

УДК 255:29.1

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ИЗМЕНЕНИЯ ВЫЛЕТА СТРЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА СРЕДСТВАМИ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

О. А. Ребедак, А. В. Сухомуд

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

Проводится исследование работы механизма изменения вылета стреловой системы порталного крана КПП 16/20/32-36/28/20..8 «Стерх» производства ПАО «НКМЗ». Исследование выполнено с помощью пакета SimMechanics в среде MATLAB Simulink. В результате моделирования работы механизма получены зависимости вылета стреловой системы от угла наклона стрелы и зависимость высоты конца стрелы от вылета стреловой системы. Данные зависимости позволили скорректировать нелинейность вертикальной траектории груза с помощью управляющей программы контроллера (серия S7-300 фирмы Siemens) и электропривода подъема (серия ACS-800 фирмы ABB), что позволило снизить нагрузку на механизм изменения вылета стрелы, уменьшить его износ и продлить ресурс работы порталного крана.

Ключевые слова: порталный кран, траектория груза, электропривод, корректировка.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ ПОРТАЛЬНОГО КРАНУ ЗАСОБАМИ СУЧАСНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

О. О. Ребедак, А. В. Сухомуд

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

Проводиться дослідження роботи механізму зміни вильоту стрілової системи порталного крана КПП 16/20/32-36/28/20..8 «Стерх» виробництва ПАТ «НКМЗ». Дослідження виконано за допомогою пакету SimMechanics у середовищі MATLAB Simulink. У результаті моделювання роботи механізму отримано залежність вильоту стрілової системи від кута нахилу стріли й залежність висоти кінця стріли від вильоту стрілової системи. Ці залежності дозволили скорегувати нелінійність вертикальної траєкторії вантажу за допомогою керуючої програми контролера (серія S7-300 фірми Siemens) та електроприводу підйому (серія ACS-800 фірми ABB), завдяки чому вдалося знизити навантаження на механізм зміни вильоту стріли, зменшити його знос й подовжити ресурс роботи порталного крана.

Ключові слова: порталний кран, траєкторія вантажу, електропривод, коректування.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При работе порталного крана изменение вылета стреловой системы является рабочим, а не установочным движением, т.е. выполняется с грузом при высоких скоростях его перемещения [1]. Как правило, изменение вылета осуществляется в каждом рабочем цикле и поэтому существенно влияет на производительность крана. Одним из важнейших требований к стреловым устройствам является горизонтальная траектория перемещения груза. В данной работе проводится исследование траектории перемещения груза порталного крана КПП 16/20/32-36/28/20..8 «Стерх» производства ПАО «НКМЗ» средствами библиотеки SimMechanics в среде MATLAB Simulink. Полученные результаты использованы в управляющей программе контроллера, чтобы с помощью электропривода подъема скорректировать траекторию груза. Данное решение позволило снизить нагрузку на механизм изменения вылета стреловой системы и энергопотребление крана.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Одним из средств механизации погрузочно-разгрузочных работ в портах являются порталные

краны. Они представляют собой полноповоротные стреловые краны, поворотная часть которых установлена на портале, передвигающемся по рельсам, проложенным по земле или эстакаде. В данной работе рассматривается порталный кран КПП 16/20/32-36/28/20..8 «Стерх» производства ПАО «НКМЗ», поставленный морскому торговому порту «Измаил» 10 ноября 2010 года.

Портальный кран «Стерх» относится к крюковым кранам с возможностью установки грейфера и имеет шарнирно-сочлененную стрелу с постоянной высотой подвеса груза. Максимальный вес груза, поднимаемого краном, является переменным по вылету. Этот принцип заложен в названии крана: 16 т – до 36 м, 20 т – до 28 м, 32 т – 20..8 м. Поэтому одной из важнейших задач при разработке системы автоматизации является ограничение вылета стреловой системы в зависимости от массы груза для предотвращения опрокидывания крана. Измерение вылета стрелы осуществляется с помощью датчика угла наклона WGC 090/1401 SA фирмы Hirschmann, установленный в месте соединения стреловой системы крана с колонной (рис. 1). Результат измерения по сети Profibus DP пе-

редается в управляющий контроллер серии S7-300 фирмы Siemens.

