

О. А. РЕБЕДАК, асп. кафедры каф. ЭСА ДГМА, Краматорск
Н. А. ЗАДОРЖНИЙ, канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА, Краматорск;
В. П. ВЕРЕШКО, начальник конструкторско-производственного центра «НКМЗ-Автоматика»,
 ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск;
С. А. БАКАН, главный конструктор конструкторско-производственного центра «НКМЗ-Автоматика»,
 ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск;

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КРАНОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ

Введение. Создание новой продукции индивидуального машиностроения ПАО «НКМЗ» требует так же и создания надежных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) с высокими показателями качества регулирования на базе современной цифровой техники мировых производителей. Непрерывно растущие требования к быстродействию, точности и надежности выпускаемой продукции стимулируют развитие нестандартных подходов к построению АСУ ТП и оригинальных алгоритмических решений управляющего контроллера. В данной статье рассматриваются особенности синхронизации многодвигательных электроприводов в штатных и аварийных режимах работы кранов металлургических электрических литейных (КМЭЛ) производства ПАО «НКМЗ» на примере КМЭЛ 470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т Алчевского металлургического комбината.

Анализ последних достижений и литературы. Вопросы синхронизации многодвигательных электроприводов достаточно широко освещены как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Наиболее подробную информацию о способах технической реализации подобных систем можно получить из технических руководств преобразователей частоты различных фирм-производителей [1, 2, 3]. Вопросы синхронизации с целью обеспечения различных требований технологических процессов так же рассматриваются в источниках [4, 5].

Во всех выше приведенных источниках авторами описывается классическая схема реализации синхронизации в многодвигательном электроприводе, что подразумевает под собой наличие ведущего электропривода (master) и ряда ведомых им электроприводов (slaves). При синхронизации по скорости задание скорости из АСУ поступает на ведущий электропривод, а его фактическая скорость передается в качестве задания ведомым электроприводам. Аналогичным образом выполняется синхронизация по моменту при необходимости их синхронизации. Данное техническое решение в той или иной вариации способа передачи задания от ведущего к ведомому приводу (аналоговый сигнал, RS-485, шина DRIVE-CLiQ, шина CAN и т.д.) присутствует практически у всех производителей современных частотных преобразователей [1, 2, 3]. Стоит отметить, что наиболее широкое распространение получил унифицированный токовый сигнал 4...20 мА.

Ряд работ посвящен системам синхронизации многодвигательных электроприводов без использования классической схемы «ведущий-ведомый». Например, в работе [6] описывается система подчиненного регулирования синхронизации скоростей двигателей толкателя слябов нагревательной печи. Способом реализации синхронизации является выравнивание токов якорных цепей двигателей при их одинаковой скорости. В работе [7] описан многодвигательный частотно-регулируемый электропривод, включающий n одинаковых по мощности локальных электроприводов, работающих на общую нагрузку. Каждый электропривод имеет импульсный датчик скорости. В многодвигательный электропривод также введен осреднитель скоростей локальных электроприводов. Выход импульсного датчика по скорости всех локальных электроприводов соединен с входом осреднителя скоростей локальных электроприводов, выход которого соединен со вторым входом регулятора скорости вращения многодвигательного электропривода. Данная система синхронизации обеспечивает создание на выходе каждого из n локальных электроприводов одинакового момента при различии в электромагнитных параметрах и механических характеристиках асинхронных электродвигателей. При этом используется один регулятор скорости вращения для регулирования скорости каждого из n электродвигателей локальных электроприводов.

Цель статьи. Целью данной статьи является описание альтернативного способа синхронизации многодвигательных электроприводов на примере четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т Алчевского металлургического комбината. Показаны преимущества альтернативного способа синхронизации и даны рекомендации по его практическому применению на базе оборудования фирмы Siemens.

Постановка проблемы. В настоящее время к металлургическому крановому оборудованию предъявляются очень жесткие требования в области надежности и безотказности. При эксплуатации в условиях кислородно-конвертерного цеха при завалке шихты и заливке чугуна в конвертор кран подвергается воздействиям высоких температур и открытого пламени. Данный фактор может привести к возгоранию крана и вынуждает использовать дополнительные технические решения по защите металлоконструкций и установленного электрооборудования. Рабочее пространство цеха характеризуется высоким содержанием в воздухе токопроводящей пыли и частиц металла, что выдвигает дополнитель-

© Ребедак О.А., Задоржний Н.А., Верешко В.П., Бакан С.А., 2015

ные требования по защите электрооборудования крана от воздействия окружающей среды.

