

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УЧЕТА ОГРАНИЧЕНИЙ НА ФУНКЦИЮ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Юрий Ромасевич

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украина, г. Киев, ул. Героев Обороны, 15*

Yuriy Romasevich

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Str. Heroiv Oborony, 15, Kiev, Ukraine*

Аннотация. Выполнен анализ ограничений на функцию управления грузоподъемного крана, который приводится в движение с помощью электропривода. Выявлено, что область допустимых значений управления есть сложной функцией механических и электрических параметров крана. Разработан алгоритм учета ограничений на управляющую функцию.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, управление, электропривод, область допустимых значений, алгоритм.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одной из важных проблем при проектировании приводных механизмов различных грузоподъемных кранов есть учет ограничений, которые налагаются на отдельные элементы привода. Учет этих ограничений дает возможность продолжительно и безаварийно эксплуатировать приводной механизм. Особую актуальность этой проблеме придает то, что современные крановые приводы являются, как правило, регулируемые [1-3]. Процесс их регулирования осуществляется с помощью различных силовых электронных устройств (частотных преобразователей, устройств мягкого старта, тиристорных регуляторов мощности) [4-6].

Таким образом, при проектировании привода крана необходимо учитывать ограничения на силовую электронную технику, которая в последнее время довольно широко используется. Классические ограничения на величину управления [7-10] не могут обеспечить требуемую динамику движения крана, так как не учитывают все виды ограничений на управление.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Значительное количество работ [11-14], в которых решена задача оптимального управления грузоподъемными кранами, используют классические ограничения на управляющую функцию. В работе [15] решена задача оптимального управления механизма грузоподъемной машины, который представлен наипростейшей одномассовой динамической моделью. Из этой работы следует, что использование модифицированного ограничения на управление не позволяет допустить перегрузку электродвигателя. Однако, использование силовой электронной техники усложняет ограничения на функцию управления.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель приведенной работы – разработать способы учета ограничения на функцию управления движением грузоподъемного крана с регулируемым электроприводом на этапе реализации управления.

Для достижения поставленной цели ставятся такие задачи: 1) провести анализ ограничений на функцию управления движением грузоподъемным краном; 2) разработать алгоритм учета ограничений на функцию управления движением крана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Область допустимых управлений движением грузоподъемных кранов, которые приводятся в движение от электрического привода, связана с ограничениями, которые возникают при эксплуатации его электрических и механических устройств. Обозначим об-

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УЧЕТА ОГРАНИЧЕНИЙ НА ФУНКЦИЮ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

ласть допустимых управлений как U . Тогда можно записать:

$$U = P_{\text{мех}} \cap P_{\text{эл}}, \quad (1)$$

где: $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{эл}}$ – множества допустимых значений управления, которые накладываются со стороны механического и электрического оборудования крана соответственно.

Для реализации управления движением крана важным есть обеспечение непревышения предельного значения его ускорения. Если предельное значение ускорения будет превышено, то колеса грузоподъемного крана будут пробуксовывать по крановому пути (рельсам), а это означает срыв управления. Одним из ограничений на управление со стороны механической части есть непревышение максимального значения скорости движения отдельных элементов крана, особенно быстроходных валов, зубчатых колес и т.д. Выполнение этого требования связано с тем, что при увеличении скорости интенсивно изнашиваются подшипниковые узлы механизмов. Что касается динамических показателей, которые также должны быть учтены при реализации управления, то здесь необходимо отметить условие непревышения граничных значений усилий и крутящих моментов, на которые рассчитанные отдельные элементы крановых механизмов: валы, зубчатые передачи, муфты, подшипники. Таким образом можно записать следующую формулу:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ск.}} \cap P_{\text{уск.}} \cap P_{\text{ус.}} \cap P_{\text{мом.}}, \quad (2)$$

где: $P_{\text{ск.}}$, $P_{\text{уск.}}$, $P_{\text{ус.}}$, $P_{\text{мом.}}$ – ограничения по скорости движения элементов крана, по ускорению движения крана, по усилиям и крутящим моментам в крановых элементах соответственно. В общем, множество допустимых значений управления, которые накладываются со стороны механического оборудования крана $P_{\text{мех}}$, есть постоянной, что, не значительно усложняет реализацию управления на практике.