В качестве задания на разработку системы автоматизации была передана таблица зависимости вылета стреловой системы от угла наклона стрелы. Данная таблица содержала 285 строк. Для практического использования в управляющей программе табличное задание зависимости является не самым лучшим вариантом. Помимо значительного объема данных, не исключается и человеческий фактор, т.е. возможны ошибки при переносе таблицы в управляющую программу. Поскольку по данным этой таблицы осуществляется защита крана от опрокидывания, для исключения возможных ошибок было принято решение найти аналитическое выражение, описывающее зависимость вылета стреловой системы от показаний датчика угла наклона.

В качестве средства анализа механической части стреловой системы портального крана был выбран пакет SimMechanics среды MATLAB Simulink. Выбор обусловлен широкими функциональными возможностями пакета. Он позволяет создавать трехмерные модели механических объектов и решать задачи статики, кинематики и динамики [2], имеет развитые библиотеки соединений и ограничений.



Рисунок 1 – Место установки датчика угла наклона для измерения вылета стреловой системы

При разработке модели механической части стреловой системы портального крана (рис. 2) использовались блоки Body, Revolute, Joint Actuator и Joint Sensor пакета SimMechanics. Координаты точек соединения подвижных частей стреловой системы были взяты из сборочного чертежа портального крана.

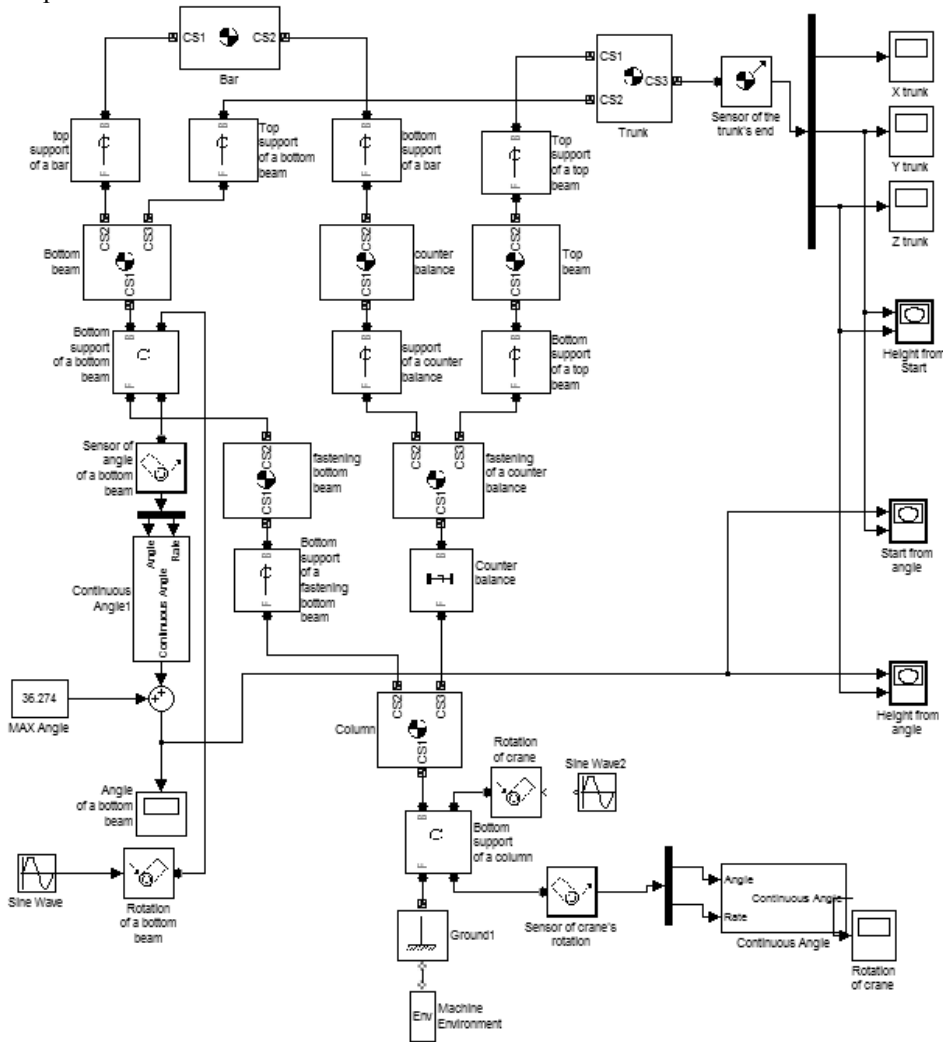


Рисунок 2 – Математическая модель механической части стреловой системы портального крана в среде MATLAB Simulink

