

УДК 621.771

**РАЗРАБОТКА ПАРАДИГМЫ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНИКА ПО
ДИСЦИПЛИНЕ «ОСНОВЫ ДИНАМИКИ И НАДЕЖНОСТИ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ»****Андрей Анатольевич Мальцев**

доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

экономический университет (РИНХ).

kafedra37@bk.ru

Аннотация

Разработана концепция электронного учебника по основам динамики и надежности металлургического оборудования, направленная на формирование у студентов профессиональной компетенции с формулировкой «Способность использовать современные методы моделирования, исследования и расчетов технологических комплексов в металлургическом производстве» на примере проектирования локомотивного металлургического завода нового поколения.

Ключевые слова: учебник, металлургия, электропривод, локомотив, динамика, проектирование.

**DEVELOPMENT OF THE PARADIGM OF AN ELECTRONIC TEXTBOOK ON
THE DISCIPLINE "FUNDAMENTALS OF DYNAMICS AND RELIABILITY OF
METALLURGICAL EQUIPMENT"****Andrey A. Maltsev**

Associate Professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 Departments

e-mail: a.a.mal@bmstu.ru

ABSTRACT

The concept of an electronic textbook on the basics of dynamics and reliability of metallurgical equipment has been developed, aimed at forming students' professional competence with the formulation "The ability to use modern methods of modeling, research and calculations of technological complexes in metallurgical production" on the example of designing a new generation locomobile metallurgical plant.

Keywords: textbook, metallurgy, electric drive, locomobile, dynamics, design.

Актуальность и цель исследования

Цель исследования – разработка парадигмы электронного учебника «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» как интерактивного средства обучения студентов по специальности «Проектирование технологических машин и комплексов».

По мнению автора, в основу концепции современного учебника целесообразно заложить некоторую творческую деловую игру, такую как «Конструирование локомотивного литейно-прокатного металлургического nano-завода», предусматривающую имитацию реальных заводских условий и ситуаций, а именно, анализ конкретных технологических операций, связанных с литьем и прокаткой металлических заготовок, математическое моделирование крутильно-колебательных процессов, возникающих в электроприводах рабочих клетей при прокатке и угрожающих негативными последствиями для работоспособности оборудования.

Для транспортировки сырья, в качестве которого планируется использовать скрап (металлическую шихту для электропечи) – стальной кусковой лом (масса куска 0,5 ... 40 кг, размеры – не более 300×200×150 мм) и брикеты из стальной стружки, будет задействован скраповоз (рис. 1).

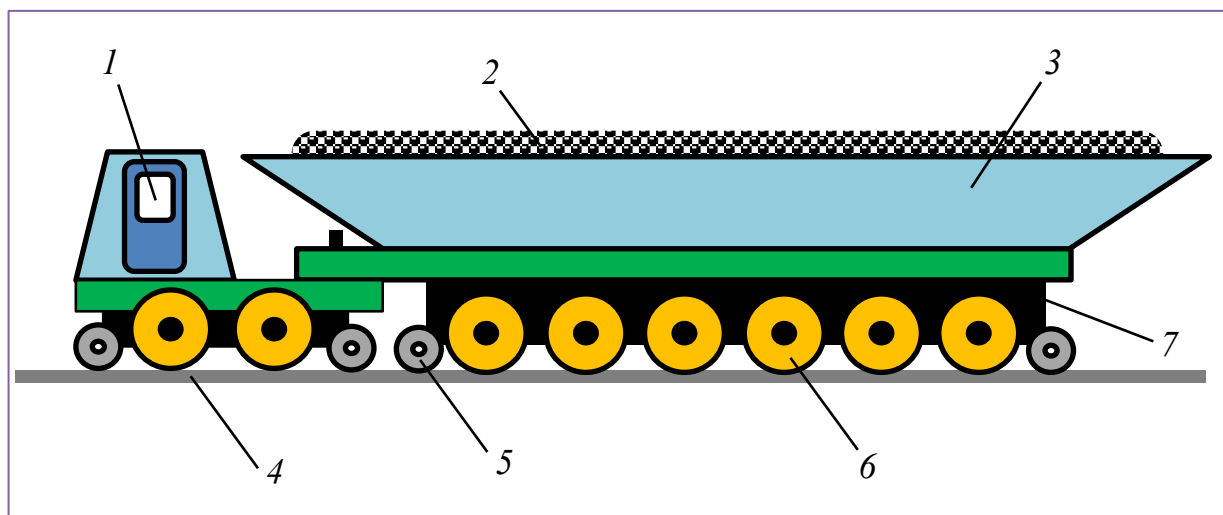


Рисунок 1. Локомотивный скраповоз:

