

УДК 255:29.1

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЛЯБОВОГО ПОДЪЕМНИКА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК С ЦЕЛЬЮ ОГРАНИЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**О. А. Ребедак, С. А. Бакан**

Конструкторско-производственный центр «НКМЗ–Автоматика»

Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод»

ул. Орджоникидзе, 5, г. Краматорск, 84305, Украина. E-mail: co_r_s_ar@mail.ru

Н. А. Задорожний

Донбасская государственная машиностроительная академия

ул. Шкадинова, 72, г. Краматорск, 84313, Украина. E-mail: 4nd@list.ru

Описывается слябовый подъемник вертикальной машины непрерывного литья заготовок, его назначение и принцип работы. Приводятся осциллограммы переходных процессов, полученные при пусконаладочных работах. Для оптимизации динамических режимов работы слябового подъемника создана модель его двухмассовой электро-механической системы в среде MATLAB Simulink. Описана методика оптимизации электро-механической системы слябового подъемника по критерию максимального демпфирования колебаний в механической подсистеме средствами электропривода. Приведены полученные графики переходных процессов, и даны рекомендации для параметризации привода слябового подъемника.

Ключевые слова: слябовый подъемник, динамический режим, минимум колебательности.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СЛЯБОВОГО ПІДЙОМНИКА ВЕРТИКАЛЬНОЇ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТІВЕЛЬ З МЕТОЮ ОБМЕЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**О. О. Ребедак, С. А. Бакан**

Конструкторсько-виробничий центр «НКМЗ–Автоматика»

Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод»

вул. Орджонікідзе, 5, м. Краматорськ, 84305, Україна. E-mail: co_r_s_ar@mail.ru

М. О. Задорожній

Донбаська державна машинобудівна академія

вул. Шкадінова, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна. E-mail: 4nd@list.ru

Описується слябовий підйомник вертикальної машини безперервного лиття заготівель, його призначення та принцип роботи. Наводяться осцилограми перехідних процесів, отримані при пусконаладжувальних роботах. Для оптимізації динамічних режимів роботи слябового підйомника створено модель його двомасової електро-механічної системи в середовищі MATLAB Simulink. Описано методику оптимізації електро-механічної системи слябового підйомника за критерієм максимального демпфування коливань у механічній підсистемі засобами електроприводу. Наведено отримані графіки перехідних процесів, і дані рекомендації для параметризації приводу слябового підйомника.

Ключові слова: слябовий підйомник, динамічний режим, мінімум коливальності.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одним из важнейших узлов вертикальных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является слябовый подъемник. Его поломка влечет за собой внеплановую остановку разлива ручья, что является аварийной ситуацией. Механическая часть электропривода слябового подъемника представляет собой систему связанных масс, движущихся с различными скоростями. При нагружении элементы конструкции подъемника упруго деформируются. Величина деформаций определяется жесткостью упругих связей. За счет этих явлений в механической части подъемника возникают колебания. Данные колебания являются полностью вредными и ухудшают качество переходных процессов [1]. В данном исследовании по результатам пусконаладочных работ предложена настройка регулятора скорости электропривода подъемника слябов по критерию максимального демпфирования колебаний механической части. Данная настройка позволит минимизировать колебательные процессы и снизить динамические нагрузки на оборудование.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Вертикальная машина непрерывного литья заготовок была разработана и изготовлена на Новокрама-

торском машиностроительном заводе (г. Краматорск, Украина) по заказу Новолипецкого металлургического комбината (г. Липецк, Россия). Монтаж и ввод в эксплуатацию осуществлен во второй половине 2011 – начале 2012 года. Общая высота МНЛЗ составляет 51,4 м. Машина возвышается на 23,6 м над уровнем пола цеха и уходит на 27,8 м ниже уровня пола. Кратко процесс работы можно описать следующим образом. Ковш с жидким металлом устанавливается сверху МНЛЗ на поворотную платформу (+21,9 м), и после установки поворотной платформы в требуемом положении переливается в промковш (+18,0 м). Из промковша жидкая сталь поступает в кристаллизатор (+15,8 м). После выхода из кристаллизатора сляб проходит через три группы опорных роликов (+14,6...+8,3 м) и попадает в группу тянущих роликов (+8,3...+0,4 м), после чего попадает в тянущую клеть (+0,4...-4,1 м). После выхода из тянущей клетки сляб требуемой длины отрезается с помощью машин газовой резки (-6,2 м). Отрезанный сляб в корзине слябового подъемника (рис. 1) опускается вертикально вниз (-27,8 м). При достижении нижней точки с помощью системы качающихся путей (рис. 2) корзина переводится в наклонное положение и по наклонным путям сляб вы-

водится на выдачу (+0,8 м). После выдачи сляба корзина слябового подъемника возвращается назад для принятия следующего сляба.