Перейдем к анализу множества допустимых значений управления, которые накладываются со стороны электрического оборудования крана $P_{\text{эл}}$. Здесь необходимо учитывать ограничения, которые налагаются со стороны электродвигателя и силового преобразователя, который является источником питания электродвигателя. При анализе $P_{\text{эл}}$

можно не учитывать ограничение со стороны сети. Кроме того, можно не учитывать ограничения со стороны электрической коммутационной аппаратуры крана и кабелей питания. Итак, справедливой есть формула:

$$P_{\text{эл.}} = P_{\text{п.ч.}} \cap P_{\text{эл.д}}, \quad (3)$$

где: $P_{\text{эл.д}}$ и $P_{\text{п.ч.}}$ – ограничения, которые налагаются со стороны электродвигателя и частотного преобразователя.

Ограничение со стороны электродвигателя связаны с него перегрузочной способностью, ограничением допустимого напряжения питания обмоток двигателя, допустимой температурой изоляции. Если тепловая модель двигателя известна, то можно определить текущую температуру двигателя и сравнить ее с допустимой. Заметим, что существует альтернативный путь решения проблемы непревышения допустимой температуры изоляции. Для этого используют тепловые сенсоры.

Что касается обеспечения перегрузочной способности привода, то здесь необходимо использовать нелинейную функцию типа „насыщение”, которая „отрезает” куски функции управления, реализация которых связана с превышением перегрузочной способности привода.

Непревышение напряжения питания кранового двигателя требуется для того, чтобы сделать невозможным пробой изоляции обмоток двигателя или источника его питания. Таким образом, это – общее ограничение. При реализации быстрого изменения заданного электромагнитного момента двигателя в его обмотках возможно наведение значительных ЭДС, которые могут вызвать превышение допустимого напряжения питания двигателя. Кроме того, сама реализация быстрого изменения электромагнитного момента требует прикладывания к обмоткам двигателя значительных напряжений. Покажем это на примере двигателя постоянного тока. Уравнение электрического равновесия якорной цепи такого двигателя можно записать в виде [16]:

$$U_{\text{пит}} = \dot{\varphi} c \Phi + M_{\text{эл маг}} \frac{R_{\text{я}}}{c \Phi} + \frac{L}{c \Phi} \dot{M}_{\text{эл маг}}, \quad (4)$$

где: $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания двигателя; φ – угол поворота вала двигателя; c – коэффициент, который определяется конструкци-

ей двигателя Φ – магнитный поток двигателя; $M_{эл.магн.}$ – электромагнитный момент двигателя; $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи двигателя; L – индуктивность обмотки якоря. Для того, чтобы обеспечить быстрое изменение электромагнитного момента двигателя необходимо к обмоткам двигателя приложить значительное напряжение питания. Для того, чтобы обеспечить непревышение допустимого напряжения питания двигателя необходимо ограничивать интенсивность изменения электромагнитного момента. Ограничение по величине напряжения питания трансформируются в ограничения на скорость изменения электромагнитного момента двигателя. Подводя итог сказанного выше, можем записать формулу:

$$P_{эл.д} = P_{п.с.} \cap P_{ск.эл.маг.} \cap P_{тем.о} \quad (5)$$

где: $P_{п.с.}$, $P_{ск.эл.маг.}$, $P_{тем.о}$ – ограничение по перегрузочной способностью двигателя, по скорости изменения электромагнитного момента двигателя, по температуре изоляции обмоток двигателя соответственно.

