимает позицию в нижнем ряду роликовой пары с номером  $n_2$ , Н;  $F'_{fr2(n_2+1)}$  – усилие сцепления второго тяущего ролика со слитком при условии, что он занимает позицию в нижнем ряду следующей роликовой пары с номером  $n_2+1$ , Н.

5. Позиции следующих за вторым  $j$ -х тяущих роликов определяются из последовательного решения следующей системы неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=n_{(j-1)+1}}^{n_j} F'_{ci} - \sum_{i=n_{(j-1)+1}}^{n_j} G_{Ti} < F'_{frj(n_j)} \cdot (1 - 0,05); \\ \sum_{i=n_{(j-1)+1}}^{n_{j+1}} F'_{ci} - \sum_{i=n_{(j-1)+1}}^{n_{j+1}} G_{Ti} > F'_{frj(n_{j+1})} \cdot (1 - 0,05), \end{array} \right. \quad (13)$$

где  $F'_{frj(nj)}$  – усилие сцепления между слитком и  $j$ -м тяущим роликом при условии его расположения в позиции  $n_j$  пары роликов;  $F'_{frj(nj+1)}$  – усилие сцепления между слитком и  $j$ -м тяущим роликом при условии его расположения в позиции  $(n_j+1)$  пары роликов.

На примере МНЛЗ промышленного предприятия в соответствии с разработанной методикой выполнен расчет распределения тяущих роликов по третьему критерию (3) в рабочем режиме разливки с учетом коэффициента  $k_c$  увеличения общего момента сопротивления вытягиванию слитка при разливке на низкой скорости и усилия давления на ролики от протягивания затвердевшей заготовки на горизонтальном участке ЗВО. Результаты расчета приведены на рис. 3.

На рис. 3 темным цветом выделены усилия в приводных роликах. Согласно рис. 3 в рабочем режиме разливки стали число электроприводов за счет их рационального распределения вдоль ЗВО допустимо сократить с 70 до 24 (на радиальном участке – 4 ролика, на криволинейном – 7 приводных роликов, на первом горизонтальном – 4 приводных ролика и на втором горизонтальном – 9 приводных роликов).

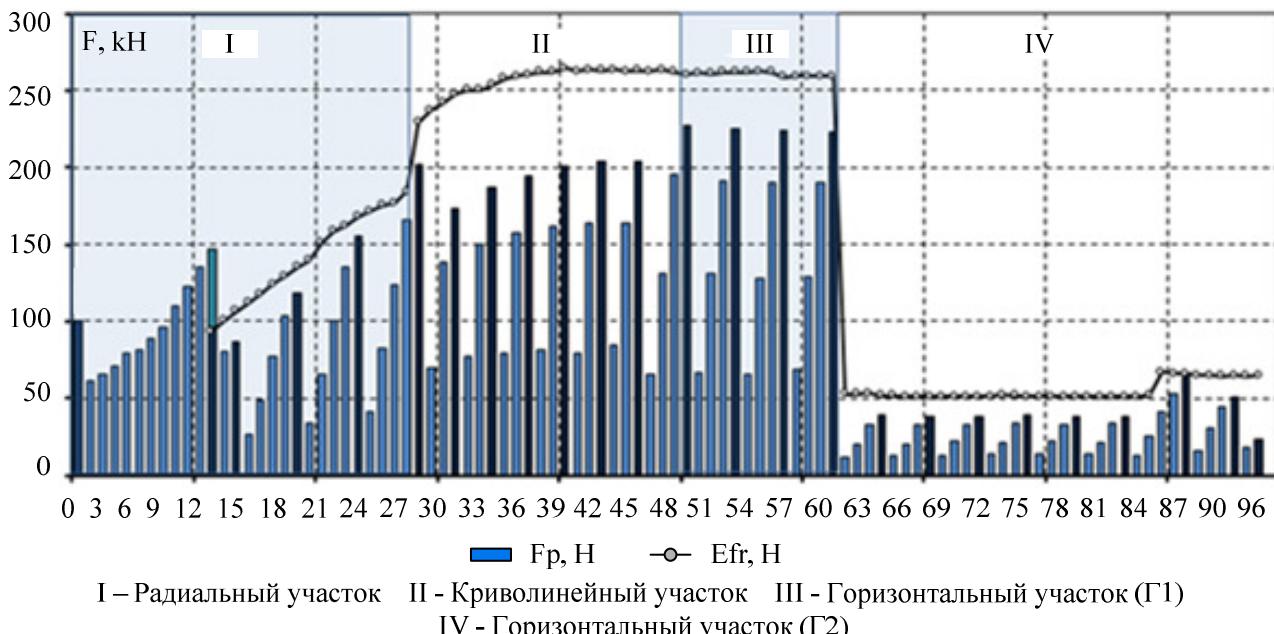


Рис. 3. Распределение тяущих роликов по критерию надежного вытягивания слитка в рабочем режиме разливки

