

УДК 621.771

Система управления электроприводом тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок

С. И. Лукьянов¹, Н. В. Фомин¹, А. И. Хлыстов², Е. С. Лукьянов²

¹ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Российская Федерация

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: ntc@magtu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время расчет и распределение моментов вытягивания слитка по электроприводам тянущих роликов являются первостепенной задачей для обеспечения качества слитка.

Материалы и методы: Использовалась разработанная математическая модель расчета усилий сопротивления вытягиванию слитка.

Результаты: Предложена система управления электроприводом тянущих роликов, реализующая требуемое по технологическим условиям распределение моментов вытягивания.

Выводы: Установлено, что предложенная модель расчета усилий может быть использована для реализации системы регулирования тянущих роликов.

Ключевые слова: система управления, электропривод, машина непрерывного литья заготовок.

Electric Drive Control System of Pulling Rollers of Blanks Continuous Casting Machine

S.I. Luk'yanov¹, N.V. Fomin¹, A.I. Khlystov², E.S. Luk'yanov²

¹ Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

² OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: ntc@magtu.ru

Abstract

Background: Nowadays, calculation and moment distribution of an ingot pulling for electric drives of pulling rollers are a paramount task for ensuring quality of the ingots.

Materials and methods: The authors use the developed mathematical model of resistance efforts calculation to the ingot pulling.

Results: The control system of the electric drive of the pulling rollers with implementation of the pulling moments distribution demanded on technological conditions is offered.

Conclusions: It is established that the offered model of efforts calculation can be used for the usage of the regulation system of pulling rollers.

Key words: automatic control system, electric drive, continuous casting machine

Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) №5, установленная в электростале-плавильном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»), разработана и изготовлена в ОАО «Уралмаш». Отличительными особенностями данной МНЛЗ являются: применение вертикального кристаллизатора; наличие вертикального участка и участка загиба заготовки; уменьшение числа секций на горизонтальном участке с пяти до трех; применение в последней секции горизонтального участка механических устройств прижима роликов к слитку.

МНЛЗ №5 предназначена для отливки слябов сечением 250 x 1250–2350 мм на технологической скорости разливки стали 0,12–1,2 м/мин и представляет собой двухручьевую МНЛЗ криволинейного типа.

Роликовая проводка зоны вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ каждого ручья представляет собой два ряда роликов (верхний и нижний) различного диаметра и условно разделена на пять участков: вертикальный, зоны загиба, радиальный, криволинейный и горизонтальный. Роликовая проводка МНЛЗ №5 разделена на одиннадцать секций и секцию зоны загиба заготовки. Всего в ЗВО каждого ручья установлено девятнадцать пар роликов. Верхние ролики выполнены неприводными, а в нижнем ряду чередуются приводные и неприводные ролики (рис. 1).

Вытягивание кристаллизующегося слитка из кристаллизатора и роликовой проводки зоны вторичного охлаждения на каждом ручье осуществляют шестьдесят четыре тянущих ролика.

Распределение тянущих роликов (ТР) по участкам ЗВО приведено в таблице.

Распределение тянущих роликов по участкам ЗВО МНЛЗ №5

Участок	Число ТР
Радиальный	20
Криволинейный	20
Горизонтальный I	8
Горизонтальный II	16

Впервые на отечественных слябовых МНЛЗ производства ОАО «Уралмаш» вместо традиционного электропривода постоянного тока с групповой схемой силового питания электродвигателей от одного или нескольких тиристорных преобразователей применен электропривод переменного тока с индивидуальным силовым питанием каждого электродвигателя типа ДМТКН 112-6У1 ($P_H = 4,5$ кВт при 40 % ПВ, $n_H = 900$ об/мин, $U_H = 380$ В, $I_H = 12,7$ А) от индивидуальных преобразователей частоты типа Micromaster 440 и управлением от промышленного контроллера Simatic.

Информация о мгновенных значениях моментов нагрузки M_i и частоте вращения валов электродвигателей f_i ТР поступает на сервер базы данных (СБД) АСУ ТП МНЛЗ (рис. 1), где формируются и архивируются массивы M_i и f_i с частотой дискретизации $f_s = 2$ Гц.