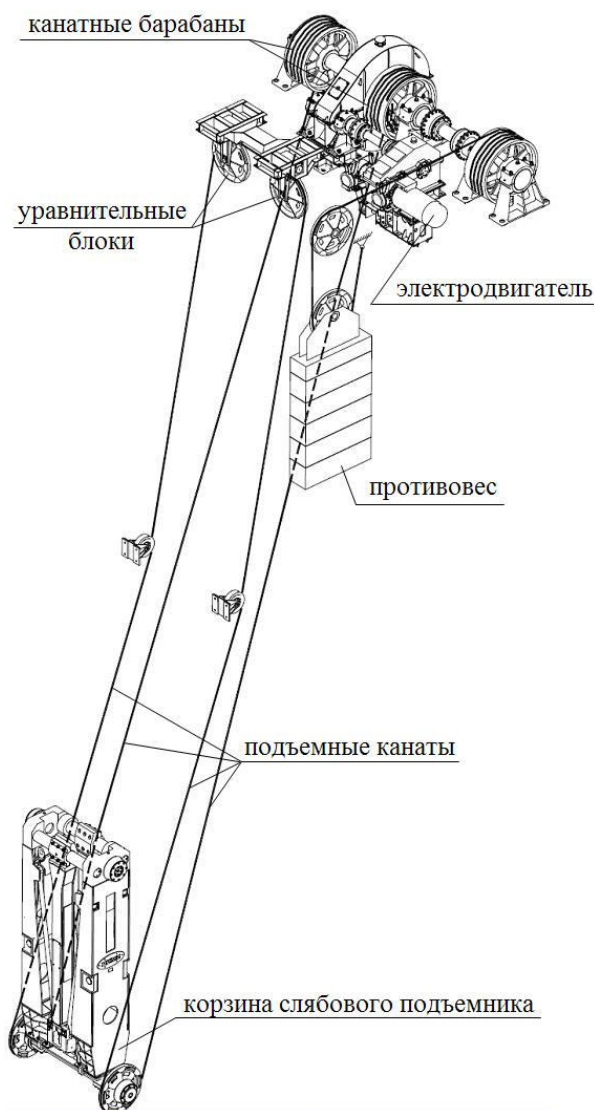


Рисунок 1 – Общий вид слябового подъемника вертикальной МНЛЗ

Из описания технологического процесса можно видеть, что слябовый подъемник является одним из важнейших узлов вертикальной МНЛЗ. Его поломка влечет за собой внеплановую остановку разливки, поскольку не будет возможности извлекать отлитые слябы. При этом прекращается подача жидкой стали из промковша в кристаллизатор, что является аварийной ситуацией.

При нагружении слябом элементы конструкции подъемника слябового подъемника упруго деформируются. За счет деформаций в механической части подъемника возникают колебания. Эти колебания ускоряют усталостный износ механизмов, повышают токовую нагрузку на частотный преобразователь и двигатель, снижают энергетические показатели электропривода, повышают риск возникновения аварийных ситуаций, ухудшают показатели качества переходных процессов. Частота колебаний механической системы определяется наименее жесткими

элементами кинематической цепи (в данном случае это подъемные канаты).

Система управления слябовым подъемником представляет собой систему подчиненного регулирования с ПИД-регулятором скорости двигателя и обратной связью по скорости двигателя. В качестве управляемого выпрямителя используется частотный преобразователь Simovert Masterdrives Vector Control фирмы Siemens.

