

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЛАВНОГО ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА

К. В. Лицин<sup>1,2</sup>, Д. В. Белых<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (г. Челябинск, Россия),

<sup>2</sup> Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС» (г. Новотроицк, Россия)

Выполнено моделирование работы электропривода механизма главного подъема мостового литейного крана в двух режимах: при аварийном подъеме и спуске загруженной бады. Проведено экспериментальное исследование на лабораторной установке с указанием статических и динамических показателей синтезированной и рассчитанной системы управления. Результаты удовлетворяют требованиям, величины качественных показателей не превышают допустимых значений. Внедрение разработанной системы выравнивая нагрузок электропривода главного подъема мостового крана КМЭМЛ 210+63/20 т, эксплуатируемого в условиях сталеплавильного производства АО «Уральская Сталь», позволит уменьшить время текущих простоев на 4,6 %, что приведет к увеличению времени его использования и уменьшению затрат на приобретение элементов электропривода с увеличением прибыли цеха на 0,8 %.

**Ключевые слова:** электропривод, мостовой кран, выравнивание нагрузок, регулятор, механизм главного подъема, система управления, моделирование.

Горнодобывающая и металлургическая промышленность — части единого технологического цикла, где крановые системы и подъемно-транспортное оборудование должны иметь максимальную надежность [1, 2]. Слабым местом кранов старого выпуска, особенно мостовых, является релейно-контакторная система управления, и как следствие, наибольшее количество отказов у литейных кранов связано именно с электрооборудованием [3]. Решение подобной проблемы возможно путем внедрения современных преобразователей частоты и асинхронных двигателей [4, 5].

Большинство основных и вспомогательных механизмов мостового крана, как правило, приводятся в движение двумя, а иногда и более, двигателями [6, 7]. Двухдвигательный электропривод имеет ряд преимуществ по сравнению с однодвигательным электроприводом [8 – 10]: уменьшенный суммарный момент инерции приводной системы, возможность создания систем большой мощности при использовании серийно выпускаемых машин, большая надежность и др.

Выбранный в качестве объекта мостовой литейный кран КМЭМЛ 210+63/20 т был изготовлен в 1979 г. и до 2005 г. эксплуатировался с проектной грузоподъемностью главного подъема 180 т. После проведенной в 2006 г. реконструкции грузоподъемность крана была увеличена до 210 т. Увеличение грузоподъемности потребовалось в связи с частичными изменениями технологии выплавки стали.

Учитывая технологический режим работы механизма главного подъема мостового крана, а также особенности, присущие всем металлургическим кранам [11 – 15], можно сформулировать к электрооборудованию мостовых кранов электросталеплавильных определенные технологические требования [16], в числе которых возможность регулирования скорости в широком диапазоне (1:100) [17] и обеспечение плав-

ных переходных процессов при точности регулирования до 3 % [18].

Цель данной статьи — модернизация мостового литейного крана за счет внедрения разработанной системы выравнивания нагрузок двухдвигательного электропривода главного подъема мостового литейного крана КМЭМЛ 210+63/20 т, эксплуатируемого в условиях сталеплавильного производства. Научная новизна заключается в разработке устройства вы-