Среди всего многообразия факторов, определяющих качество непрерывных заготовок, выделяют один, а именно, схему приложения к слитку тянущих усилий, который прямо формируется энергосиловыми параметрами настройки электропривода тянуще-правильного устройства (ТПУ) МНЛЗ [1].

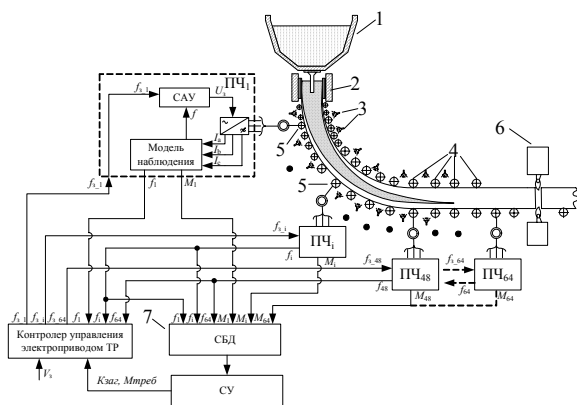


Рис. 1. Функциональная схема электропривода МНЛЗ

В настоящее время актуальными задачами являются определение значений реальных усилий, формируемых в слитке при его вытягивании из кристаллизатора, расчет требуемых по технологии усилий в целях минимизации растягивающих усилий в слитке и формирование требуемого по технологии заданно-

го распределения моментов по электроприводам тянущих роликов.

На рис. 2 представлены типичные диаграммы изменения мгновенных значений моментов нагрузки M_{Hi} электродвигателей тянущих роликов МНЛЗ №5 в рабочем режиме.

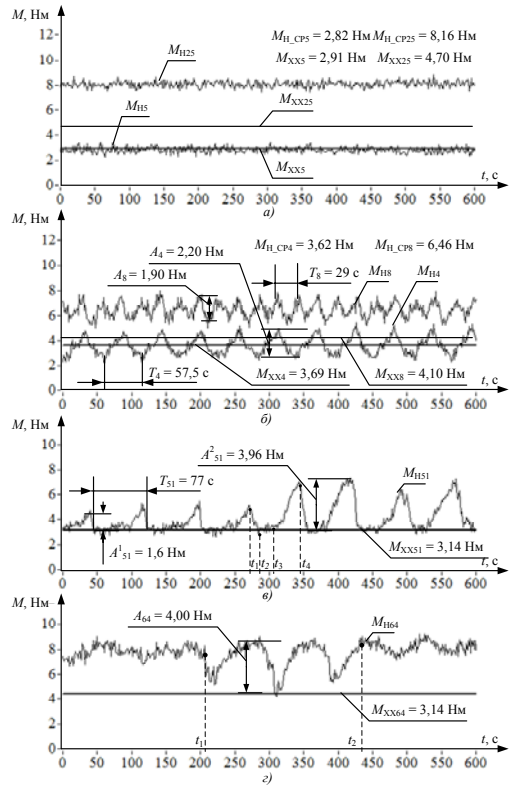


Рис. 2. Изменение моментов нагрузки на электроприводах тянущих роликов

На ряде электродвигателей изменения моментов нагрузки незначительны (рис. 2,а) и ими можно пренебречь; на других электродвигателях (20–40 % от общего числа) наблюдаются существенные колебательные либо аperiodические изменения значений моментов нагрузки (рис. 2,б, в, г).

Анализ временных диаграмм (рис. 2) показал, что величина периода T_i изменения значений моментов M_{Hi} составляет десятки секунд и в большинстве случаев близка величине периода оборота тянущего ролика T_{pi} диаметром D_{pi} .

Кроме этого, существенные изменения мгновенных значений моментов M_{Hi} практически не вызывают заметных изменений общего момента нагрузки электропривода тянущих роликов. С учетом того, что период изменения M_{Hi} на отдельных электродвигателях составляет десятки секунд, а цикл разлива одной плавки длится около одного часа, целесообразно исследование распределения моментов вытягивания слитка по электроприводам тянущих роликов выполнять по средним значениям моментов нагрузки, рассчитываемым за определенный фиксированный интервал времени Δt [3,4].