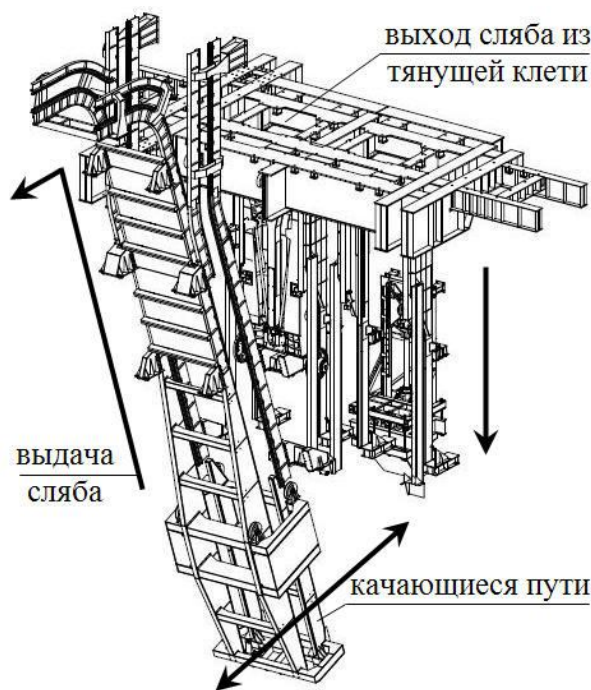


Рисунок 2 – Общий вид путей тележки слябового подъемника вертикальной МНЛЗ

При проведении пусконаладочных работ были получены осциллограммы скорости, тока и момента двигателя слябового подъемника. Построение осциллограмм осуществлялось с помощью программы DriveMonitor фирмы Siemens. Текущие показатели скорости, тока и момента передаются в программу по сети ProfibusDP в словах состояния привода. Частота дискретизации составляет 12 мс.

Типовая осциллограмма приведена на рис. 3. На данной осциллограмме представлены ток, момент, заданная и фактическая скорость двигателя при движении корзины вверх по наклонному участку путей со слябом 25 т. В области 1 (рис. 3) (увеличено) можно четко проследить характерную особенность электромеханических систем с упругими связями: крутящий момент электродвигателя деформирует упругие звенья кинематической цепи (при этом тележка остается на месте), а затем запасенная потенциальная энергия деформированных элементов приводит в движение тележку (при этом момент двигателя сначала уменьшается, а затем снова начинает нарастать). То есть происходит циркуляция реактивной энергии, которая нагружает оборудование, но не совершает полезной работы. В области 2 на рис. 3 (увеличено) хорошо прослеживаются колебания наименее жесткого элемента кинематической цепи слябового подъемника – подъемных канатов.

Также видно, что совместно с низкочастотными колебаниями канатов происходят колебания более высокой частоты вала канатных барабанов. Из графика момента на рис. 3 можно видеть, что затухание вредных колебаний в механической части оборудования очень слабое и колебания присутствуют с момента окончания разгона и до полного останова подъемника.

Наличие данных колебаний объясняется просто.