- 1 – кабина водителя с пультом;
- 2 – скрап для электропечи;
- 3 – контейнер для скрапа;
- 4 – рельсовый путь;
- 5 – рельсовое колесо;
- 6 – пневматическое колесо;
- 7 – самоходное шасси

Для загрузки-разгрузки скрапового контейнера понадобится локомотивный подъемно-поворотный кран стрелового типа (рис. 2).

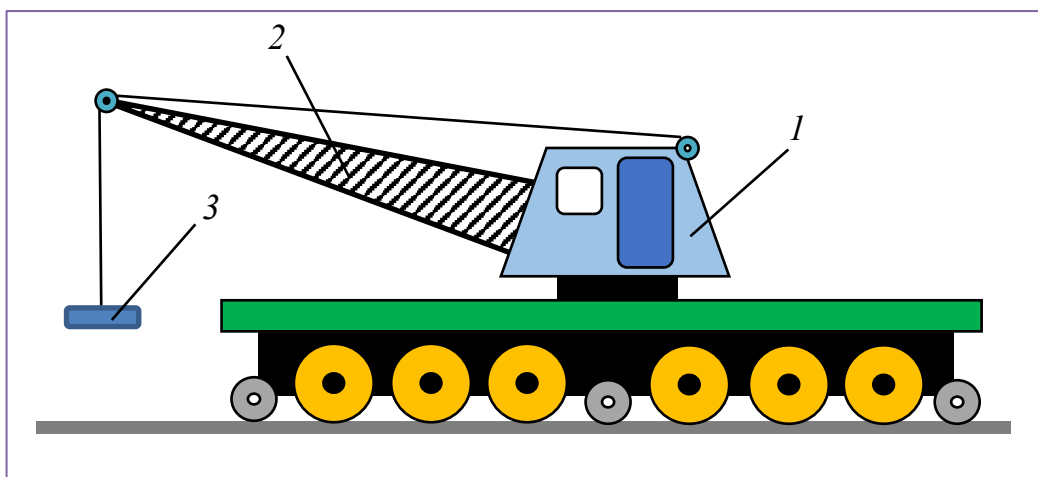


Рисунок 2. Локомотивный полноповоротный стреловой кран:

- 1 – башня с кабиной крановщика;
- 2 – стрела решетчатой конструкции;
- 3 – электромагнит для скрапа

При обсуждении проекта nano-завода обязательно будет выявлена проблема, связанная с недостаточной производительностью машины непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) из-за низкой скорости кристаллизации стали, намечены пути усовершенствования конструкции МНЛЗ (рис. 3).