Для непрерывной технологической цепочки конверторного производства характерной является высокая интенсивность эксплуатации оборудования в трехсменном режиме [8].

Суммарная мощность установленных на кране КМЭЛ 470+100+20т электродвигателей превышает 2 МВт, из которых 1.28 МВт приходится на четырехдвигательный механизм главного подъема. Схематично компоновка оборудования АСУ ТП на базе приводов шкафного исполнения Sinamics S120, относящегося к механизму главного подъема, показана на рис. 1.

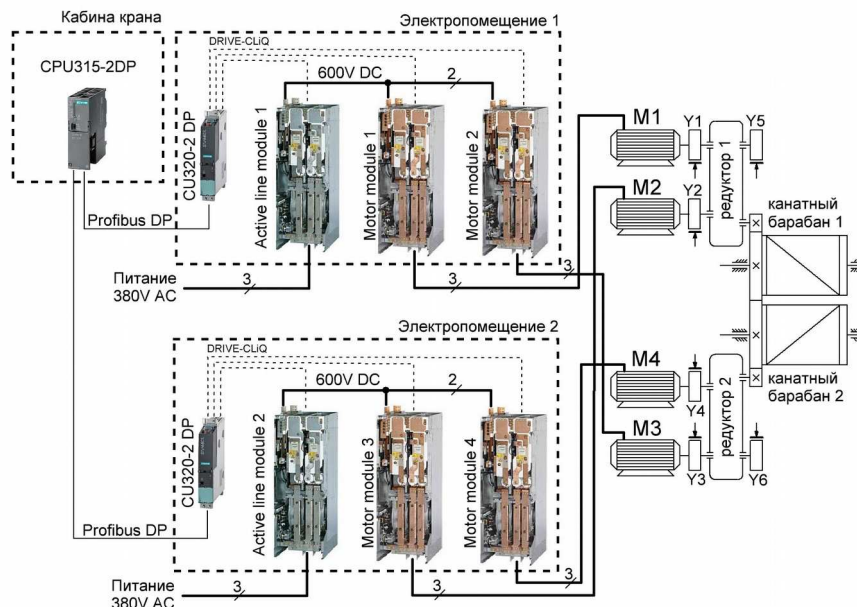


Рис. 1. Схематичная компоновка оборудования АСУ ТП четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т

При таких значениях мощностей электроприводов очень большое влияние на качество работы оборудования и уровень динамических нагрузок оказывает синхронизация в многодвигательных приводах. При отсутствии синхронизации корректная работа механизмов крана, имеющих многодвигательный привод, затруднена, а зачастую вообще невозможна. Без синхронизации разность моментов отдельных электродвигателей упруго деформирует металлоконструкции крана, обеспечивающие механическую связь между точками крепления двигателей. При этом, потребляемая из питающей сети электрическая энергия, пропорциональная разнице моментов отдельных электродвигателей, не совершает никакой полезной работы и полностью расходуется на упругую деформацию металлоконструкций крана. Это приводит к ухудшению характеристик энергопотребления оборудования, увеличению токовой нагрузки на питающую сеть, активные выпрямители, моторные модули и электродвигатели, более интенсивному износу металлоконструкций крана.

Материалы и результаты исследований. При всех преимуществах классической схемы синхронизации «ведущий-ведомый» (простота реализации, поддержка большинством производителей оборудования), она не лишена определенных недостатков, к которым можно отнести:

- аварийно опасный режим работы механизма с активным характером нагрузки в случае разрушения механической связи между валом ведущего электродвигателя и входным валом редуктора (износ муфт сцепления);
- чувствительность системы к выходу из строя ведущего электропривода, что в случае требования продолжения работы приводит к необходимости изменения конфигурации системы управления с назначением нового ведущего электропривода;
- если в процессе синхронизированной работы запас ведомого электропривода по напряжению или току окажется недостаточным для ускорения с целью синхронизации с ведущим электроприводом, то рассинхронизация может длиться сколь угодно долго;
- активное регулирование скорости или момента для синхронизации осуществляет только ведомый электропривод, что увеличивает время синхронизации относительно одновременного регулирования скорости сразу двумя приводами.