Для анализа работы электропривода тянущих роликов МНЛЗ №5 с учетом ее конструктивных особенностей были разработаны методика расчета реальных значений моментов вытягивания слитка и математическая модель расчета усилий сопротивления вытягиванию слитка в каждом межроликовом промежутке [4].

На рис. 3 представлены распределения реальных моментов вытягивания слитка, рассчитанных по разработанной методике.

Анализ полученных распределений (рис. 3) показывает, что из шестидесяти четырех электроприводов тянущих роликов в рассматриваемый отрезок времени свое функциональное назначение – вытягивание слитка – выполняют сорок восемь электроприводов ($M_{\text{выт}i} > 0$), шесть электроприводов, напротив, препятствуют вытягиванию слитка ($M_{\text{выт}i} < 0$), а десять электроприводов фактически работают в режиме холостого хода ($M_{\text{выт}i} \approx 0$).

В общем случае величину усилия F_i для МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком и участком зоны загиба заготовки можно рассчитать по следующему выражению:

$$F_i = F_{\text{кр}} + f_i(P_{\text{ф}i} + P_{\text{тп}i} + P_{\text{пр}i} + P_{\text{заг}i} + P_{\text{з}i} + P_{\text{мп}i} + G_{\text{р}i} + G_{\text{Q}i}) + F_{\text{вып}i} - G_{\text{м}} - G_{\text{т}i},$$

где $F_{\text{кр}}$ – усилие вытягивания слитка из кристаллизатора; f_i – эквивалентный коэффициент трения, обусловленный трением качения ролика по слитку и трением в подшипниках опор роликов; $P_{\text{ф}i}$ – усилие ферростатического давления на ролики; $P_{\text{тп}i}$ – усилие давления на ролики от температурных поволод непрерывной заготовки; $P_{\text{пр}i}$ – усилие давления на ролик, обусловленное правкой слитка на криволинейном участке ЗВО; $P_{\text{заг}i}$ – усилие давления на ролик, обусловленное загибом заготовки; $P_{\text{з}i}$ – усилие давления, вызванное протягиванием затвердевшей заготовки через роликовую проводку на горизонтальном участке ЗВО; $P_{\text{мп}i}$ – усилие механического прижима роликов к слитку; $G_{\text{р}i}$ – сила тяжести i -го ролика; $G_{\text{Q}i}$, $G_{\text{т}i}$ – нормальная и тангенциальная составляющие силы тяжести части слитка в межроликовом пространстве $G_{\text{с}i}$; $F_{\text{вып}i}$ – усилие сопротивления вытягиванию выпученной корки заготовки из i -й пары роликов; $G_{\text{м}}$ – сила тяжести металла в кристаллизаторе. Составляющие выражения рассчитываются по известным зависимостям [3, 4].

Таким образом, можно рассчитать требуемые по технологии значения усилий F_i сопротивления вытягиванию слитка из каждой i -й пары роликов ЗВО. Расчет усилий сопротивления вытягиванию слитка на приводных роликах $F_{\text{выт}j}$ выполняется как сумма усилий F_i на данном j -м тянущем ролике и усилий на неприводных роликах перед ним до ближайшего соседнего $j-1$ тянущего ролика.

Результаты расчета требуемых по технологии значений моментов вытягивания слитка $M_{\text{выт}j}$ на электроприводах тянущих роликов приведены на рис. 4.