В результате моделирования работы стреловой системы порталного крана в среде MATLAB Simulink (рис. 3) получена кривая зависимости вылета стреловой системы от угла наклона нижней балки (рис. 4). Для более наглядного восприятия нелинейности траектории на ее фоне проведена прямая линия.



Рисунок 3 – Модель стреловой системы порталного крана в окне визуализации пакета SimMechanics

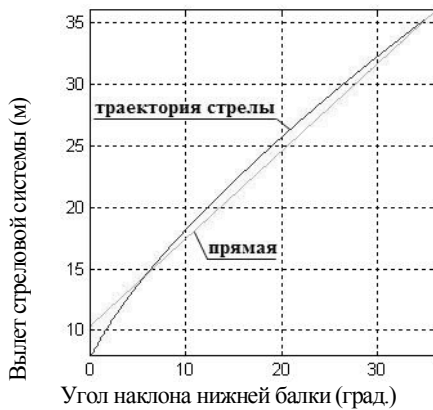


Рисунок 4 – Зависимость вылета стреловой системы от угла наклона нижней балки

В среде MATLAB была написана программа, производящая аппроксимацию кривой зависимости вылета стреловой системы от угла наклона нижней балки полиномами 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков. Затем произведена оценка абсолютной (табл. 1) и относительной (табл. 2) погрешности вычислений вылета стрелы при использовании полиномов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков.

Таблица 1 – Абсолютная погрешность вычислений вылета стрелы при использовании полиномов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков

Порядок полинома	Абсолютные погрешности, м	
	ΔL_{CP} , м	ΔL_{MAX} , м
1	0,28415	1,1614
2	0,00694	0,4224
3	0,01593	0,2799
4	0,01102	0,1625

Расчет абсолютной погрешности вычисления вылета стреловой системы находился как разница между действительным вылетом стрелы и рассчитанным с помощью полинома.

Расчет относительной погрешности вычисления вылета стреловой системы находился как отношение абсолютной погрешности к максимальному вылету стреловой системы крана (36 м).

Таблица 2 – Относительная погрешность вычислений вылета стрелы при использовании полиномов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков

Порядок полинома	Относительные погрешности, %	
	ΔL_{OTN_CP} , %	ΔL_{OTN_MAX} , %
1	1,8585	7,6046
2	0,5524	2,5397
3	0,3111	1,2569
4	0,1434	0,4513

Средние погрешности ΔL_{CP} и ΔL_{OTN_CP} являются усредненными значениями погрешностей при работе крана с вылетом от минимального (8 м) до максимального (36 м).

Максимальные погрешности ΔL_{MAX} и ΔL_{OTN_MAX} являются максимальными значениями погрешностей при работе крана с вылетом от минимального (8 м) до максимального (36 м).

Как можно видеть из табл. 1, 2, для практического использования наиболее подходящими являются полиномы 3-го и 4-го порядков. Например, полином четвертого порядка в наихудшем случае (работа с минимальным вылетом, на нелинейном участке (рис. 4) обеспечивает точность измерения вылета стреловой системы $\pm 0,16$ м, или 0,45 %. В среднем точность составляет $\pm 0,011$ м, или 0,16 %. Дальнейшее повышение порядка полинома приводит к незначительному возрастанию точности вычислений, однако потребует намного больше ресурсов контроллера, поэтому является нецелесообразной.

При решении вышеописанной задачи нахождения зависимости вылета стреловой системы от угла наклона нижней балки обнаружилась интересная особенность: горизонтальная траектория груза не была идеальной. Как оказалось, для большинства стреловых устройств порталных кранов горизонтальная траектория груза принципиально может быть обеспечена лишь приближенно [1]. Если бы груз двигался по горизонтали, то его потенциальная энергия была бы неизменной и мощность привода механизма изменения вылета (при условии полного уравнивания стрелового устройства) затрачивалась бы только на преодоление сил трения в шарнирах, давления ветра, горизонтальных сил при отклонении грузовых канатов от вертикали.

