

КЛАСИФІКАЦІЯ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РУХУ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН

Ловейкін В.С., д.т.н., Ромасевич Ю.О., к.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

У статті викладена класифікація критеріїв оптимізації вантажопідйомних кранів як динамічних систем. Приводяться рекомендації, щодо використання критеріїв для того чи іншого кранового механізму та режиму його роботи

Постановка проблеми. Ефективність використання вантажопідйомних машин залежить від багатьох показників, серед яких найважливіше місце займають: продуктивність, енергоефективність, надійність, безпечність, зручність у експлуатації, екологічність тощо. Найкраща ефективність використання вантажопідйомних кранів відповідає екстремальним значенням перерахованих показників для досягнення яких, необхідно провести їх оптимізацію. Оптимізація, як відомо, виконується формальними математичними методами і тому вимагає чіткої математичної постановки задачі. Одним із елементів оптимізаційної задачі є критерій, вибір якого впливає на ефективність експлуатації вантажопідйомної машини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [1-4] достатньо повно викладена математична постановка задачі оптимального керування динамічними системи, які описуються звичайними диференціальними рівняннями, а також приводяться деякі види критеріїв оптимізації. Зокрема у роботі [4] наводяться інтегральні критерії для оптимізації систем автоматичного керування та регулювання і розкривається їх фізична сутність. У роботах [5-8] викладено теоретичні та прикладні питання оптимізації керування динамічними системами із розподіленими параметрами. Однак, у цих та інших роботах, присвячених оптимальному керуванню, не приводиться класифікація критеріїв та не вказуються області їх застосування.

Для оптимізації режимів руху вантажопідйомних машин використовуються різноманітні критерії: швидкодії [9-18], енергетичні [11], динамічні [19, 20], кінематичні [19, 21, 22] та інші. Однак, для того, щоб здійснити правильний вибір критерію оптимізації руху вантажопідйомного крана необхідно певним чином структурувати множину існуючих критеріїв та вказати доцільність їх використання для того чи іншого механізму чи режиму руху.

Постановка мети та задач дослідження. Метою приведеного дослідження є проведення класифікації оптимізаційних критеріїв, які використовуються для синтезу режимів руху вантажопідйомних машин і механізмів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: 1) класифікувати критерії оптимізації режимів руху

вантажопідйомних машин за різними показниками; 2) обґрунтувати використання критеріїв для конкретних режимів руху механізмів вантажопідйомних машин.

Виклад основного матеріалу. Рух вантажопідйомних машин та механізмів описується, як правило, звичайними неоднорідними диференціальними рівняннями або/і рівняннями у частинних похідних. Від того яка функція стоїть у правій частині рівняння (функція керування) буде залежати рух однієї чи декількох ланок вантажопідйомного крана. Метою руху ланки того чи іншого механізму вантажопідйомного крана, є переміщення її із одного положення у інше за деякий час. Якщо розглядати вантажопідйомний кран як динамічну систему, яка характеризується вектором фазових координат $x^T = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, то мета керування полягає у переведенні фазової точки із початкового положення $x(0)$ у кінцеве $x(t_p)$ у фазовому просторі розмірності n . Однак, існує нескінченна кількість фазових траєкторій, які з'єднують вказані точки. Отже мета керування може бути досягнута декількома різними способами. Для того, щоб обрати один спосіб (одну функцію керування) необхідно поставити додаткові вимоги. Математичний вираз, що дає кількісну оцінку ступеню виконання вимог, накладених на спосіб керування, називається **критерієм оптимізації**. Спосіб керування, який задовольняє поставлені вимоги найкраще, тобто перетворює критерій оптимізації у екстремум, називається **оптимальним керуванням**.

Перед тим як привести класифікацію оптимізаційних критеріїв режимів руху вантажопідйомних машин необхідно зробити два зауваження. Перше стосується того, що у прийнятій класифікації не розглядаються параметричні критерії оптимізації, наприклад: жорсткість, демпфування, мас ланок механізмів та їх похідні наприклад, власні частоти коливань ланок. Як правило, ці параметри входять у диференціальні рівняння руху ланок механізмів у вигляді постійних коефіцієнтів. Математично визначення оптимальних значень цих параметрів виконується у замкненому просторі параметрів. Оптимізації конструктивних параметрів машин та механізмів присвячені роботи Банічука М.В. [23], Соболя І.М., Статнікова Р.Б. [24], Реклейтіса Г., Рейвіндрана А., Регсдела К. [25, 26], Голубенцева М.О. [27], Горського Б.Є. [28], Хітрика В.Є. [29], Бербюка В.Є. [30] та інших дослідників. На більш широку постановку задачі оптимізації вказує Р.Беллман [31], зауважуючи, що мінімізація оптимізаційного критерію повинна виконуватись одночасно у просторах керувань і параметрів. У даному дослідженні ми обмежимося лише задачами оптимального керування і не розглядаємо задачі визначення оптимальних параметрів крана.

Другим зауваженням є те, що приведена нижче класифікація не включає економічні критерії оскільки кожне підприємство, на якому працюють вантажопідйомні крани має власну специфіку. Загалом екстремізація економічних критеріїв виконується методами логістики, які основані на математичних методах лінійного [32] та нелінійного програмування [33], динамічного програмування [34, 35] та інших методах.