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНЫХ УСИЛИЙ,  
СОЗДАЕМЫХ В СЛИТКЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТПУ**

Предложенная математическая модель расчета продольных усилий (14) отличается от ранее известных [10, 13] тем, что позволяет рассчитывать продольные усилия в слитке на каждом шаге роликовой проводки ЗВО.

$$\begin{aligned} F_{0,1} &= F_{Cr}; \\ F_{1,2} &= F_{Cr} + F_{C1}; \\ F_{i-1,i} \Big/_{i=n_1} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_1-1} F_{Ci}; \\ F_{i-1,i} \Big/_{(n_1+1) < i < (n_2+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - F_{p1}; \\ F_{i-1,i} \Big/_{(n_j+1) < i < (n_{j+1}+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj}; \\ F_{i-1,i} \Big/_{(n_{m-1}+1) < i < (n_m+1)} &= F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^{m-1} F_{pj}; \end{aligned} \quad (14)$$

Согласно четвертому критерию во всех межроликовых пространствах ЗВО должно выполняться условие

$$F_{i-1,i} \Big/_{(n_j+1) < i < (n_{j+1}+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{i-1} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj} < 0. \quad (15)$$

Согласно (15) решение задачи минимизации продольных усилий возможно лишь в том случае, если в каждом межроликовом пространстве ЗВО величина усилия вытягивания, прикладываемая к слитку предыдущими электроприводами тянувших роликов, будет превышать текущее значение усилия сопротивления  $F_c$  вытягиванию слитка. При этом электродвигатели тянувших роликов в слитке должны формировать обратные по знаку растягивающим усилия подпора.

С учетом последнего предложена следующая методика распределения тянувших роликов вдоль ЗВО по четвертому критерию. Она включает последовательность операций:

1. С учетом того, что первый тянувший ролик ( $j=1$ ) занимает позицию  $n_1$  в общей нумерации  $i$  роликовых пар ЗВО по системе уравнений (14) для части роликовой проводки с номерами пар  $i < n_1+1$ , выполняется расчет распределения растягивающих продольных усилий в слитке. Усилие вытягивания  $F_{p1}$ , прикладываемое к слитку электродвигателем первого тянувшего ролика, определяется по выражению (11).

2. По выражению

$$F_{i-1,i} \Big/_{i=(n_1+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_1} F_{Ci} - F_{p1} \quad (16)$$

рассчитывается величина растягивающего продольного усилия, которое необходимо сформировать в слитке в пространстве между  $n_1$  и  $n_1+1$  роликовыми парами электроприводу второго тянувшего ролика для компенсации дисбаланса усилий  $\Delta F_{p2}$  (10).

Если в результате расчета по (14)  $F_{i-1,i \Big/_{i=(n_1+1)}} < 0$ , то есть выполняется общее условие (15) к распределению тянувших роликов по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке, то выполняется переход к п. 5 методики.

3. Если  $F_{i-1,i \Big/_{i=(n_1+1)}} > 0$ , что противоречит условию (15), то принимается решение о необходимости установки в позиции  $n_1+1$  следом за первым тянувшим роликом второго тянувшего ролика. Для позиции  $n_1+1$  второго тянувшего ролика по выражению (11) выполняется расчет усилия вытягивания  $F'_{p2}$ . С учетом этого для межроликового пространства между  $n_1+1$  и  $n_2+1$  тянувшими роликами по (15) выполняется проверка условия  $F_{i-1,i} < 0$ . Если неравенство справедливо, то осуществляется переход к п. 5. Иначе принимается решение о необходимости установки в позиции  $n_1+2$  третьего тянувшего ролика и расчет по п. 4 повторяется до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (15).