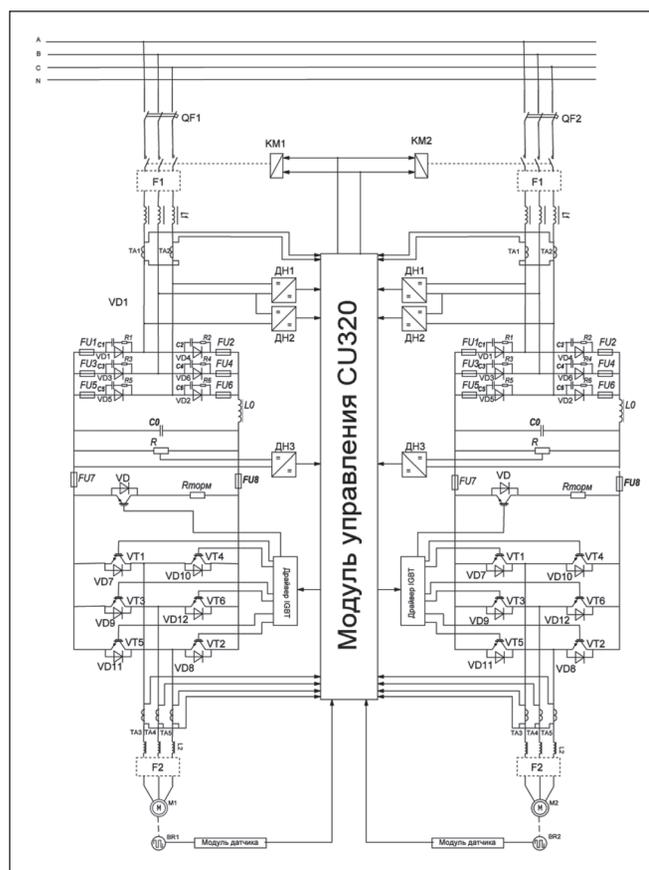


Рис. 1. Силовая схема двухдвигательного электропривода

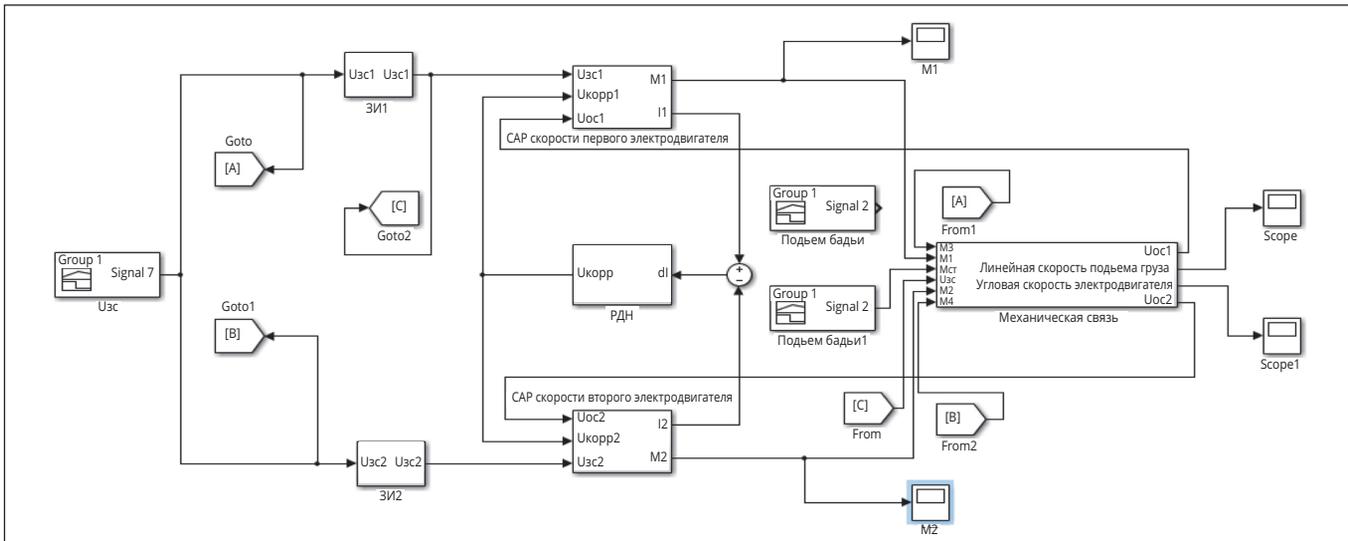


Рис. 2. Математическая модель двухдвигательной системы главного электропривода мостового крана

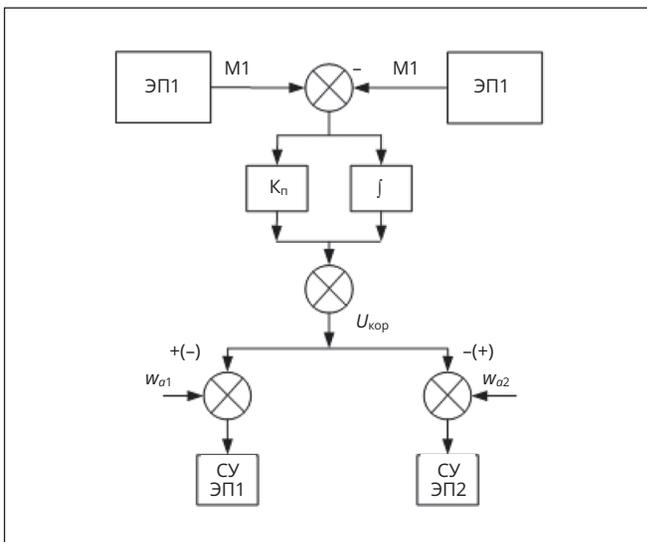


Рис. 3. Структурная схема регулятора выравнивания нагрузки

равнивания нагрузок на основе сравнения моментов (токов), отличающихся от известных алгоритмом выравнивания полученных моментов, что позволит увеличить быстродействие работы мостового литейного крана.