Для ограничений, которые накладываются со стороны частотного преобразователя можно записать такое выражение:

$$P_{п.ч} = P_{п.с.} \cap P_{шв.эл.маг.} \cap P_{тем.т} \quad (6)$$

где: $P_{п.с.}$, $P_{ск.эл.маг.}$, $P_{тем.т}$ – ограничения связанные с перегрузкой частотного преобразователя по току, по скорости изменения электромагнитного момента двигателя, по температуре силовых транзисторов соответственно. Максимально допустимая величина тока частотного преобразователя, которая связана с ограничением $P_{п.с.}$, указана в его паспорте. Ограничение по температуре силовых транзисторов есть довольно сильным. Оно трансформируется в ограничение на величину тока частотного преобразователя и продолжительность его протекания.

Сравнение ограничений, которые накладываются со стороны электродвигателя $P_{эл.д}$ и частотного преобразователя $P_{п.ч.}$, показывают, что более сильными есть ограничения $P_{п.ч.}$. Это связано с тем, что частотный преобразователь содержит силовые транзисторы, которые довольно чувствительные к токовым перегрузкам. Необходимо также сказать и то, что современные частотные преобразователи содержат интеллектуальную защиту от разных аварийных режимов работы. Превышение указанных выше ограничений мо-

жет вызвать аварийное выключение частотного преобразователя, который в свою очередь, послужит причиной остановки кранового двигателя. Дальнейшая эксплуатация частотного преобразователя возможна лишь после устранения причины его выключения. Желательно не допускать подобных аварийных ситуаций, поскольку при этом существует опасность выхода из строя дорогого оборудования. Определим область допустимых управлений:

$$u \in U = P_{уск.} \cap P_{п.с.} \cap P_{ск.эл.маг.} \quad (7)$$

Выбор именно таких ограничений связан с их важностью. Кроме того, другие ограничения можно учесть соответствующим выбором мощности частотного преобразователя и его настройками.

Графическая интерпретация выражения (7) показана на рис. 1. Из рис. 1 видно, что область допустимых управлений является логической конъюнкцией множеств $P_{уск.}$, $P_{п.с.}$, $P_{ск.эл.маг.}$. Кроме того, на рис. 1. показано то, что величины указанных множеств допускают разную вариацию „своих” параметров. Для того, чтобы управление было допустимым, то есть чтобы выполнялось условие:

$$u \in U \quad (8)$$

необходимо разработать определенные методы „попадания” функции управления в допустимую область.

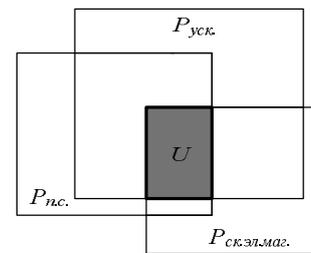


Рис. 1. Конъюнкция множеств $P_{уск.}$, $P_{п.с.}$, $P_{ск.эл.маг.}$, которая определяет область допустимых управлений U

Fig. 1. Conjunction sets $P_{уск.}$, $P_{п.с.}$, $P_{ск.эл.маг.}$, which defines the scope of admissible controls U

Заметим, что постановка задачи оптимального управления движением грузоподъемного крана с учетом условия (8) значительно усложняет ее решение. Поэтому избран иной подход – сначала решается задача оптимального управления динамической системой „кран–груз” и лишь тогда учитываются ограничения на управление (8). При этом управление системой определенным

образом модифицируется. Такая модификация управления может оставлять „оптимальность” управления [17], или модифицированное управление теряет „оптимальность” и тогда такую функцию называют квазиоптимальной. В качестве примера приведем задачу построения области допустимых значений управлений системой „кран-груз” (рис. 2).