Для устранения вышеописанных недостатков классической системы синхронизации, улучшения качества переходных процессов и снижения динамических нагрузок на кранах КМЭЛ470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т была использована альтернативная система выравнивания моментов отдельных приводов многодвигательного электропривода. Функциональная схема данной системы приведена на рис. 2.

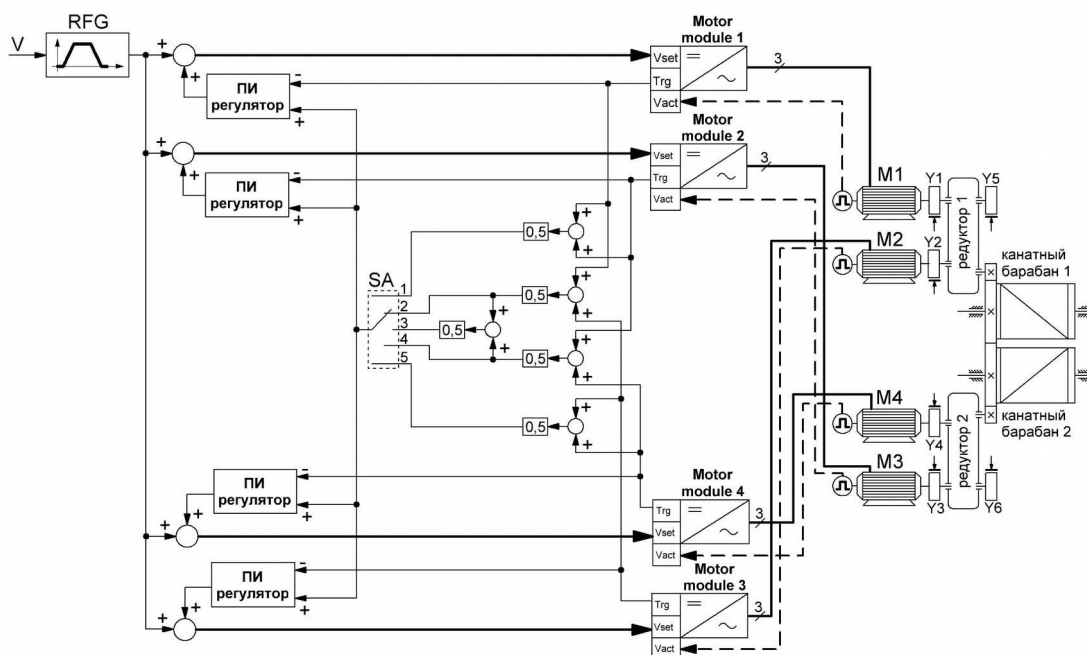


Рис. 2. Функциональная схема альтернативной системы выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т

Решение задачи выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема достигается следующим образом: на вход генератора рампы RFG поступает задание скорости V от оператора крана. Выходное значение генератора рампы передается на сумматоры. Выход каждого из сумматоров является основным заданием на внутренний контур скорости соответствующего моторного модуля. На второй вход сумматора подключается ПИ-регулятор, который уже содержит в себе настраиваемые границы зоны насыщения выходного сигнала. На вход всех ПИ-регуляторов скорости через программный селектор SA поступает усредненное значение моментов всех работающих в данный момент электродвигателей. Селектор SA осуществляет выбор задания ПИ-регулятора в зависимости от режима работы механизма главного подъема. В качестве обратной отрицательной связи ПИ-регуляторы выступают текущие значения моментов электродвигателей, получаемые из электроприводов. Таким образом, каждый ПИ-регулятор в пределах разрешенных границ осуществляет корректировку задания скорости соответствующего ему электропривода на величину рассогласования между текущим средним моментом всех работающих электродвигателей и текущим моментом каждого конкретного электродвигателя.