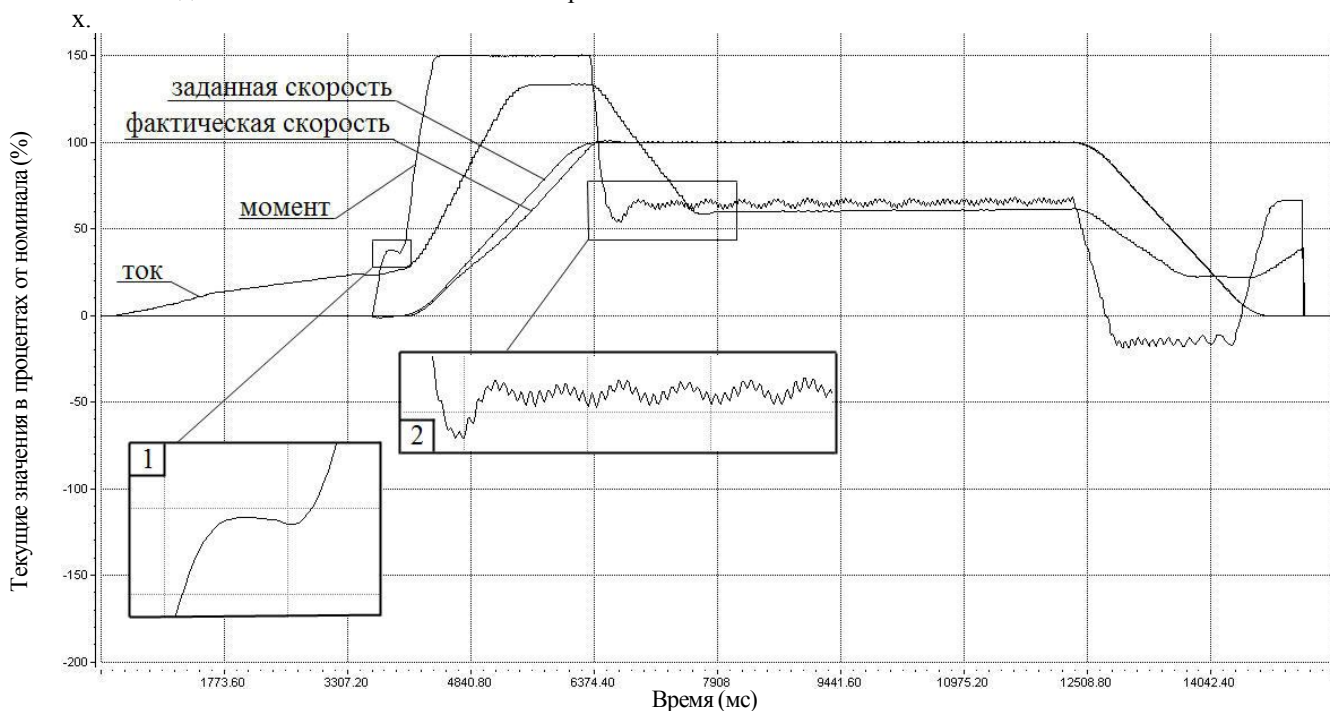


Рисунок 3 – Осциллограммы тока, момента, заданной и фактической скорости двигателя при движении корзины подъемника вверх по наклонному участку путей со слябом 25 т

Для улучшения качества переходных процессов в электромеханической системе слябового подъемника было решено промоделировать его работу в среде MATLAB Simulink. Для создания модели была составлена линеаризованная функциональная схема электромеханической системы слябового подъемника (рис. 4). На ней представлены: ЗС – задатчик скорости; ПИД-РС – ПИД-регулятор скорости;

ПЧ – преобразователь частоты; TV – питающий трансформатор; БЗ – блок защиты; ЭМП – электромеханический преобразователь; РЕД – редуктор; РМ – рабочий механизм; ДС – датчик скорости. В функциональной схеме отсутствует внутренняя отрицательная связь по противо-ЭДС, поскольку она однозначно улучшает свойства электромеханической системы.

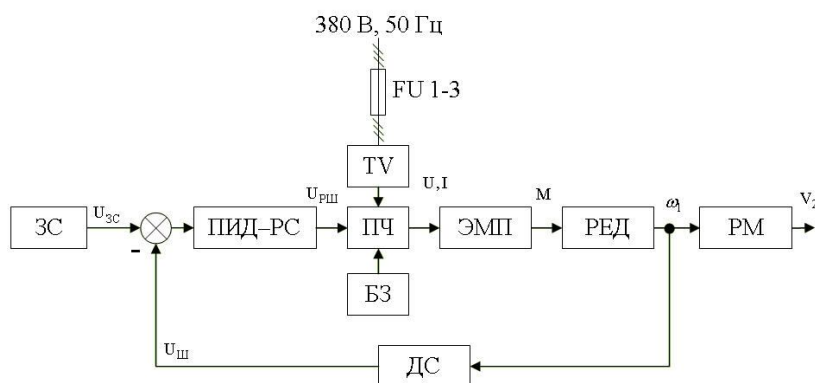


Рисунок 4 – Функциональная схема электромеханической системы слябового подъемника вертикальной МНЛЗ

Для составления математической модели слябового подъемника был произведен расчет и приведение к валу двигателя моментов инерции и жесткостей связей, определены собственные частоты колебаний элементов механической конструкции. Особенностью данного механизма является переменный момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя (меняется масса сляба) и переменная жесткость механической связи (изменение длины подъемных канатов).

Затем на основе математического описания физических процессов, протекающих в электромеханической системе слябового подъемника, системой обыкновенных дифференциальных уравнений и использования преобразований Лапласа создана математическая модель многомассовой электромеханической системы слябового подъемника с ПИД-регулятором и обратной связью по скорости двига-

теля в пакете прикладных программ MATLAB Simulink. Проведено моделирование типового цикла работы слябового подъемника, получены графики переходных процессов для основных координат системы, на основе которых были сделаны выводы об адекватности модели реальным процессам в объекте.

При имитационном моделировании были промоделированы двух, трех и четырехмассовые математические модели электропривода слябового подъемника при разгоне, наброске нагрузки, сбросе нагрузки и торможении. Исходя из условия сохранения энергии, для дальнейшего упрощения расчетов система была приведена от четырех масс к двум. Математическая модель двухмассовой электромеханической системы в среде MATLAB Simulink представлена на рис. 5.