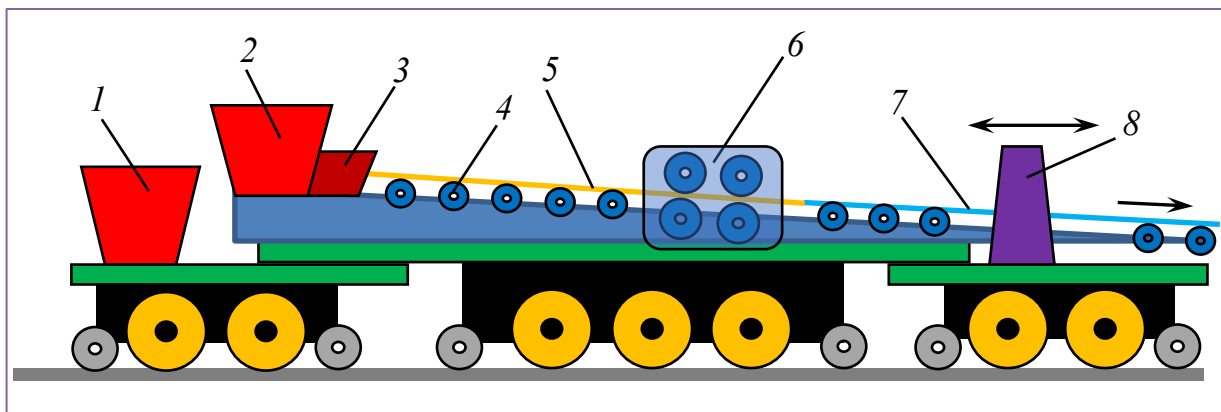


Рисунок 3. Локомотивная МНЛЗ:

- 1 – сталеразливочный ковш;
- 2 – промежуточный ковш;
- 3 – кристаллизатор;
- 4 – ролик рольганга;
- 5 – слиток (заготовка);
- 6 – механизм вытягивания слитков;
- 7 – затравка;
- 8 – летучие ножницы

Предполагается, что широкополосный прокатный стан включит в себя пять черновых клетей с главными электроприводами переменного тока и семь чистовых клетей с главными электроприводами постоянного тока. Каждая рабочая клеть прокатного стана будет выполнена как отдельный локомотив (рис. 4).

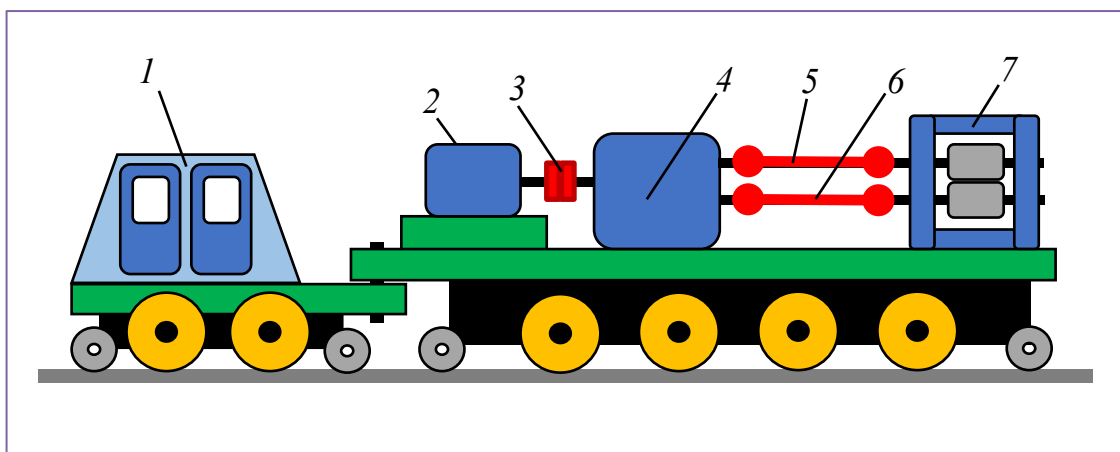


Рисунок 4. Локомотивная рабочая клеть:

- 1 – кабина водителя с пультом;
- 2 – электродвигатель;
- 3 – муфта моторная;
- 4 – редуктор-шестеренная клеть;
- 5 – шпиндель верхний;
- 6 – шпиндель нижний;
- 7 – рабочая клеть

Перед студентами будет поставлена задача оценить усталостную прочность и вероятность безотказной работы деталей и узлов электроприводов рабочих клеток прокатного стана.

Деловая игра не исключает также дискуссии по поводу порядка размещения на рельсовом пути оборудования проектируемого технологического комплекса чрезвычайно гибкой конфигурации, а также по поводу рентабельности и экологичности перспективного металлургического nano-завода.

В настоящий момент автору неизвестны ни отечественные, ни зарубежные внедренные в производство аналоги локомотивных металлургических nano-заводов, хотя уже существуют «похожие» производства, например асфальтобетонные, мусороперерабатывающие передвижные (перевозимые) заводы и комплексы. Разрабатываемый локомотивный nano-завод визуально может быть похож на железнодорожные путевые машины, к которым относятся машины для ремонта земляного полотна, машины для балластировки и подъёмки пути, машины для очистки щебня и замены балласта, машины для сварки и шлифовки пути, машины для уплотнения балластной призмы, выправки и отделки пути, а также снегоуборочные машины.