Для повышения живучести крана КМЭЛ 470+100+20т механизм главного подъема имеет пять режимов работы (соответственно программный селектор SA на рис. 2 имеет 5 положений): один основной и четыре аварийных. В основном режиме в процессе подъема и опускания груза принимают участие все четыре электропривода (положение 3 программного селектора SA на рис. 2). К аварийным режимам главного подъема работы относятся

- невозможность работы одного или двух электродвигателей по электрическим или механическим причинам, питающихся от первого электропомещения, работа на двигателях M2, M4 (положение 5 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы одного или двух электродвигателей по электрическим или механическим причинам, питающихся от второго электропомещения, работа на двигателях M1, M3 (положение 1 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы двух электродвигателей главного подъема по электрическим или механическим причинам, относящихся к первому редуктору, работа на двигателях M3, M4 (положение 4 программного селектора SA на рис. 2);

- невозможность работы двух электродвигателей главного подъема по электрическим или механическим причинам, относящихся ко второму редуктору, работа на двигателях M1, M2 (положение 2 программного селектора SA на рис. 2).

Описанная выше альтернативная система выравнивания моментов четырехдвигательного механизма главного подъема крана КМЭЛ 470+100+20т имеет следующие преимущества:

- в случае разрушения механической связи между валом одного из электродвигателей и входным валом редуктора максимальный развиваемый момент каждого электродвигателя остаётся неизменным;

- активное регулирование скорости для синхронизации моментов осуществляется одновременно всеми работающими приводами;

- если в процессе синхронизированной работы запас какого-либо электропривода по напряжению или току

окажется недостаточным для ускорения с целью синхронизации моментов, то рассинхронизация моментов будет устранена путем снижения скорости электроприводов, имеющих момент, превышающий среднее значение.

Реализация описанной выше альтернативной системы синхронизации на КМЭЛ470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т имеет ряд технических особенностей. Для повышения частоты дискретизации и, как следствие, улучшения качества переходных процессов данная система реализована в модулях управления CU320-2 DP первого и второго электропомещений на базе Drive Control Chart (DCC) в графической среде программирования Control For Continuous (CFC) с помощью стандартной библиотеки блоков для Sinamics V4.4. Модуль управления CU320-2 DP обеспечивает выполнение программы синхронизации моментов за 1 ms, чего невозможно добиться при реализации алгоритма в управляющем контроллере CPU315-2DP.

Таким образом, в каждом модуле управления CU320-2 DP содержатся генератор рампы RFG, два сумматора, два ПИ-регулятора, программный селектор SA и полная логика вычисления среднего момента всех работающих в настоящий момент электроприводов. В модуль управления CU320-2 DP, расположенный в первом электропомещении, информация о приводах (слова состояния, моменты) второго электропомещения передается через управляющий контроллер CPU315-2DP по сети Profibus DP в изохронном режиме через равные промежутки времени 5.228 мсек. Аналогичным образом информация о приводах первого электропомещения передается в модуль управления CU320-2 DP, расположенный во втором электропомещении. То есть в данной системе синхронизации моментов управляющий контроллер выполняет считывание информации приводов главного подъема одного электропомещения и обеспечивает ее передачу в другое электропомещение. При этом никаких алгоритмов, относящихся к синхронизации моментов, в контроллере не выполняется, что позволило упростить управляющую программу и уменьшить время цикла ее выполнения.

Для эффективной реализации альтернативной системы синхронизации рекомендуется снижать число абонентов сети Profibus DP имеющих статус «мастер» до минимально возможного с целью минимизации времени цикла изохронного режима работы контроллера. В настоящий момент на кране КМЭЛ 470+100+20т в сети Profibus DP имеется пять абонентов-мастеров: управляющий контроллер, три панели визуализации и программатор. Если выполнить связь между контроллером и панелями визуализации по сети Ethernet, то возможно снижение интервалов времени обмена данными через контроллер между приводами первого и второго электропомещений с 5.228 мсек до 3.673 мсек, что позволит улучшить показатели качества переходных процессов.