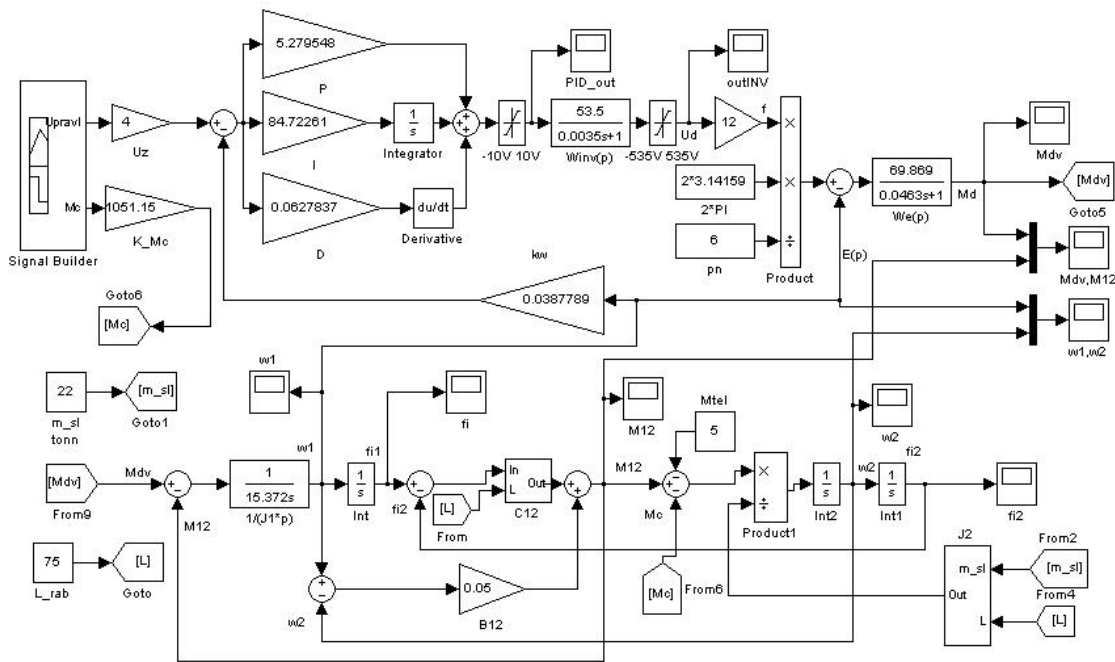


Рисунок 5 – Математическая модель двухмассовой электромеханической системы в среде MATLAB Simulink

После составления математической модели была проведена оптимизация двухмассовой электромеханической системы слябового подъемника по критерию минимума колебательности [2]. Для установления процессов электромеханического взаимодействия была исследована линеаризованная электромеханическая система слябового подъемника. Характеристический полином этой системы имеет вид:

$$Q(p) = T_u T_r \tau T_0^2 p^5 + T_r \tau T_0^2 p^4 + \tau (\gamma T_0^2 + T_u T_r) p^3 + (\gamma T_0^2 + T_r \tau) p^2 + \varphi + 1.$$

При синтезе параметров ПИД-регулятора скорости для двухмассового объекта характеристическое уравнение для случая предельного демпфирования упругих механических колебаний представляется в следующем виде:

$$(T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1) \left(\frac{T_0}{\xi_0} p + 1 \right) = 0 \cdot (1)$$

После преобразования характеристическое уравнение можно привести к стандартному виду:

$$p^5 + \alpha_4 \omega_0 p^4 + \alpha_3 \omega_0^2 p^3 + \alpha_2 \omega_0^3 p^2 + \alpha_1 \omega_0^4 p + \alpha_0 \omega_0^5 \cdot (2)$$

Коэффициенты стандартной формы записи выражаются через желаемое (оптимальное) значение коэффициента демпфирования ξ_0 . В общем случае для произвольного значения коэффициента демпфирования коэффициенты могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \xi_0; \\ \alpha_1 = 4\xi_0^2 + 1; \\ \alpha_2 = (4\xi_0^2 + 6)\xi_0; \\ \alpha_3 = 2(4\xi_0^2 + 1); \\ \alpha_4 = 5\xi_0. \end{cases} \quad (3)$$