Материалы и методы исследования

Апперцепирование и аспектный анализ как методы исследования научной литературы в Scopus и за его пределами обозначили вектор развития мирового металлургического производства в сторону строительства мини-, микро- и nano-заводов на базе литейно-прокатных агрегатов. Выявлены такие существенные проблемы интеграции технологических модулей, как проблема согласования различающихся в несколько раз скоростей непрерывной разливки и прокатки и проблема повышения качества слябов и сортовых заготовок.

Для решения этих проблем, с одной стороны, ведутся работы по модернизации машин непрерывного литья заготовок. Stulov and Aldunin (2017) привели основные результаты разливки слябов большого поперечного сечения по новой технологии, увеличивающей до 50% скорость кристаллизации в приповерхностном слое заготовки из низкоуглеродистой стали. Определены параметры и основные критерии подобия процесса

разливки стали в кристаллизатор, в частности, при изменении системы его охлаждения, замене материала стенок, перепаде температур металла (Stulov, 2018 a, b). Значительные успехи достигнуты в направлении математического моделирования терможидкостных и термогазодинамических процессов непрерывного литья заготовок (Singh and Das, 2016).

С другой стороны, найдена альтернатива машинам непрерывного литья заготовок: Zlobin and Zlobin (2013) разработали уникальную технологию на основе непрерывной центробежной разливки заготовки малого сечения 6 – 12 мм со скоростью 10 – 25 м/с для эффективного производства стальной катанки в бунтах массой 2,5 – 5,0 т при ограниченном годовом выпуске 50 – 100 тыс. т. Исходная заготовка отливается в виде кольца, которое на выходе из литейной машины режется и правится прокаткой в прямоугольную полосу. Новая металлургическая технология позволяет снизить капитальные затраты на тонну производимой продукции примерно в три раза.

В обоих случаях литейная машина интегрирована с многоклетьевым прокатным станом и грузоподъемным оборудованием в единый литейно-прокатный агрегат.

Сама возможность транспортировки металлургического оборудования по железнодорожному пути косвенно подтверждена тем, что австрийская компания «Plasser & Theurer» совместно с венгерской фирмой «Swietelsky» изготовили гигантский робот-путьекладчик RU 800 S массой до 700 тонн в виде полукилометрового сборочного конвейера на рельсовом ходу. Однако, первый этап разработки на базе литейно-прокатного агрегата концепции перспективного локомотивного металлургического нано-завода окончился неудачей: выяснилось, что главные электроприводы прокатного стана значительно выступают за габариты подвижного состава (Maltsev, 2018, a).

Существуют следующие пути уменьшения габаритов прокатного стана: оптимизация кинематических схем и замена групповых электроприводов рабочих валков на индивидуальные; изготовление деталей из биметаллов, композитов и прочных неметаллических материалов; рационализация форм и сечений деталей; динамический расчет и прогнозирование усталостной долговечности опасных сечений деталей для устранения излишних запасов прочности.

Наглядный пример оптимизации кинематической схемы группового электропривода рабочих валков – замена в шестой рабочей клетке широкополосного стана 2000 пары электродвигателей постоянного тока электродвигателем переменного тока. Барабаш и Переходченко (2016) обосновали целесообразность такой оптимизации – ряд преимуществ асинхронного электродвигателя перед электродвигателем постоянного тока той же мощности, а именно: простота и надежность конструкции из-за отсутствия коллекторно-щеточного перехода, меньшая масса, габариты и стоимость; лучшая стойкость к перегрузкам при максимальных частотах вращения из-за отсутствия кругового коллекторного огня; возможность получить коэффициент мощности, близкий к единице, на входе частотного преобразователя или питающего трансформатора. Кроме того, не нужны промежуточный вал и его подшипниковая опора. Однако, имеется один существенный недостаток предложенной оптимизации: дополнительно к более скоростному электродвигателю переменного тока необходим понижающий редуктор с передаточным числом равным шести, а это значительно увеличивает габариты электропривода.