Последовательность настройки электроприводов главного подъема для обеспечения оптимальных динамических процессов так же имеет свои особенности. Предварительная настройка контуров тока и скорости электроприводов главного подъема в ходе проведения пусконаладочных работ была выполнена в режиме автоматической идентификации электроприводом статических и динамических параметров электродвигателей. После этого был создан самый тяжелый динамический режим для электроприводов главного подъема: электромеханическая система имела минимальную жесткость механической связи при минимальном соотношении инерционных масс механизма. То есть пустая траверса была опущена на максимально возможную высоту. В качестве источника обратной связи по скорости для всех приводов устанавливался импульсный датчик скорости на валу соответствующего двигателя. Система синхронизации моментов отключалась, и на привода подавалось ступенчатое задание в 10% от номинальной скорости. По полученным с помощью IbaPDA осциллограммам производилась оценка динамических характеристик каждого электропривода и их отличие между собой. Затем производилась настройка коэффициентов регуляторов контуров скоростей и контуров токов электроприводов с целью получения идентичных переходных процессов во всех электроприводах главного подъема. По завершении настройки коэффициентов регуляторов всех электроприводов для электропривода первого двигателя в качестве источника обратной связи по скорости устанавливалась внутренняя математическая модель двигателя. То есть привод переводился в бездатчиковый режим работы. При этом характер его переходных процессов начинал значительно отличаться от настроенных ранее трех остальных электроприводов. После этого производилась настройка коэффициентов регулятора скорости первого электропривода для бездатчикового режима работы с целью получения идентичных переходных процессов во всех электроприводах главного подъема. По завершении настройки коэффициентов регулятора скорости первого электропривода, производился перевод второго электропривода на бездатчиковый режим работы и производилась настройка его коэффициентов регулятора скорости. Затем аналогичные действия выполнялись для третьего и четвертого электроприводов.

Описанный выше алгоритм настройки позволяет получить идентичное поведение электроприводов в динамике вне зависимости от того, работают они с датчиком обратной связи или же обратная связь по скорости осуществляется от внутренней математической модели электродвигателя в приводе. При этом параметр r491 в каждом из электроприводов главного подъема устанавливается в 1, что обеспечивает автоматический переход привода в бездатчиковый режим работы в случае обнаружения неисправностей импульсного датчика скорости или обрыва сигнальных линий. Переход на бездатчиковый режим работы осуществляется без остановки электропривода и сопровождается выдачей предупредительного сообщения на панелях визуализации в кабине оператора и каждом электропомещении.

Наблюдение за переходными процессами четырехдвигательного механизма главного подъема осуществлялось с помощью программного продукта IbaPDA. На рис. 3 приведены осциллограммы скорости и моментов при работе в штатном (а) и аварийном (б) – работа на двигателях M1, M3 – режимах.