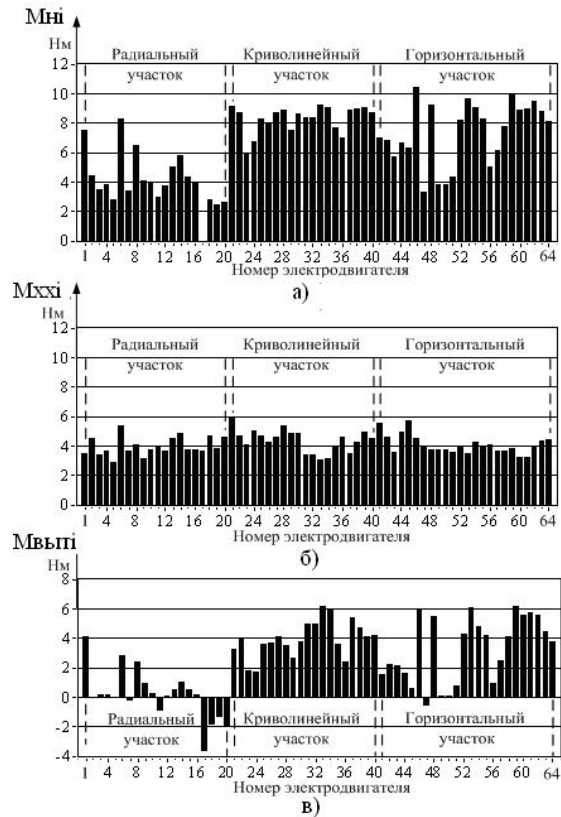


Рис. 3. Распределение реальных моментов вытягивания слитка

Сравнительный анализ графиков (рис. 3, 4) показывает, что по форме и виду реальное распределение значений моментов вытягивания слитка существенно отличается от требуемого по технологии (рис. 4) распределения моментов.

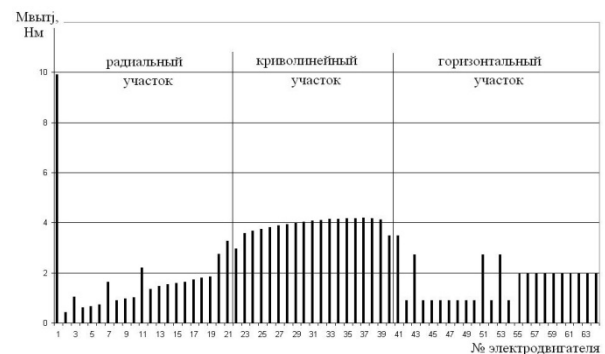


Рис. 4. Требуемое по технологии распределение моментов нагрузки

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что существующая система управления электроприводом тянущих роликов МНЛЗ №5 не обеспечивает требуемого по технологии распределения усилий вытягивания слитка по электродвигателям тянущих

роликов в целях минимизации растягивающих продольных усилий в кристаллизующейся заготовке.

В результате экспериментальных (на МНЛЗ №5) и теоретических (на математической модели расчета распределения моментов нагрузки по электроприводам ТР) исследований установлено [1–3]:

- распределение реальных моментов нагрузки электродвигателей вдоль ЗВО носит неравномерный, случайный характер и при изменении таких технологических факторов, как скорость вытягивания слитка, сечение слитка, марка стали, проведение текущих и капитальных работ, непредсказуемо изменяется;

- распределение значений реальных моментов нагрузки существенно отличается от требуемых по технологии значений моментов нагрузки, рассчитанных на математической модели;

- несоответствие реальных значений моментов нагрузки требуемым по технологии значениям моментов приводит к формированию в теле отливаемой заготовки существенных (до 300 кН) продольных растягивающих усилий, что в свою очередь приводит к снижению качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок;

- в целях уменьшения растягивающих продольных усилий необходимо в процессе вытягивания слитка поддерживать значения моментов нагрузки электродвигателей на радиальном, криволинейном и в первой группе горизонтального участка (секция № 9) на уровне требуемых по технологии значений;

- требуемое по технологии распределение моментов нагрузки по электродвигателям ТР в процентном отношении относительно величины общего момента нагрузки при изменении основных технологических факторов практически остается неизменным;

- в системе управления электроприводом ТР должна быть предусмотрена возможность в рабочем режиме вытягивания слитка поддержания на заданных уровнях значений моментов нагрузки электродвигателей радиального, криволинейного и первой группы горизонтального участков;

- вторая группа электродвигателей горизонтального участка должна обеспечивать с точностью не ниже 1% поддержание на заданном уровне значений скорости литья заготовки.