Pokrovskii (2014) на примере прокатного стана кварто доказал целесообразность перехода от цельнокованных опорных валков, изготовленных из низколегированных валковых сталей, к биметаллическим валкам с наплавкой из стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением. Долговечность биметаллических валков приблизительно в два раза выше, чем у цельнокованных валков из традиционных сталей.

Этот факт необходимо учесть при разработке алгоритма оптимизации электропривода рабочих валков шестой клетки широкополосного стана.

Любая реконструкция электропривода прокатного стана тесно связана с исследованием переходных процессов, потому что максимальные скорость, токи и моменты могут многократно превысить свои установившиеся значения. При конструировании новых прокатных станов, особенно в тех случаях, когда возможность создания опытных образцов исключена, невозможно получить точную экспериментальную информацию в виде осциллограмм о характере и степени нагружения деталей и узлов оборудования. Тем не менее, такая информация необходима для того, чтобы оценить циклический ресурс деталей, выявить слабые места в конструкции и принять меры к их устранению еще на стадии проектирования. Остается только один путь получения приблизительной информации о нагружении деталей и узлов – математическое моделирование.

Putnoki (2015) предложил для широкополосного стана 1680 динамическую модель взаимодействия клетей при прокатке. Модель состоит из уравнений, описывающих крутильные колебания валопровода электропривода рабочих валков и упругие колебания рабочей клетки, с учетом поведения электродвигателя, натяжения полосы между клетями, отклонения толщины полосы. Отмечена важность рассмотрения крутильных колебаний, без которых расчетные значения натяжения и отклонения толщины полосы на выходе уменьшаются до 30 %.

Krasnoshapka (2016) исследовал влияние нелинейной зависимости момента технологической нагрузки на динамические процессы в прокатных станах. Им установлено, что переменный характер технологической нагрузки с учетом разницы коэффициентов трения на поверхности заготовки в ряде случаев приводит к возникновению автоколебаний, а также неустойчивых колебаний в валопроводе привода прокатных станов.

Все электроприводы прокатных станов имеют зазоры в соединениях, наличие которых приводит к заметному увеличению динамических нагрузок, делает крутильно-колебательную модель нелинейной и асимметричной, что усложняет ее теоретический анализ.

В случае с рабочей клетью кварто возможны следующие виды асимметрии нагружения ветвей электропривода при прокатке: асимметрия относительного положения заготовки и рабочих валков; жесткостная асимметрия; люфтовая асимметрия; фрикционная асимметрия; анизотропийная асимметрия – неравенство температур верхней и нижней поверхностей заготовки (Maltsev, 2018, b).

Verenev et al. (2015) разработали для прокатных станов методы и способы диагностирования технического состояния главных линий привода валков, основанные на переходных процессах при захвате и выбросе полосы рабочими валками. Применение новых способов вместе с уже существующими, где используются параметры при установившемся режиме прокатки, открывают дополнительные возможности для совершенствования технологии, оборудования, режимов работы и содержания прокатных станов в работоспособном техническом состоянии.

Иногда для подавления механических колебаний требуются дополнительные меры, как в случае со станом ХПТ (Kolesnikov et al., 2018), где для уменьшения воздействия динамических усилий на ответственные узлы рабочей линии (шатуны, подшипники шатунов, коренные подшипники кривошипно-шатунного узла) при длительной эксплуатации оборудования необходимо оснащать приводной механизм системой компенсации динамических нагрузок.

В трансмиссию электропривода рабочих валков (между электродвигателем и редуктором) нужно установить вместо обычной муфты специальный измерительный вал для контроля крутящего момента.

Электродвигатели главных электроприводов рабочих клеток широкополосных станов горячей прокатки как правило не серийные, поэтому их тип и параметры на стадии проектирования оборудования согласовываются индивидуально.