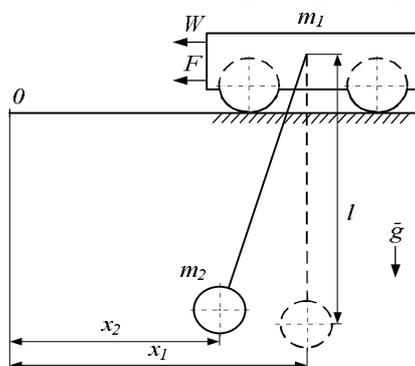


Рис. 2. Расчетная модель системы „кран-груз”

Fig. 2. The computational model of „crane-load”

Такая модель довольно широко используется в задачах исследования динамики и оптимального управления движением кранов пролетного типа [18, 19]. Принятая динамическая модель отображает лишь колебание груза на гибком подвесе, при этом не учитываются колебания в приводном механизме крана, а также колебания крановой металлоконструкции. Кроме того, примем предположение, что принятый закон изменения приводного усилия F „абсолютно точно” реализуется приводом крана (довольно часто в расчетах машин пренебрегают теми динамическими процессами, которые незначительно влияют на уровень динамических нагрузок их элементов [20]). Приведенная расчетная схема движения крана с грузом на гибком подвесе (рис.1) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = -F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1, \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l}(x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где: m_1 – приведенная масса приводного механизма и грузового крана; m_2 – масса груза; x_1, x_2 – координаты центров масс соответственно крана и груза; g – ускорение свободного падения; l – длина гибкого подвеса, F – суммарное тяговое или тормозное усилие,

которое действует на кран (в данной работе усилие F есть тормозным, ведь его направление совпадает с направлением приведенной силы сопротивления перемещению крана); W – приведенная сила сопротивления перемещению крана.

Введем обозначение для функции управления краном $u = \frac{-F - W}{m_1}$. Для того, чтобы

обеспечить ограничение на управление (8) необходимо разработать алгоритмы работы мехатронной системы управления движением крана с грузом на гибком подвесе. Для того, чтобы обеспечить неперевышение максимального значения ускорения крана во время его торможения необходимо выполнить условие:

$$|u| = a_{\max}, \quad (10)$$

где: a_{\max} – максимальное значение ускорения крана. Прежде чем устанавливать какое-то значение управления должна проходить проверка условия (10). Если условие (10) не выполняется, то система автоматически устанавливает управление:

$$u = \begin{cases} a_{\max}, & \text{если } u > a_{\max}, \\ -a_{\max}, & \text{если } u < -a_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

Если условие (10) выполняется, то функция управления остается без изменений. Для обеспечения условия неперевышения допустимого значения электромагнитного момента двигателя необходимо выполнить такое условие:

$$um_1 + W \leq F_{\text{доп}}, \quad (12)$$

где: $F_{\text{доп}}$ – допустимое значение приводного усилия, которое действует на кран и которое отвечает допустимому значению электромагнитного момента кранового электродвигателя. Выполнение этого условия сводится к обеспечению такого равенства:

$$u = \begin{cases} -\frac{W}{m_1}, & \text{если } u > -\frac{W}{m_1}, \\ -\frac{F_{\text{доп}} + W}{m_1}, & \text{если } u < -\frac{F_{\text{доп}} + W}{m_1}. \end{cases} \quad (13)$$

Первое условие в выражении (13) означает запрет превышения нулевого значения электромагнитного момента двигателя. Постановка этого условия позволяет эксплуатировать крановый электропривод лишь во

втором квадранте механической характеристики, которая обеспечивает знакопостоянство электромагнитного момента кранового двигателя.