На основании существующей системы управления электроприводом МНЛЗ разработана функциональная схема электропривода тянущих роликов и алгоритм управления электроприводом, реализующие требуемое по технологии распределение моментов вытягивания слитка по электродвигателям вдоль линии ЗВО МНЛЗ [2, 3].

Система автоматического управления электроприводом тянущих роликов ЗВО выполнена двухуровневой с индивидуальным электроприводом каждого тянущего ролика.

Функциональная схема, реализованная в управляющем контроллере верхнего уровня, представлена на рис. 5. В схеме реализован регулятор скорости (РС) ручья, который формирует на выходе необходимую величину суммарного момента электропривода ЗВО $M_{сум}$.

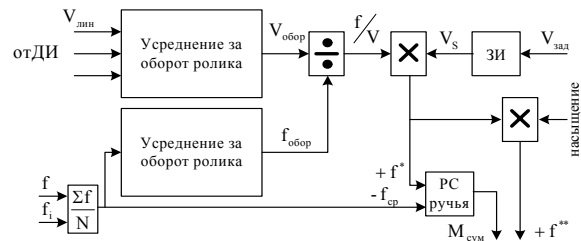


Рис. 5. Функциональна схема РС ручья

На входе РС ручья сравниваются заданное с выхода множительного элемента значение частоты (скорости вытягивания слитка) f^* электропривода ЗВО и усредненное по числу работающих электродвигателей N ручья действительное значение частоты (скорости вытягивания слитка) $f_{ср}$ электропривода ЗВО. Величина скорости вытягивания слитка формируется на основании сигналов с выходов импульсных датчиков, установленных на трех роликах различного диаметра (для ручья 1 это ролики 23, 44 и 94, для ручья 2 – ролики 22, 43 и 85). Датчик обеспечивает формирование 200 импульсов за один оборот вала датчика. Сигналы с выходов импульсных датчиков усредняются за один оборот ролика, после чего формируется значение линейной скорости за один оборот ролика $V_{обор}$. На основании величины среднего значения значения сигнала частоты работающих электродвигателей $f_{ср}$ выполняется формирование усредненного за один оборот ролика значения частоты $f_{обор}$. На выходе делительного устройства формируется среднее значения отношения $f_{обор}/V_{обор}$, которое после умножения на заданное значение линейной скорости вытягивания слитка, формируемое на выходе задатчика интенсивности (ЗИ) ручья, обеспечивает величину задания частоты f^* , подаваемую на вход РС ручья и на задание частоты каждого работающего электродвигателя ЗВО.

В управляющем контроллере верхнего уровня хранятся массивы данных требуемого по технологии разлива данного слитка распределения моментов нагрузки по каждому электродвигателю тянущих роликов и значения коэффициентов загрузки каждого электродвигателя ЗВО, а также массивы данных моментов холостого хода электродвигателей для заданной скорости вытягивания слитка. На выхо-

де управляющего контроллера формируются сигналы для электропривода каждого тянущего ролика: суммарный момент электропривода ЗВО $M_{\text{сум}}$, заданное значение частоты f^{**} (скорости вытягивания слитка); коэффициент загрузки $K_{\text{заг}}$; момент холостого хода $M_{\text{хх}}$.

Функциональная схема системы регулирования электропривода одного тянущего ролика, реализованная в преобразователе частоты, представлена на рис. 6.

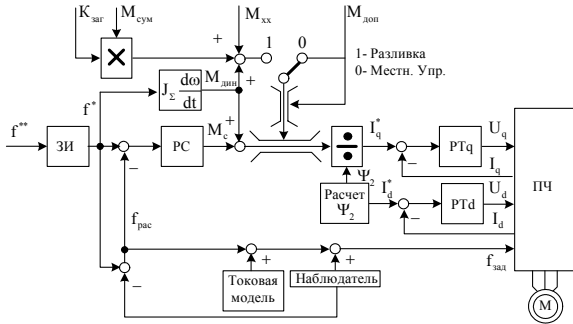


Рис. 6. Функциональная схема электропривода тянущего ролика

Система регулирования состоит из двух контуров регулирования, выполненных по принципу подчиненного регулирования с последовательной коррекцией без датчика обратной связи по скорости вращения электродвигателя. В системе регулирования предусмотрено ограничение величины момента электропривода на уровне предельно допустимого по условиям прочности механического оборудования.