Для большей эффективности прокатного производства и уменьшения габаритов электроприводов рабочих валков необходимо конструировать новые автоматизированные электроприводы на основе перспективных вентильно-индукторных электродвигателей. Различие в названиях вентильно-индукторного электродвигателя (двигатель с переменным магнитным сопротивлением, электронно-коммутируемый двигатель, бесконтактный реактивный двигатель, двигатель с электромагнитной индукцией, коммутируемый управляемый вентильный реактивный двигатель) объясняется только относительной новизной электрической машины, хотя сама ее концепция была сформулирована еще в начале 19 века.

Высокая перегрузочная способность в пусковом режиме (порядка 4-кратной номинальной величины), высокий КПД в режиме работы с неполной нагрузкой на валу, оптимальные массогабаритные показатели, высокие надежность, технологичность, ремонтпригодность и малая инерционность безобмоточного ротора (высокое быстродействие) могут сделать вентильно-индукторный электродвигатель наиболее распространенным во всех отраслях промышленности, в том числе и в металлургии. Основными недостатками вентильно-индукторного электродвигателя являются повышенный уровень вибрации и шума, а также значительные пульсации электромагнитного момента Petrushin et al. (2016).

Krasovskii (2017) рассмотрел возможность уменьшения пульсаций крутящего момента вентильно-индукторного электродвигателя при использовании распространенных способов ограничения фазного тока «voltagecontrol» и «currentcontrol». В зоне малых скоростей, где наиболее заметны пульсации, фазные токи двигателя обычно принудительно ограничивают, поэтому за счет запаса по напряжению при надлежащем выборе положений коммутации фаз можно в некоторых пределах повлиять на форму фазных токов и уменьшить пульсаций момента. Путем имитационного моделирования в среде Matlab-Simulink им найдены сочетания управляющих воздействий, минимизирующие пульсации момента.

Результаты исследования и заключение

Предложена следующая структура будущего электронного учебника:

1. титульный экран с аннотацией;
2. оглавление (схемокурс);
3. пять глав с изложением учебного материала;
4. словарь терминов (гlossарий);
5. список литературных источников.

В первой главе будет представлена физическая модель объекта исследования – валопровод электропривода, состоящий из упругих цилиндрических валов и массивных жестких дисков. Будет сказано, что изготовление экспериментальной физической модели в том же или уменьшенном масштабе (из разных марок конструкционной и инструментальной стали или их заменителей с теми же механическими инерционно-упругими и диссипативными свойствами) потребует значительных материальных и трудовых затрат, поэтому физическое моделирование целесообразно заменить математическим.

Во второй главе будут приведены дискретная расчетная схема и математическая запись крутильно-колебательной модели электропривода. Изучению подлежат крутильные колебания, возникающие в разветвленном валопроводе от ротора электродвигателя до

рабочих валков после ударного захвата ими переднего конца прокатываемой заготовки. Инерционно-упругие свойства деталей, зазоры и демпфирование в соединениях, внешний электромагнитный момент электродвигателя и момент технологического сопротивления определяют характер переходного процесса – коэффициент динамичности, частоту и продолжительность колебаний, влияющие на износостойкость и циклическую прочность элементов электропривода.

Третья глава будет посвящена особенностям программирования в компьютерной среде MathCAD и анализу полученных графических результатов. Применительно к валопроводу электропривода шестой рабочей клетки исследуемого прокатного стана уже запрограммирован вычислительный блок Given – Odesolve как решатель методом Рунге-Кутты системы, состоящей из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

В четвертой главе будет предложена структурно-параметрическая оптимизация электропривода шестой рабочей клетки, которая должна быть достигнута по следующим критериям: наименьшие металлоемкость, динамические нагрузки, расход энергии и себестоимость; наибольшие быстродействие, коэффициент полезного действия, циклическая прочность. В случае многокритериальной оптимизации задача будет сведена к поиску вектора целевых переменных, удовлетворяющего наложенным габаритным, прочностным и финансовым ограничениям и оптимизирующего векторную целевую функцию. Элементы вектора целевой функции иногда взаимно конфликтуют, что должно быть учтено при разработке алгоритма оптимизации. Поставленная задача линейного программирования имеет графическую интерпретацию только при двух и трех переменных. При большем количестве неизвестных, как в нашем случае, целевая функция должна описать гиперплоскость многомерного пространства.