Для обеспечения условия непревышения скорости изменения электромагнитного момента система управления движением крана должна выполнять такую проверку:

$$|u_i - u_{i-1}| < \Delta t \dot{u}_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где: u_i и u_{i-1} – значение функции управления на i -том и на $(i-1)$ -м шаге процесса движения крана соответственно; Δt – продолжительность времени между соседними дискретными управлениями u_i и u_{i-1} (шаг дискретизации управления); $\dot{u}_{\text{доп}}$ – допустимое значение скорости изменения управления, которое отвечает допустимой скорости изменения

электромагнитного момента приводного кранового двигателя. Правая часть неравенства (14) является модулем, поскольку в процессе движения крана управление может как возрастать, так и уменьшаться. Если условие (14) не выполняется, то управление устанавливается так:

$$u_i = \begin{cases} u_{i-1} - \Delta t \dot{u}_{\text{доп}}, & \text{если } u_i - u_{i-1} < -\Delta t \dot{u}_{\text{доп}}, \\ u_{i-1} + \Delta t \dot{u}_{\text{доп}}, & \text{если } u_i - u_{i-1} > \Delta t \dot{u}_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (15)$$

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма управления движением крана, которая реализует проверки (10), (12), (14) и модифицирует оптимальное управление, если это нужно.