**Система выравнивания нагрузок электропривода.**

Силовая схема управления мостовым краном показана на рис. 1. Представленное решение имеет один существенный недостаток, который заключается в расхождении механических характеристик асинхронных электродвигателей, даже при условии одного типа их использования [19]. Следовательно, в двухдвигательной системе возникнет рассогласование распределения нагрузок при любом (статическом или динамическом) режиме работы [20].

Предлагаемая система выравнивания нагрузок должна основываться на работе с применением ПИ-регуляторов без разделения элементов системы на «ведущий-ведомый». С целью внедрения предлагаемой системы выравнивания нагрузок была разработана модель двухдвигательной системы в программе

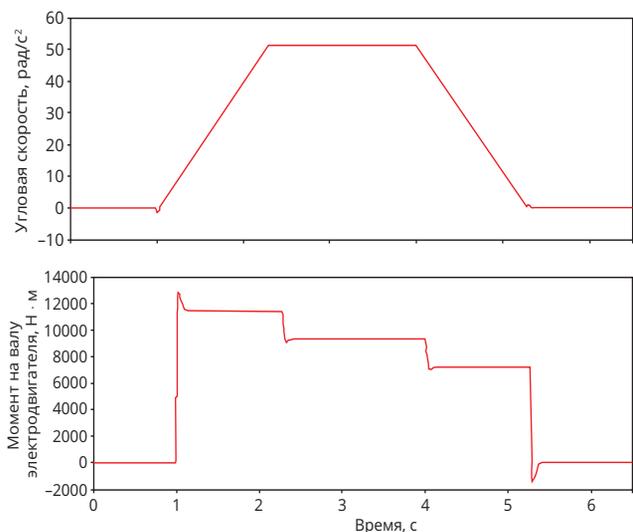


Рис. 4. Переходные процессы скорости и момента при аварийном подъеме загруженной бады

Matlab Simulink, которая представлена на рис. 2. Модель включает в себя системы автоматического регулирования (САР) первого и второго электродвигателя, основанные на их частотном управлении. Подсистема «механическая связь» учитывает момент инерции электропривода, позволяя проводить коррекцию момента инерции в момент спуска и подъема груза. Блоки «задатчик интенсивности» (ЗИ) предназначены для обеспечения корректного управления электродвигателями мостового крана, получающими задание от общего блока управления.

Распределение нагрузок осуществляется с помощью блока «РДН» (рис. 3). Сигналы задания формируются согласно следующему алгоритму: токи (моменты), снимаемые с двигателей, сравниваются между собой, получая величину рассогласования. Эффективность уравнивания моментов выполняется за счёт пропорционального коэффициента  $K$  и интегрального коэффициента, которые суммируются образуют коэффициенты ПИ-регулятора. Про-

цесс сравнения происходит согласно следующему алгоритму:

равенство токов (моментов) – значение коэффициента  $K$  равно нулю;

превышение тока (момента) первого двигателя  $M_1 > M_2$  приводит к образованию положительного коэффициента  $K(M_1 - M_2) > 0$ ;

превышение тока (момента) второго двигателя  $M_1 < M_2$  приводит к образованию отрицательного коэффициента  $K(M_1 - M_2) < 0$ .

С целью проверки адекватности предлагаемого решения по выравниванию нагрузок воспользуемся программным обеспечением Matlab Simulink, позволяющим реализовать модель двухдвигательного электропривода с разработанной схемой выравнивания нагрузок. На рис. 4 представлены переходные процессы скоростей и моментов в режиме аварийного подъема груза при работе на номинальной скорости.