Величина заданного момента формируется воздействием на ограничение задания величины момента $M_{\text{дв}}$ на входе формирования заданного тока статора I_q , на входе регулятора тока РТ I_q . Величина заданного момента электродвигателя формируется на основании сигналов, поступающих из управляющего контроллера верхнего уровня: заданного суммарного момента $M_{\text{сум}}$ электропривода ЗВО, коэффициента загрузки $K_{\text{заг}}$ конкретного электродвигателя тянущего ролика и момента холостого хода $M_{\text{хх}}$ данного электродвигателя. Произведение коэффициента загрузки на величину суммарного момента определяет величину статического момента электродвигателя

Лукьянов Сергей Иванович,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», проректор по инновационным технологиям и инвестициям, профессор, доктор технических наук, член-корреспондент Академии электротехнических наук, e-mail: ntc@magtu.ru

Фомин Николай Владимирович,

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», старший преподаватель кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, телефон +7 (3519) 29-85-29, e-mail: nick-mgn@yandex.ru

$M_{\text{ст}}$. Добавление динамической составляющей момента двигателя и составляющей момента холостого хода формирует величину полного момента электродвигателя, требуемую по технологии для вытягивания данного слитка.

Список литературы

1. Автоматизированная система контроля и управления МНЛЗ / Д.Х. Девятков, С.И. Лукьянов, О.С. Логунова и др. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – 640 с.
2. Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Хлыстов А.И. Многодвигательный электропривод тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок. Электроприводы переменного тока // Труды Междунар. XV науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2012. – 323 с.
3. Разработка системы управления электроприводом тянущих роликов криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком / С.И. Лукьянов, Н.В. Фомин, Д.М. Демкин и др. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Ч. 3. – 244 с.
4. Лукьянов С.И., Фомин Н.В., Хлыстов А.И. Расчет продольных усилий в слитке МНЛЗ. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – Ч. II. – 245 с.

References

1. Devyatov, D.Kh., Luk'yanov, S.I., Logunova, O.S., Suspitsyn, E.S., Tutarova, V.D., Shvidchenko, D.V. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya MNLZ* [Automated Control System of Blanks Continuous Casting Machine]. Magnitogorsk, MGTU, 2009. 640 p.
2. Luk'yanov, S.I., Fomin, N.V., Khlystov, A.I. *Mnogodvigatel'nyy elektroprivod tyanushchikh rolikov mashiny nepreryvno lit'ya zagotovok. Elektroprivody peremennogo toka* [Multimotor Drive of Pulling Rollers of Blanks Continuous Casting Machine]. *Trudy XV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Works of the XVth International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo UMTs UPI, 2012. 323 p.
3. Luk'yanov, S.I. Fomin, N.V., Demkin, D.M., Khlystov, A.I., Luk'yanov, E.S. *Razrabotka sistema upravleniya elektroprivodom tyanushchikh rolikov krivolineynoy MNLZ s vertikal'nym uchastkom* [Development of Control System of Pulling Rollers of Blanks Continuous Casting Curving Machine with vertical Sector]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, issue 3, part 3. 244 p.
4. Luk'yanov, S.I., Fomin, N.V., Khlysto, A.I. *Raschet prodol'nykh usiliy v slitke MNLZ* [Calculation of Longitudinal Stresses in Ingots of Blanks Continuous Casting Machine]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh»* [International Collected Scientific Works on Mathematical and Computer Software of Systems in Industrial and Social Fields]. Magnitogorsk, Izdatel'stvo Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova, 2011, part 2. 245 p.

Хлыстов Алексей Иванович,
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
зам. главного энергетика ОАО «ММК» по электрооборудованию и автоматизации,
телефон +7 (3519) 24-72-68,
e-mail: hlystov@mmk.ru

Лукьянов Евгений Сергеевич,
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
ведущий инженер по наладке и испытаниям электрооборудования ЦЭТЛ,
телефон +7 (3519) 24-71-49,
e-mail: ntc@magtu.ru