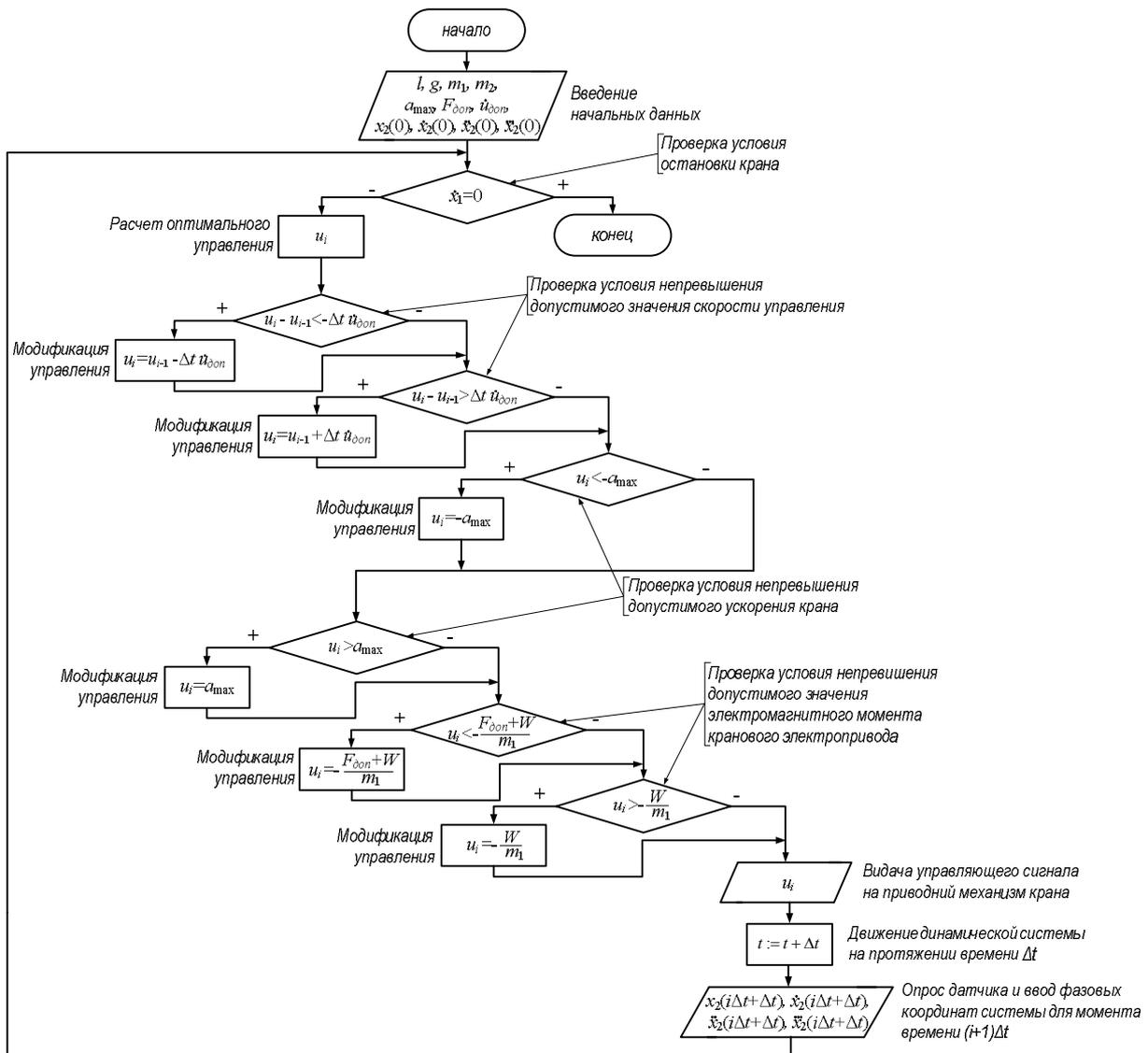


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления движением крана для модификации функции оптимального управления

Fig. 3. Chart control of all crane movements to modify the function of optimal control

Опишем процесс формирования модифицированного управления: 1) задают значение начальных параметров процесса; 2) вводят значение положения груза в начале процесса и высшие производные функции положения по времени; 3) проверяют условие остановки крана. Если кран имеет ненулевую скорость, то переходят к определению квазиоптимального управления; 4) выполняют расчеты оптимального управления; 5) выполняют проверку условия неперевышения допустимого значения скорости управления. В случае, когда условие не выполняется, модифицируют управление с помощью выражения (15); 6) выполняют проверку условия неперевышения допустимого ускорения крана. В случае когда условие не выполняется, модифицируют управление с помощью выражения (11); 7) выполняют проверку условия неперевышения допустимого значения электромагнитного момента кранового электропривода. В случае, когда условие не выполняется, модифицируют управление с помощью выражения (13); 8) выполняют выдачу квазиоптимального управления на приводной механизм крана; 9) выполняется движение системы на протяжении времени Δt ; 10) выполняют опрашивание датчика кинематических функций движения груза и переходят к третьему пункту алгоритма.

Необходимо отметить, что разработанный алгоритм можно обобщить на другие процессы движения крана и отдельных его механизмов.

ВЫВОД

В приведенной работе разработан способ учета ограничений на функцию управления движением грузоподъемного крана. При этом граница области допустимых управлений является сложной функцией электрических, кинематических и динамических показателей работы крана. На основе самых важных ограничений на управление краном разработан алгоритм учета ограничений, который реализуется мехатронной системой грузоподъемного крана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gerasimyak R.P. 1978: Tiristirnyy elektroprivod dlya kranov / Gerasimyak R.P. – М.: Energia. – 112.
2. Pevzner E.M. 1991: Ekspluatatsiya kranovykh tiristirnykh elektroprivodov / E.M. Pevzner, A.G. Yuare. – М.: Energoatomizdat. – 104.
3. Gerasimyak R.P. 1970: Elektroprivody kranovykh mekhanizmov / R.P. Gerasimyak, V.A. Parail. – М.: Energia. – 136.
4. Popov E.V. 2008: Ispolzovanie asinhronnykh dvigatelei s faznim rotorom v chastotno-reguliruemom elektroprivode pri modelirovanii knovogo elektrooborudovaniya // Podemno-transportnoe delo – №4. – 23–25.
5. Popov V.A. 2007: Modernizatsiya sistem upravleniya privodov kranov na lomopere-rabativaustchih predpriyatiyah / V.A. Popov, A.I. Jordan, S.A. Gubskiy // Podemnie so-oruzheniya. Spetsailnaya tekhnika. – №7. – 30–34.
6. Radimov S.N. 2007: Chastotniy privod mekhanizmov kranov s napolnym upravleniem / S.N. Radimov, K.A. Anichenko, A.V. Goryachev, V.N. Suprunenko // Podemnie sooruzheniya. Spetsailnaya tekhnika. – №7(71) – 22–24.
7. Petrov Yu.P. 1977: Variatsionnyye metody teorii optimal'nogo upravleniya / Yu.P. Petrov. – L.: Energia – 280.
8. Pontragin L.S. 1961: Matematicheskaya toeria optimalnykh protsessov / L.S. Pontragin, V.G. Boltianskiy, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mistschenko. – М.: Fizmatgiz. – 392.
9. Bellman R. 1960: Dinamicheskoye programmirivanie / R. Bellman. – М.: Izdatelstvo inostrannoy literatury. – 400.
10. Krasovskiy I.I. 1968: Teoria upravleniya dvizheniem (lineinye sistemy) / I.I. Krasovskiy – М.: Nauka. – 476.
11. Grigorov O.V. 1995: Sovershenstvovanie rabochih harakteristik kranovykh mekhanizmov: diss. na soisk. step. doktora tehn. nauk / Grigorov Otto Vladimirovich. – Н. – 386.
12. Svirgun V.P. 1989: Razrabotka optimalnykh zakonov upravleniya mostovim greifernym kranom i primeneniye mikroprotsessornoy sistemy dlya ih realizatsii: avtoref. diss. na soisk. step. kand. tehn. Nauk / V.P. Svirgun. – Н. – 15.
13. Chernousko F.L. 1980: Upravlenie kolebaniyami / F.L. Chernousko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov – М.: Nauka – 384.