4. Выбор позиции следующего тянущего ролика включает в себя:

– расчет по уравнению

$$F_{n_j,(n_j+1)} = F_{Cr} + \sum_{i=1}^{n_j} F_{Ci} - \sum_{j=1}^j F_{pj} \quad (17)$$

величины продольного усилия в пространстве между парой роликов с номером  $n_j$ , в нижнем ряду которой установлен  $j$ -й тянущий ролик, и следующей за ней роликовой парой  $n_j+1$ ;

– расчет числа  $l=1\dots\infty$  неприводных пар роликов, через которые  $j$ -й тянувший ролик может протолкнуть заготовку за счет подпора в слитке, величиной усилия подпора, равного величине нагрузки следующего тянувшего ролика. Величина  $l$  определяется из решения системы следующих неравенств:

$$\begin{cases} F_{n_j,(n_j+1)} + \sum_{i=(n_j+1)}^{(n_j+1)+(l-1)} F_{Ci} < 0; \\ F_{n_j,(n_j+1)} + \sum_{i=(n_j+1)}^{(n_j+1)+l} F_{Ci} > 0; \end{cases} \quad (18)$$

– определение позиции следующего  $j+1$  тянущего ролика по выражению

$$n_{j+1} = n_j + l + 1. \quad (19)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что на радиальном участке ЗВО наивысшим рангом с позиций числа приводных роликов обладает методика распределения роликов по условию надежного вытягивания затравки с головной частью слитка (рис. 2-4), а на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО – методика их распределения по условию вытягивания слитка в рабочем режиме работы МНЛЗ. Поэтому с целью оптимизации последовательности расчета предложено первоначально выполнять расчет распределения тянувших роликов на участках ЗВО по указанным методикам, а по остальным методикам выполнять проверку на выполнение их условий

с коррекцией в случае необходимости позиций электроприводов.

Разработана обобщенная методика рационального распределения электроприводов тянувших роликов вдоль ЗВО, в которых указана последовательность расчета с учетом коррекции числа тянувших роликов и их позиций при проверке выполнения условий критериев распределения электроприводов тянувших роликов с более низким рангом.

Для технологических условий промышленной МНЛЗ по обобщенной методике выполнен расчет рационального распределения электроприводов тянувших роликов вдоль ЗВО. Доказано, что без нарушения технологических требований, предъявляемых к электроприводу тянувших роликов с позиций обеспечения им стабильной работы МНЛЗ и отливки заготовок высокого качества, число электроприводов тянувших роликов допустимо сократить более чем в 2 раза, с 70 до 28. При этом в самых неблагоприятных условиях разливки стали на МНЛЗ запас усилий стопорения при удержании затравки в ЗВО составляет 117%, запас усилий сцепления при вытягивании затравки с головной частью слитка в зависимости от их положения в роликовой проводке ЗВО составляет 11,7–34,9%, а при вытягивании заготовки в рабочем режиме разливки – 32%. При этом электроприводом ТПУ в пространстве между 14 и 98 парами роликов выполняется ограничение на нулевом уровне растягивающих продольных усилий в слитке.

Технико-экономический анализ вариантов исполнения электропривода ТПУ установил, что срок

окупаемости при замене на новых МНЛЗ существующей схемы электропривода ТПУ с групповой схемой силового питания всех электродвигателей тянувших роликов от одного тиристорного преобразователя на индивидуальную схему силового питания электродвигателей тянувших роликов с рациональным их распределением вдоль ЗВО, рассчитанном по разработанной методике, составляет 2,8–3 года, а при использовании индивидуального электропривода с традиционной схемой распределения приводов – 5,8–7,8 лет на МНЛЗ № 5 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

На МНЛЗ №5 ОАО «ММК» впервые на отечественных слябовых МНЛЗ криволинейного типа внедрен индивидуальный электропривод тянувших роликов. Число тянувших роликов сокращено с 70 до 56.

5. Аналогично п. 4 выполняется расчет позиций остальных тянувших роликов в направлении от кристаллизатора к отводящему рольгангу МНЛЗ.

Анализ результатов расчета распределения электроприводов тянувших роликов вдоль ЗВО, выполненный для технологических условий и параметров промышленной МНЛЗ по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке, показал (см. рис. 4), что за счет целесообразного распределения вдоль ЗВО тянувших роликов и прикладываемых ими к слитку усилий вытягивания число электроприводов тянувших роликов допустимо снизить с 70 до 19 (на радиальном участке – 6 приводных роликов; на криволинейном – 5; на первом горизонтальном – 4 и втором горизонтальном – 4).