В пятой главе будет рассмотрена методика обработки компьютерных графиков с выявлением амплитудного спектра напряжений в опасных сечениях деталей валопровода, а также метод Монте-Карло применительно к вероятностному прогнозированию циклической прочности деталей.

В электронном учебнике будут предусмотрены функция закладки и функция поиска текстовых фрагментов.

Таким образом, с учетом результатов литературного исследования разработана концептуальная структура модульного электронного учебника по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования», наиболее способствующая углубленному формированию у студентов профессиональной компетенции с формулировкой «Способность использовать современные методы моделирования, исследования и расчетов технологических комплексов в металлургическом производстве» на примере проектирования локомотивного металлургического завода нового поколения.

Список литературы:

1. Barabash, A.V. and Perehodchenko V.A. (2016), 'AC motors for wide-strip and thin-sheet hot rolling mills', *Stal*, No 2, pp.48-52.
2. Kolesnikov, A.G., Cherepanov, D.S., Chekulaev, A.V. and Mironova, M.O. (2018), 'Analysis of Drive Mechanisms for the Working Stand in Periodic Cold-Rolled Pipe Mills', *Metallurgist*, Vol.61, No.11-12, pp.1102-1107.
3. Krasovskii, A.B. (2017), 'Studies of torque ripple in a switched reluctance motor under a controlled average torque value in a low-velocity mode', *Russian Electrical Engineering*, Vol.88, No.5, pp.247-252.

4. Krasnoshapka, V.A. (2016), 'The peculiarities of the dynamic processes in controlled machine aggregates under variable technological loads', *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol.48, No.3, pp. 74–82.
5. Maltsev, A.A. (2018, a), 'On the complexities of making the layout of the electric drive of the rolling mill of the locomotive-driven new generation micro-plant', *Engineering bulletin*, No 2, [online] <http://ainjournal.ru/doc/864030.html> (Accessed 2 June 2019).
6. Maltsev, A. (2018, b), 'Influence of backlash asymmetry in the joints of rolling mill mill line on the performance of the 'weakest' section', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 194(3) [online] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032019/meta> (Accessed 3 May 2019).
7. Petrushin, A.D., Shevkunova, A.V. and Kashuba, A.V. (2016), 'Optimization of the switched-reluctance motor active part by the nelder-mead method', *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, Vol.327, No.6, pp.83–92.
8. Pokrovskii, A.M. (2014), 'Comparative analysis of the durability of solid-forged and bimetallic backup rolls on rolling mills', *Metallurgist*, Vol.57, No.9–10, pp.929–934.
9. Putnoki, A.Yu. (2015), 'Mathematical model of rolling dynamics when filling finishing train of wide-strip mill with strip', *Metallurgical and Mining Industry*, Vol.7, No.11, pp.218–222.
10. Singh, V. and Das, S.K. (2016), 'Thermo-fluid mathematical modeling of steel slab caster: Progress in 21st century', *ISIJ International*, Vol. 56, No. 9, pp.1509–1518.
11. Stulov, V.V. and Aldunin, A.V. (2017), 'Production technology of hot rolled plate of specified quality using new technics of large section slabs casting', *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, Vol.60, No.10, pp.798–803.
12. Stulov, V.V. (2018, a), 'On modeling processes in continuous casting mold', *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, Vol.61, No.2, pp.102–107.
13. Stulov, V.V. (2018, b), 'Temperature Differences in the Mold of a Continuous-Casting Machine with a New Cooling System', *Steel in Translation*, Vol.48, No.2, pp.78–81.
14. Verenev, V.V., Podobedov, N.I. and Korennoy, V.V. (2015), 'New methods of monitoring and diagnostics of the technical state of rolling mills', *Metallurgical and Mining Industry*, Vol.7, No.11, pp.143–147.
15. Zlobin, A.A. and Zlobin, S.A. (2013), 'Technology and equipment of a space-saving metallurgical complex for producing wire rod in coils', *Metallurgist*, Vol.57, No.1–2, pp.57–63.