Нелинейность горизонтальной траектории приводит к изменению потенциальной энергии груза при изменении вылета стреловой системы, т.е. электропривод механизма вылета во время работы осуществ-

ляет подъем–опускание груза. Данные нагрузки отрицательно сказываются на сроке службы стреловой системы, увеличивают расход электроэнергии, сокращают интервалы обслуживания оборудования.

С помощью ранее разработанной математической модели механической части стреловой системы портального крана в среде MATLAB Simulink (рис. 2) была получена зависимость высоты конца стрелы от угла наклона нижней балки стреловой системы (рис. 5). Поскольку «Стерх» имеет шарнирно-сочлененную стрелу с постоянной высотой подвеса груза, то при неизменности длины канатов подъема траектория груза эквидистантна траектории точки подвеса груза (конец стрелы).

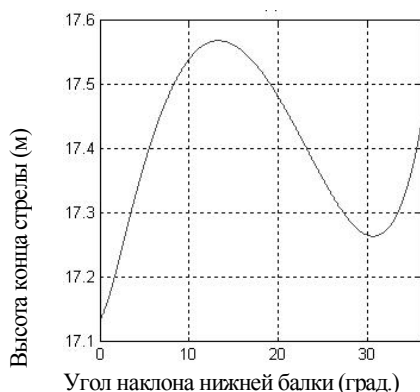


Рисунок 5 – Зависимость высоты конца стрелы от угла наклона нижней балки

Как можно видеть из рис. 5, зависимость высоты конца стрелы от угла наклона нижней балки имеет достаточно сложный характер. Максимальный перепад высоты при изменении угла наклона нижней балки от 0 до 36° составляет 0,436 м и приходится на угол наклона 13,35°, что соответствует вылету стреловой системы 20,8 м.

Предположим, что происходит погрузка груза массой $m = 20$ т на судно. Необходимый вылет составляет 21 м. Произведем оценку количества электроэнергии, затрачиваемого на дополнительный подъем груза вверх электроприводом изменения вылета стреловой системы. Согласно паспортным данным, скорость изменения вылета составляет 64 м/мин при грузе 20 т, т.е. время изменения вылета t от 10 м до 21 м составит приблизительно 10,5 с. КПД электропривода механизма изменения вылета «Стерха» η составляет около 86 %. На данном участке при постоянстве длины канатов подъема груз дополнительно наберет $h = 0,436$ м высоты. При этом необходимо дополнительно затратить электроэнергию E :

$$E = \frac{mgh}{\eta} \frac{1}{3,6 \cdot 10^{-6}} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,436}{10 \cdot 0,86 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}} = 2,679 \cdot 10^3 \text{ (КВт} \cdot \text{ч)} \quad (1)$$

Как можно видеть из (1), на каждом движении увеличения вылета стреловой системы при ранее описанных условиях дополнительно расходуется 2,679 Вт·ч электроэнергии.

При шести погрузочных операциях в час и трехсменном режиме работы за сутки дополнительный расход электроэнергии составит:

$$E_D = E_6 \cdot 21 = 0,338 \text{ (КВт} \cdot \text{ч)} \quad (2)$$

Для исключения негативного влияния нелинейности горизонтальной траектории груза на энергетические характеристики крана было принято решение компенсации нелинейности в системе управления с помощью электропривода подъема груза.

Для этого в среде MATLAB аналогично ранее рассмотренной задаче была написана программа, производящая аппроксимацию кривой зависимости высоты конца стрелы от угла наклона нижней балки полиномами 3-го, 4-го и 5-го порядков. Также была произведена оценка абсолютной и относительной погрешности вычислений высоты конца стрелы при использовании полиномов 3-го, 4-го и 5-го порядков.

Для практического использования был выбран полином пятого порядка, обеспечивающий среднюю абсолютную погрешность $5,44 \cdot 10^{-5}$ м и среднюю относительную погрешность 0,097 %.