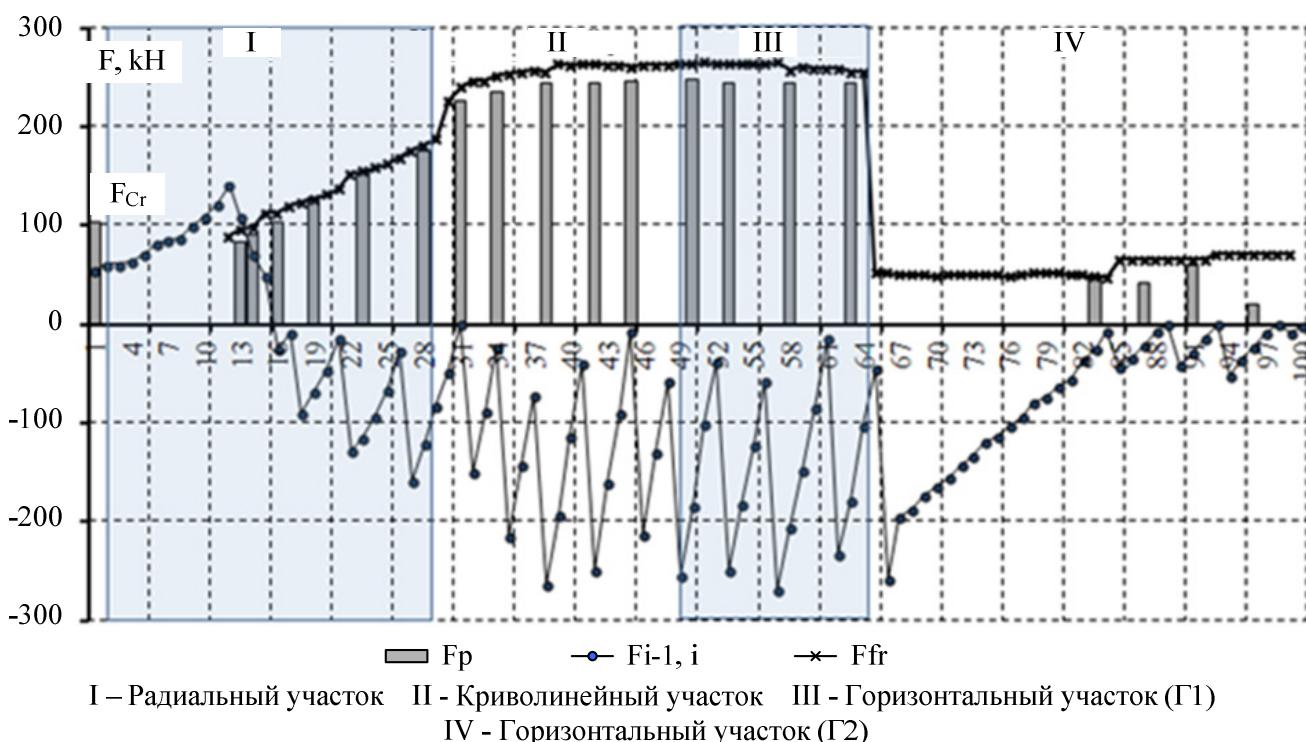


Рис. 4. Распределение электроприводов тянувших роликов вдоль технологического канала ЗВО для параметров промышленной МНЛЗ по критерию минимизации растягивающих продольных усилий в слитке