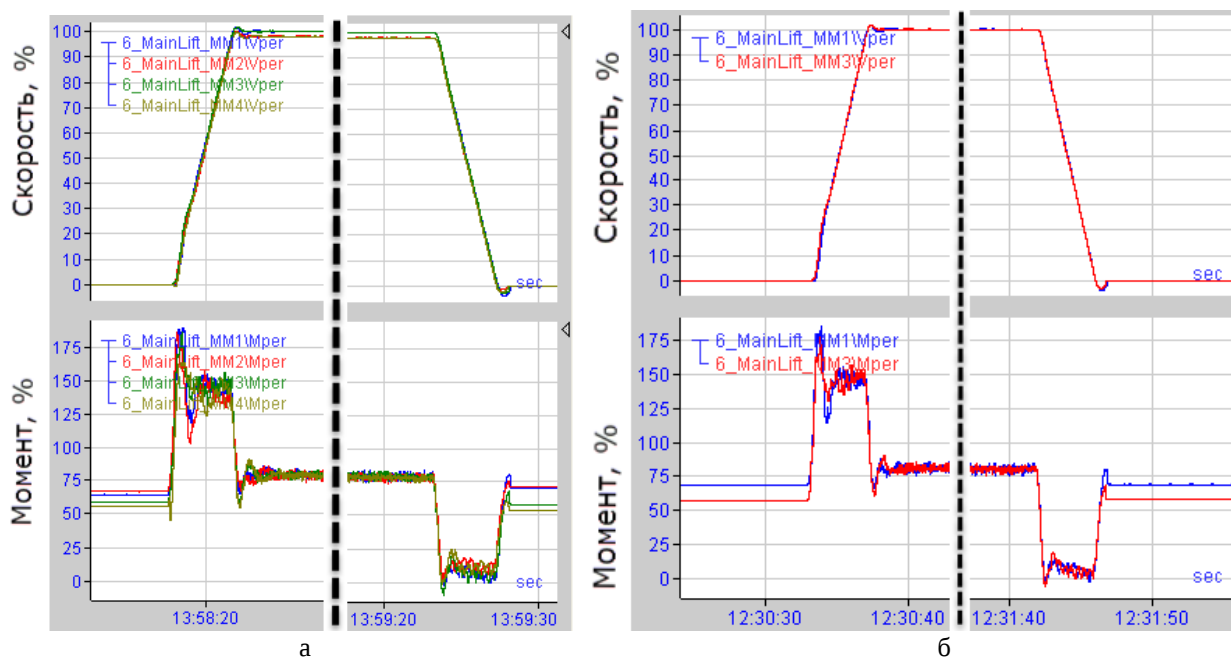


Рис. 3. Осциллограммы скорости и моментов четырехдвигательного механизма главного подъема при работе в штатном (а) и аварийном (б) режимах

Как можно видеть из осциллограмм данный алгоритм синхронизации обеспечивает статическое рассогласование моментов не более 1% от номинального момента двигателя, что для условий практического применения является приемлемым результатом. Значительная зашумленность осциллограмм моментов объясняется тем, что производилась запись неотфильтрованного значения переменных.

Выводы. В статье рассмотрена система выравнивания моментов многодвигательных приводов кранов КМЭЛ 470+100+20т и КМЭЛ 450+100+20т Алчевского металлургического комбината на примере четырехдвигательного механизма главного подъема. Использование данной системы является альтернативой классическим системам «ведущий-ведомый». Показаны недостатки классических систем «ведущий-ведомый», а так же даны рекомендации для практического применения описанной альтернативной системы синхронизации. За счет технических особенностей реализации (программа синхронизации моментов выполняется в приводах) снижены нагрузка и время цикла управляющего контроллера.

Список литературы: 1. Sinamics S120. Drive Function. Functional manual 01/2015. 2. Sinamics drives. Sinamics DCM DC Converter. Operating Instructions 06/2013. 3. Load Sharing with the Altivar ATV71. Application Guide. 4. Перельмутер В. М. Тиристорные электроприводы прокатных станков / В. М. Перельмутер, Ю. Н. Брауде, Д. Я. Перчик, В. М. Книгин. – М. : Металлургия, 1978. – 152 с. 5. Макурин А. В. Практическая реализация системы синхронного вращения приводов перемещения мостового крана / А. В. Макурин // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 217-218. 6. Сайфутдинов, А. В. Снижение динамических нагрузок системы электропривода толкателя слябов нагревательной печи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Сайфутдинов Антон Валерьевич. – Липецк, 2005. – 20 с. 7. Пат. 2326488 Российская Федерация, МПК H 02 P 5/48, H 02 P 21/00. Многодвигательный частотно-регулируемый электропривод / Сидоров П. Г. Александров Е. В., Лагун В. В.; заявитель и патентообладатель Сидоров П. Г. Александров Е. В. – № 2006137608/09; заявл. 24.10.06; опубл. 10.06.08, Бюл. № 16. 8. Рапутов М. Б. Электрооборудование металлургических кранов / М. Б. Рапутов. – М. : Металлургия, 1977. – 248 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sinamics S120. Drive Function. Functional manual 01/2015. 2. Sinamics drives. Sinamics DCM DC Converter. Operating Instructions 06/2013. 3. Load Sharing with the Altivar ATV71. Application Guide. 4. Perelmutter, V. M., Braunde, U. N., et al. *Tyristornie elektroprivoda prokatnykh stanov*. Moscow: Metallurgiya, 1978. Print. 5. Makurin, A. V. "Practicheskaya realizatsiya sistemy sinchronnogo vrasheniya privodov peremesheniya mostovogo kрана." *Vestnik Nats. tehn. un-ta "HPI": sb. naush. tr. Temat. vip.: Problemy avtomatizirovannogo electroprivoda*. No. 36.1009. 2013. 217-218. Print. 6. Saifutdinov, A. V. *Snichenye dinamicheskikh naruzok systemy electroprivoda tolkatelya slyabov narevatelnoy pechi*. abstract PhD dissertation, Lipetsk, 2005. (in Russian) 7. Sidorov P. G., Aleksandrov E. V., Lagun V. V. *Mnogodvigatilniy chastotno-reguliruemyy electroprivod*. Patent RF, no. 2326488, 2006. 8. Raputov, M. B. *Elektrooborudovanie metallurgicheskikh cranov*. Moscow: Metallurgiya, 1977. Print.

Поступила (received)