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторного стенда «BoomBox Imperix», программная часть которого основана на Matlab Simulink, а силовая часть включает в себя набор необходимых элементов. Формирование силовой части лабораторного стенда проводилось согласно рис. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги моделирования и экспериментальной проверки синтезированной и рассчитанной системы управления показывают, что процессы, происходящие в ней, в полной мере отражают основные теоретические и практические положения о системах подчиненного регулирования параметров электродвигателей. Небольшое перерегулирование по скорости обусловлено управлением темпа разгона посредством задатчика интенсивности. Отклонение заданной величины скорости от установившейся скорости не превышает 3 %. Внедрение разработанной системы выравнивания нагрузок электропривода главного подъема мостового крана КМЭМЛ 210+63/20 т, эксплуатируемого в условиях сталеплавильного производства АО «Уральская Сталь», позволит уменьшить время текущих простоев на 4,6 %, что приведет к увеличению времени его использования и уменьшению затрат на приобретение элементов электропривода и обеспечит увеличение прибыли цеха на 0,8 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лалаянц Р. А. Расчеты крановых механизмов и деталей подъемно-транспортных машин. Т. 2: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ВНИИПТМАШ, 2003. – 393 с.
2. Киришбаум М., Хамме У. Использование конструктивных высокопрочных мелкозернистых сталей в краностроении // Черные металлы. 2016. № 1. С. 46 – 50.
3. Hoang Manh Cuong, Hoang Quoc Dong, Pham VanTrieu, Le Anh Tuan. Adaptive fractional-order terminal sliding mode control of rubber-tired gantry cranes with uncertainties and unknown disturbances // Mechanical Systems and Signal Processing. 2021. V. 154. P. 117 – 128.

4. Litsin K. V., Tsukanov A. V. Automated Electric Drive for the Control System of a Two-Coordinate Welding Machine // Steel in Translation. 2021. Vol. 51. No. 5. P. 314 – 319.
5. Pancracious J. K., Ulaeto S. B., Ramya R. et al. Metallic composite coatings by electroless technique (a critical review) // International Materials Reviews. 2018. 63(8). P. 488 – 512.
6. Paul A. K., Gangadaran M., Mazumder S., Neogi R. AC operated EOT crane control with variable voltage variable frequency drive / Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. 1996. Vol.2. P. 857 – 861.
7. Gu Y., Zhang X., Jiang J., Li B. Research on Potential Energy Recovery Technology of Bridge Crane Lifting Mechanism / 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). 2022. P. 1879 – 1884.
8. Масандилов Л. Б. Электропривод подъемных кранов. – М.: изд-во МЭИ, 1998. – 100 с.
9. Варламов В. В., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Моделирование перегрузок механизма подъема мостовых кранов металлургических предприятий // Изв. вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 8. С. 646 – 651.
10. Семькина И. Ю., Кипервассер М. В., Герасимук А. В. Исследование токов привода подъема мостовых кранов металлургических предприятий для раннего диагностирования превышения массы груза // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 122 – 131.
11. Брауде В. И., Гохберг М. М., Звягин И. Е. и др. Справочник по кранам. В 2-х т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / под общ. ред. М. М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
12. Stepanić P., Krošnjar A., Pavlović G., Stepanović A. Implementation of wireless control on electrical bridge cranes and gantry crane / 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), 2015. P. 681 – 684.
13. Liu C., Zhao H., Cui Y. Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system / 2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science. 2014. P. 971 – 974.
14. Хёльблинг В. Листовая сталь DILLIMAX – новые возможности для грузоподъемного оборудования // Черные металлы. 2018. № 4. С. 33 – 36.
15. Shi H., Guo M., Yu Y., Zheng Y. Position Regulation of Bridge Crane with Non-constant Disturbances / 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). 2020. P. 2870 – 2872.
16. Лицин К. В., Белых Д. В. Разработка системы визуализации машины подачи кислорода // Сталь. 2022. № 10. С. 12 – 16.
17. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
18. Hrabovský L., Čepica D., Frydryšek K. Detection of mechanical stress in the steel structure of a bridge crane // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2021. V. 11. P. 107 – 113.
19. Pawlak-Jakubowska A., Romaniak K. Kinematics of the retractable roofing module constructed from three roof panels // Journal of Building Engineering. 2021. V. 38. P. 428 – 441.
20. Bochkarev I. V., Bryakin I. V., Khramshin V. R. et al. Developing new thermal protection method for ac electric motors // Machines. 2021. 9(3). P. 1 – 16.

Статья поступила 30.10.2022