14. Geronymus Ya.O. 1966: O nekotorykh metodah opredelenia optimalnogo zakona dvizhenia, rassmatrivaemogo kak upravlyauschee vozdeistvie / Ya.O. Geronymus, M.M. Perelmuter // *Machinivedenie*. – № 6. – 6-24.
15. Loveikin V.S. 2011: Obguntuvania vvedennya modyfikovanogo obmezhenia na funktsiu optimalnogo keruvanya tehničnymy sistemamy / V.S. Loveikin, Yu.O. Romasevich // *Sbornik nauchnyh trudov. Stroitelstvo, materialovedenie, machinostroenie. Intensifikatsia rabochih protsessov stroitelnyh i dirizhnyh mahin. Sevia: podemno-transportnye, stroitelnye i dirozhnye mashiny i oborudovanie*. – № 63 – 211–220.
16. Chilikin M.G. 1981: Obschiy kurs electroprivoda / M.G. Chilikin, A.S. Sandler. – M.: Energoizdat. – 576.
17. Loveikin V.S. 2013: Vstanovlenny umov optimalnosti keruvan tehničnymy systemsmy v zakritiy oblasti dopustymykh znachen / V.S. Loveikin, Yu.O. Romasevich // *Naukoviy visnyk NUBIP Ukrainy. Seria: tehnika ta energetika APK*. – 185 (3). – 141–151.
18. Chovnyuk Yu.V. 2011: Utochnena dynamichna model ruhu vizka z vantazhem na gnuchkomu pidvisi / Yu.V. Chovnyuk // *MOTROL*. – 13B – 130–137.
19. Budikov L.Ya. 1997: Mnogoparametricheskyy analiz dynamiky gruzopodemnykh kranov mostovogo tipa / L.Ya. Budikov – Lugansk: VUGU. – 210.
20. Litvinov O. 2006: Towards the dynamic calculation of machines / O. Litvinov // *MOTROL*. – 8A. – 210–223.

Key words: load-lifting crane, control, electric drive, tolerance range, algorithm.

**ANALYSIS AND DEVELOPMENT
OF ACCOUNTING METHODS
FOR RESTRICTIONS ON FUNCTIONS
TRAFFIC CONTROL LOAD-LIFTING
CRANES**

Summary. The analyses of the constraints on the control function of load-lifting crane with electric drive have been carried out. Established that the range of admissible values of the control is a complex function of the mechanical and electrical parameters of the crane. An algorithm accounting constraints on the control function have been developed.