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ницковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
2. Safonov, D.S., Logunova, O.S., Chistiakov, D.V. (2016) Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software 1(9): 114 – 122.
3. Luk'yanov, S.I., Suspitsyn, E.S., Krasil'nikov, S.S., Konovalov, M.V. (2014) Diagnosing technological defects in continuous slab casters. Metallurgist 58:310-315. doi:10.1007/s11015-014-9907-1
4. Lukyanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. (2015) Intelligent system for prediction of liquid metal breakouts under a mould of slab continuous casting machines. Int J Adv Manuf Technol 79(9):1861–1868. doi:10.1007/s00170-015-6945-1.
5. Logunova, O.S., Devyatov, D.Kh., Nurov, Kh.Kh. (2005) Computerized quality estimates of continuous-cast billet. Steel in Translation 35(9): 36-42.
6. Lukyanov S.S., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograyev R.S., Suspitsyn Ye.S. (2017) Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine. Manuf Technol 89 (5): 1975-1987. doi:10.1007/s00170-016-9224-x.
7. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987. 279 с.
8. Электропривод тянувших роликов МНЛЗ/ Лукьянов С.И., Селиванов И.А., Фомин Н.В., Васильев А.Е. // Привод и управление. 2001. №1. С. 10–12.
9. Обобщенная методика диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов/ Лукьянов С.И., Суспицын Е.С., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С., Коновалов М.В. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2009. №1. С. 38–42.
10. Лукьянов С.И., Васильев А.Е., Лукьянов Д.С. Автоматизированный электропривод тянуще-правильного устройства МНЛЗ: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 176 с.
11. R.S. Takhautdinov, S.I. Luk'yanov, K.N. Vdovin, Yu.A. Bodyaev, A.D. Nosov, V.G. Suspitsin, I.A. Selivanov, E.I. Sidel'nikova (2002) Effect of the Current Distribution between the Electric Motors of the Pinch Rollers in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster on the Quality of the Cast Semifinished Product. Metallurgist 46(2): 24-27. doi: 10.1023/A:1015659432005.
12. Автоматизированная система контроля и управления МНЛЗ / Девятов Д.Х., Лукьянов С.И., Логунова О.С., Суспицын Е.С., Тугарова В.Д., Швидченко Д.В. Магнитогорск, 2009. 640 с.
13. Лукьянов Д.С. Распределение электроприводов тянущих роликов на машине непрерывного литья заготовок: автореф. дис ... канд. техн. наук. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 20 с.
14. Исследование буксовок тянувших роликов зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок ККЦ ОАО «ММК» / Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Белый А.В.; ГОУ ВПО «Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И Носова. Магнитогорск, 2000. Деп. в ВИНИТИ 24.07.2000, №2064 – В00.
15. Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Фомин Н.В. Анализ причин колебания электропривода зоны вторичного охлаждения МНЛЗ ККЦ ММК // Электротехнические системы и комплексы. 2000. №5. С. 5–9.
16. Математическая модель расчета распределения моментов по приводным роликам зоны вторичного охлаждения для условий МНЛЗ ККЦ ОАО «ММК» / Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Погорелов И.Л., Лукьянов В.П.// Электротехнические системы и комплексы. 1998. №3. С. 127–133.
17. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1 (45). С. 129–136.

Поступила в редакцию 24 апреля 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## DISTRIBUTION METHOD OF WITHDRAWAL ROLL ELECTRIC DRIVES AT CONTINUOUS CASTING MACHINE

Sergej I. Lukyanov

D.Sc. (Eng.), Professor, Director of the Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Dmitry S. Lukyanov

Ph.D. (Eng.), Customer Services Managing Director, Compass Plus, Magnitogorsk, Russia.

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Eng.), head of Computer Engineering and Software Engineering department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy V. Nikiforov

D.Sc. (Eng.), chairman of board of directors, Magnitogorsk gazstroy LLC, Magnitogorsk, Russia.

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of electronics and microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper presents the results of the research aimed at solving the problem of rational distribution of electric drives of withdrawal rolls along the technological line of the continuous casting machine and selecting the minimum number of withdrawal rolls in different

sections of the secondary cooling zone. The research includes the construction and ranking criteria for the distribution of drive rollers along the technological line of the continuous casting machine; the development of methods and algorithms for calculating the required

distribution of load moments by withdrawal rolls and distribution of electric drives of withdrawal rolls along the secondary cooling zone in three modes of operation of the electric drive of the withdrawal and straightening unit: retention of the seed in the preparatory casting mode of the continuous casting machine; pulling the seed with the head of the ingot at the initial stage of metal pouring; stretching of the ingot in the working mode of casting. Theoretical studies were carried out using analytical and numerical methods to solve algebraic equations, methods of structural modeling. It is proved that due to the significant reduction in the number of withdrawal rolls, the payback period of replacement at new machines for continuous casting of the group scheme of power supply for electric motors to individual ones decreases from 5.8-7.8 years with the traditional distribution of withdrawal rolls along the secondary cooling zone to 2.8-3 years with their rational distribution calculated by the developed methods. The results of the work were used in the design of a slab machine for continuous casting of curvilinear blanks intended for casting of wide billets up to 2.5 m. According to the proposed method, the number of electric drives of withdrawal rolls is reduced to 56.