С помощью рассчитанного полинома в управляющей программе контроллера производится корректировка сигнала задания на привод подъема для линеаризации горизонтальной траектории перемещения груза. Передача задания из контроллера на привод подъема осуществляется по сети Profibus DP.

В результате принятых мер было минимизировано влияние конструктивных особенностей стреловой системы портального крана на экономичность и долговечность работы механизма изменения вылета стрелы.

ВЫВОДЫ. Проведено исследование работы механизма изменения вылета стреловой системы портального крана КПП 16/20/32-36/28/20..8 «Стерх» производства ПАО «НКМЗ». Средой для проведения исследований выступил пакет SimMechanics приложения MATLAB Simulink.

Выполнена разработка модели механической части стреловой системы портального крана в пакете SimMechanics. Данная модель позволила получить следующие зависимости: получена кривая зависимости вылета стреловой системы от угла наклона нижней балки и кривая зависимости высоты конца стрелы от угла наклона нижней балки.

В среде MATLAB была написана программа, производящая аппроксимацию вышеуказанных кривых полиномами различных порядков. Произведена оценка абсолютной и относительной погрешности вычислений при использовании данных полиномов.

С практической точки зрения нахождение полинома, описывающего зависимость между вылетом стреловой системы и углом наклона нижней балки, позволило усовершенствовать код управляющей программы для контроллера и значительно снизить влияние «че-

ловеческого фактора» при написанні програми.

Нахождение полинома, описывающего зависимость между высотой конца стрелы и углом наклона нижней балки, позволило произвести оптимизацию горизонтальной траектории груза при изменении вылета стреловой системы. Полином используется для расчета корректирующего задания на электропривод подъема при изменении вылета стрелы.

Практическая ценность данного решения заключается в снижении динамических нагрузок на электропривод изменения вылета стрелы, снижение механических нагрузок на стреловую систему при изменении вылета, повышение срока службы и увеличение надежности работы крана в целом. Также за счет коррек-

тировки горизонтальной траектории груза достигнута экономия электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов П.З., Ксюнин Г.П., Серлин Л.Г. Специальные краны: учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование». – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
2. Корытов М.С., Глушеч В.А., Зырянова С.А. Моделирование рабочих движений автокрана при помощи SimMechanics и Virtual Reality Toolbox // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 3–4 (7–8). – С. 94–101.

OPTIMIZATION OF THE MECHANISM LUFFING BOOM SYSTEM PORTAL CRANE WITH HELP OF MODERN ELECTRIC DRIVE

O. Rebedak, A. Suhomud

Design and production center «NKMZ–Automatica»

Public Joint Stock Company «Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod»

ul. Ordzhonikidze, 5, Kramatorsk, 84305, Ukraine. E-mail: co_r_s_ar@mail.ru

N. Zadorozhniy

Donbass State Engineering Academy

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

The article explored the workings luffing boom of the portal crane CPFS 16/20/32-36/28/20..8 «Sterh» produced by PJSC " NKMZ ". To investigate the package was used in the SimMechanics environment MATLAB Simulink. As a result, modeling of the mechanism, the following dependencies: the departure boom system from the angle and dependence of the boom system height from relegation. These dependencies are allowed to correct the nonlinearity of the vertical load path through the control of the controller (series S7-300 from Siemens) and electric lift (ACS-800 series firm ABB). As a result of reduced dynamic loads on the luffing mechanism, it is reduced wear and extended life of the gantry crane.

Key words: portal crane, the trajectory of the load, electric drive, correct.

REFERENCES

1. Petuhov P.Z., Ksyunin G.P., Serlin L.G. *Special cranes: a manual for the machine-building university on a specialty «Lifting-and-shifting machines and equipment»*. – М.: Mashinostroyeniye, 1985. – 248 p. [in Russian]
2. Korytov M.S., Glushets V.A., Zyryanova S.A. Modeling working crane movements using SimMechanics and the Virtual Reality Toolbox // *Exponenta Pro. Mathematics in applications*. – 2004. – № 3–4 (7–8). – PP. 94–101. [in Russian]

Стаття надійшла 6.06.2012.

Рекомендовано до друку

д.т.н., проф. Толочко О.І.