После приведения характеристического полинома электромеханической системы слябового подъемника в стандартной форме и приравнивания коэффициентов при соответствующих степенях полинома составляется следующая система алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_4 \omega_0 = \frac{1}{T_\mu}; \\ \alpha_3 \omega_0^2 = \frac{\gamma T_O^2 + T_\mu T_T}{T_\mu T_T T_O^2}; \\ \alpha_2 \omega_0^3 = \frac{\gamma T_O^2 + T_T \tau}{T_\mu T_T \tau T_O^2}; \\ \alpha_1 \omega_0^4 = \frac{1}{T_\mu T_T T_O^2}; \\ \alpha_0 \omega_0^5 = \frac{1}{T_\mu T_T \tau T_O^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Отсюда находятся неизвестные величины.

Для иллюстрации эффективности предлагаемой методики подставим полученные значения коэффициентов ПИД-регулятора скорости для случая настройки

системы на минимум колебательности в математическую модель двухмассовой электромеханической системы слябового подъемника вертикальной МНЛЗ. Про моделируем типичный режим работы (разгон – наброс нагрузки – сброс нагрузки – торможение) и приведем графики переходных процессов для основных координат системы. На рис. 6 представлен переходный процесс по скорости первой (а) и второй (б) масс в двухмассовой модели слябового подъемника при настройке ПИД-регулятора скорости на минимум колебательности. На рис. 7 представлен переходный процесс по моменту двигателя (а) и упругому моменту (б) в двухмассовой модели слябового подъемника при настройке ПИД-регулятора скорости на минимум колебательности.

Если сравнить осциллограммы скорости двигателя, полученные в результате пусконаладочных работ (рис. 3) и в результате моделирования (рис. 6,а), можно видеть, что ротор двигателя стал активно вовлекаться в колебания механической подсистемы слябового подъемника. В результате происходит активное демпфирование колебаний в механической подсистеме с помощью электродвигателя. Если сравнить график момента пусконаладочных работ (рис. 3) и график момента, полученный при моделировании, то можно видеть, что характер переходных процессов заметно улучшился.

Результаты, полученные при моделировании, рекомендованы к использованию при выполнении параметризации привода слябового подъемника вертикальной МНЛЗ.

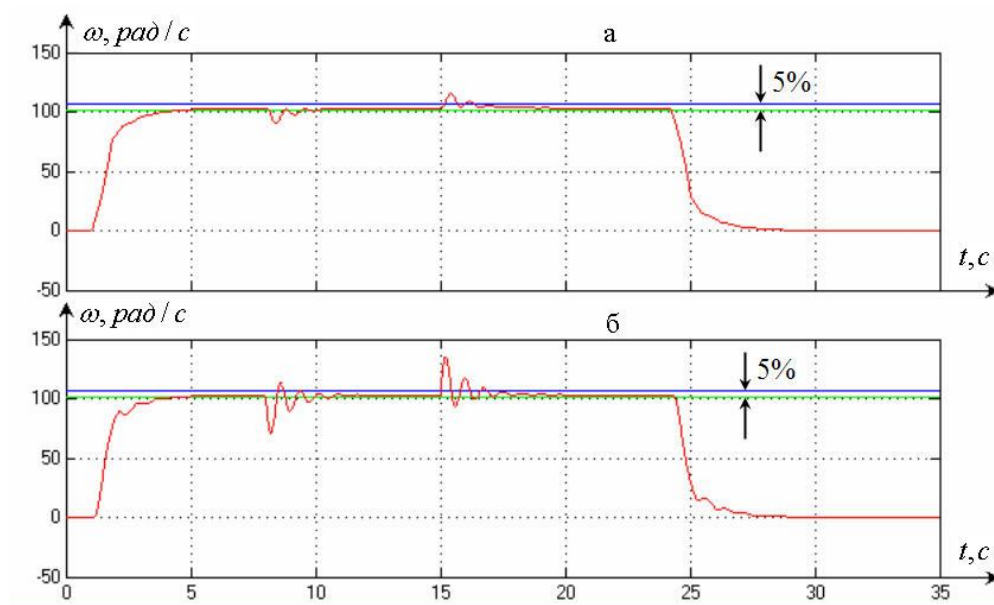


Рисунок 6 – Переходный процесс по скорости первой (а) и второй (б) масс в двухмассовой модели слябового подъемника при настройке ПИД-регулятора скорости на минимум колебательности