**Keywords:** Continuous casting machine, electric drive, pull roller, rational distribution, distribution criteria.

## REFERENCES

1. Nickovskih V.M., Karlinskij S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo litya zagotovok* [Continuous casting machines]. Moscow: Metallurgy, 1991. 272 p. (In Russian)
2. Safonov, D.S., Logunova, O.S., Chistiakov, D.V. (2016) Optimization of nozzle layout in continuous casting machine. Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software 1(9): 114–122.
3. Luk'yanov, S.I., Suspitsyn, E.S., Krasilnikov, S.S., Konovalov, M.V. (2014) Diagnosing technological defects in continuous slab casters. Metallurgist 58:310-315. doi:10.1007/s11015-014-9907-1
4. Lukyanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. (2015) Intelligent system for prediction of liquid metal breakouts under a mould of slab continuous casting machines. Int J Adv Manuf Technol 79(9):1861–1868. doi:10.1007/s00170-015-6945-1.
5. Logunova, O.S., Devyatov, D.Kh., Nurov, Kh.Kh. (2005) Computerized quality estimates of continuous-cast billet. Steel in Translation 35(9): 36–42.
6. Lukyanov S. S., Belyi A.V., Logunova O. S., Shvidchenko D.V., Pishnograyev R. S., Suspitsyn Ye. S. (2017) Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the sec-ondary cooling zone of a continuous casting machine. Manuf Technol 89 (5): 1975-1987. doi:10.1007/s00170-016-9224-x.
7. Margolin SH.M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Electric Drive of a Continuous Casting Machine]. Moscow: Metallurgy, 1987. 279 p. (In Russian)
8. Lukyanov S.I., Selivanov I.A., Fomin N.V., Vasilyev A.E. *Elektroprivod tyanushchih rolikov MNLZ* [Electric Drive of CCM Withdrawal Rolls]. Electric Drive and Control. 2001? no. 1, pp. 10–12. (In Russian)
9. Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Konovalov M.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)
10. Luk'yanov S.I., Vasilyev A.E., Luk'yanov D.S. *Avtomatizirovannyj elektroprivod tyanushche-pravil'nogo ustroystva MNLZ: monografiya* [Automated Electric Drive of the Withdrawal and Straightening Unit of a CCM: monograph]. Magnitogorsk: MGTU, 2004. 176 p. (In Russian)
11. Takhautdinov R.S., Luk'yanov S.I., Vdovin K.N., Bodyaev Yu.A., Nosov A.D., Suspitsin V.G., Selivanov I.A., Sidelnikova E.I. (2002) Effect of the Current Distribution between the Electric Motors of the Pinch Rollers in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster on the Quality of the Cast Semifinished Product. Metallurgist 46(2): 24–27. doi: 10.1023/A:1015659432005.
12. Devyatov D.H., Luk'yanov S.I., Logunova O.S., Suspitsyn E.S., Tutarova V.D., Shvidchenko D.V. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya MNLZ* [Automated System of CCM Control]. Magnitogorsk, 2009. 640 p. (In Russian)
13. Luk'yanov D.S. *Raspredelenie elektroprivodov tyanushchih rolikov na mashine nepreryvnogo litya zagotovok. Avto-referat kand. tekhn. nauk* [Distribution of Electric Drives of CCM Withdrawal Rolls. Abstract of Ph.D. thesis]. Magnitogorsk: MGTU, 2005. 20 p. (In Russian)
14. Luk'yanov S.I., Fomin N.V., Belyj A.V. *Issledovanie buksovok tyanushchih rolikov zony vtorichnogo ohlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya zagotovok KKC OAO «MMK»* [Slipping of Withdrawal Rolls of the Secondary Cooling Section of a Continuous Casting Machine of the Oxygen Converter Shop of the OJSC “MMK”]. Magnitogorsk, 2000; Dep. v VINITI 24.07.2000, №2064 – V00.
15. Selivanov I. A., Luk'yanov S.I., Fomin N.V. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes]. 2000, no. 5, pp. 5–9. (In Russian)
16. Selivanov I.A., Luk'yanov S.I., Pogorelov I.L., Luk'yanov V.P. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical systems and complexes]. 1998. no. 3. pp. 127–133.
17. Luk'yanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.YU., Khramshin V.R. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1 (45), pp. 129–136.

Методика распределения электроприводов тяущих роликов на машине непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянин, Д.С. Лукьянин, О.С. Логунова, Г.В. Никифоров, С.С. Красильников // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 4–12. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)

Luk'yanov S.I., Luk'yanov D.S., Logunova O.S., Nikiforov G.V., Krasil'nikov S.S. Distribution Method of Withdrawal Roll Electric Drives at Continuous Casting Machine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 4–12. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-4-12)