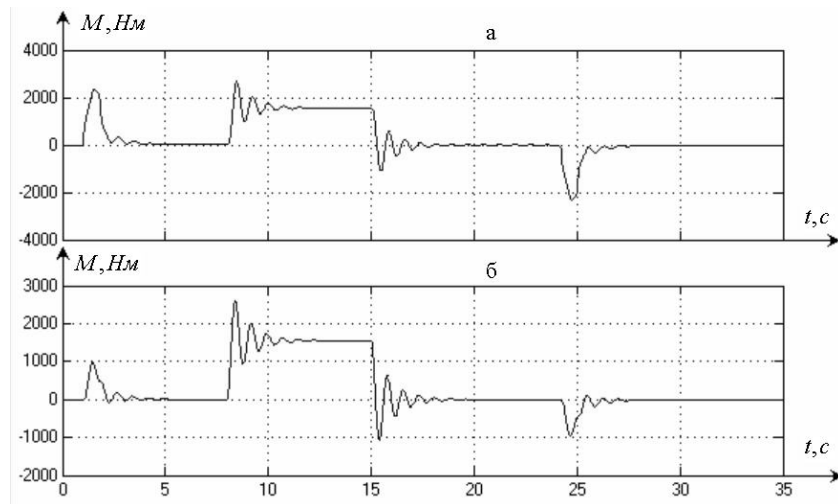


Рисунок 7 – Переходний процес по моменту двигателя (а) и упругому моменту (б) в двухмассовой модели слябового подъемника при настройке ПИД-регулятора скорости на минимум колебательности

ВЫВОДЫ. В работе описывается слябовый подъемник вертикальной МНЛЗ производства ПАО «НКМЗ». Показана значимость этого узла МНЛЗ в общем цикле разливки стали. Приведены осциллограммы, полученные в результате пусконаладочных работ на слябовом подъемнике, и указаны особенности настройки электропривода.

Для исследования динамических режимов работы слябового подъемника вертикальной МНЛЗ в среде приложения MATLAB Simulink составлена математическая модель. Для составления модели были рассчитаны и приведены к валу двигателя моменты инерции деталей и жесткости механических связей между элементами кинематической цепи.

Затем на модели была проведена оптимизация электромеханической системы слябового подъемника по критерию минимума колебательности и получены графики переходных процессов для основных координат системы.

Практическая ценность данного решения заключается в снижении динамических нагрузок на обрудование, снижении токовой нагрузки на двигатель и частотный преобразователь, улучшении энергетических показателей электропривода и снижения риска возникновения аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода – М.: Энергия, 1971 – 320 с.
2. Задорожний Н.А. Элементы теории электро-механического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями: учебное пособие по дисциплине «Теория электропривода» для студентов специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» дневной формы обучения. Часть вторая. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 148 с.

OPTIMIZATION OF SLAB CASTER LIFTS IN ORDER TO REDUCE THE DYNAMIC LOADS

O. Rebedak, S. Bakan

Design and production center «NKMZ-Automatica»
Public Joint Stock Company «Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod»
vul. Ordzhonikidze, 5, Kramatorsk, 84305, Ukraine. E-mail: co_r_s_ar@mail.ru

N. Zadorozhnyi

Donbass State Engineering Academy
ul. Shkadinova, 72, Kramatorsk, 84313, Ukraine. E-mail: 4nd@list.ru

The article describes the vertical lift slab caster, its purpose and principle of operation. We present transient waveforms obtained at commissioning. To optimize the dynamic modes of slab lift its two-mass model designed electromechanical system in an environment MATLAB Simulink. A technique for optimizing the electromechanical system of the lift slab on the criterion of maximum damping of oscillations in the mechanical subsystem by means of the drive. Graphic shows the obtained transients and recommendations for the parameterization of the drive slab lift.

Key words: slab-lift, dynamic mode, a minimum of oscillation.

REFERENCES

1. Klyuchev V.I. *Limitation of the electric drive dynamic loads.* – М.: Energiya, 1971. – 320 p. [in Russian]
2. Zadorozhnyi N.A. *Elements of the theory of electromechanical interaction in the two-mass drive system with elastic mechanical connections: a training manual on discipline «Theory of electric drive» for the students specialty «Electromechanical systems of automation*

and electric drive» full-time education. Part Two. – Kramatorsk: DSEA, 2007. – 148 p. [in Russian]

Стаття надійшла 18.06.2012.
Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Гладирием А.І.