Враховуючи приведені вище зауваження будемо розглядати такі оптимізаційні критерії, мінімізація яких виконується лише шляхом

знаходження функції керування із деякого замкненого простору. Крім того, розглядаємо вантажопідйомний кран як динамічну систему заданої і незмінної конфігурації у сенсі динаміки.

У наведеній класифікації не розглядаються оптимізаційні критерії за типом екстремуму, що досягається у процесі оптимізації. Відповідним підбором знаку критерію його можна привести до вимоги мінімізації або максимізації.

Класифікацію оптимізаційних критеріїв, які використовуються для оптимізації керування рухом механізмів вантажопідйомних кранів, як динамічних систем виконаємо за певними показниками.

1. За фізичною сутністю критерії поділяються на: динамічні, кінематичні, енергетичні, швидкодії. Приведемо приклади вказаних критеріїв на прикладі одномасової динамічної моделі. Динамічний критерій:

$$I_{F_{\text{дин}}^2} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} F_{\text{дин}}^2 dt = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} (m\ddot{x})^2 dt, \quad (1)$$

де: m – приведена до поступального руху маса ланки механізму;

t_p – тривалість руху механізму;

x – узагальнена координата ланки механізму (x є функцією однієї незалежної змінної – часу t , якщо не вказано інше);

$F_{\text{дин}}$ – динамічна складова приводного зусилля.

Точка над символом означає диференціювання за часом. Критерій (1) відображає середнє, за час руху, значення квадрату динамічної складової приводного зусилля. Динамічні критерії дають змогу оцінити зусилля та моменти, що діють у елементах вантажопідйомної машини, а також їх вищі похідні за часом. Мінімізація динамічних критеріїв дозволяє зменшити діючі у елементах механізмів зусилля та, як наслідок, подовжити їх строк служби. Кінематичний критерій:

$$I_{\dot{x}^2} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \dot{x}^2 dt. \quad (2)$$

Критерій (2) відображає середнє, за час руху, значення квадрату швидкості руху ланки механізму. Використання кінематичних критеріїв дозволяє дати оцінку кінематичним характеристикам руху ланки механізму: переміщенням, швидкостям, прискоренням, ривкам тощо. Мінімізація цих критеріїв дає змогу реалізувати режими руху, які враховують різноманітні кінематичні обмеження: на величину швидкості, прискорення тощо. Енергетичний критерій:

$$I_{N_{\text{дин}}^2} = \sqrt{t_p} \int_0^{t_p} N_{\text{дин}}^2 dt = \sqrt{t_p} \int_0^{t_p} (m\ddot{\dot{x}})^2 dt, \quad (3)$$

де: $N_{\text{дин}}$ – динамічна складова потужності.

Критерій (3) виражає квадрат енергетичних витрат протягом тривалості руху механізму. Енергетичні критерії відображають витрати або/і втрати енергії (механічної, електричної) при виконанні руху. Енергетичні критерії варто використовувати для потужних механізмів або/і у випадках коли вартість використовуваної краном енергії (електричної, дизельного палива тощо) є значною. Необхідно зазначити, що у деяких випадках чітке розмежування між кінематичними, динамічними та енергетичними критеріями провести неможливо, оскільки енергетичні та динамічні характеристики механізму виражаються через його кінематичні функції, як це видно із виразів (1) та (3). Критерій швидкодії:

$$I_{t_p} = \int_0^{t_p} dt = t_p \quad (4)$$

відображає тривалість руху ланки механізму. Даний критерій бажано використовувати для синтезу оптимальних режимів руху портових кранів-перевантажувачів та контейнерних кранів. Однак необхідно пам'ятати про те, що оптимальне за швидкодією керування завжди є релейним, що погіршує динаміку руху крана та врешті-решт веде до передчасного виходу його із ладу. Тому використання критерію (4) рекомендується виконувати у структурі комплексного критерію, у який входять також інші складові, наприклад, динамічні критерії.

2. За математичним представленням критерії бувають: інтегральні, термінальні, інтегрально-термінальні (узагальнені), інтегрально-термінальні (для систем із розподіленими параметрами). Приведемо вирази вказаних критеріїв.

Інтегральний критерій:

$$I = \int_0^{t_p} P(x, \dot{x}, \dots, x^{(k)}, t) dt, \quad (5)$$

де: P – підінтегральний вираз критерію;

k – найвищий порядок похідної за часом у підінтегральному виразі P .

Інтегральний критерій відображає показник якості руху вантажопідійомної машини протягом усього проміжку часу $[0, t_p]$.

Термінальний критерій:

$$T = T\left(t_\alpha, x, \dot{x}, \dots, x^{(z)}\right), \quad t_\alpha \in [0, t_p], \quad (6)$$

де: z – найвищий порядок похідної за часом у термінальному критерії T ;

t_α – моменти часу із часового проміжку $[0, t_p]$, ($\alpha=1, 2, \dots, r$);

r – кількість моментів часу в які проводиться «оцінка» руху за допомогою термінального критерію.

Зазначимо, що у випадку зведення оптимізаційної задачі до крайової, підбором крайових умов можна досягнути глобального мінімуму термінального критерію. При цьому розв'язок оптимізаційної задачі шукається у звуженому класі функцій, які задовольняють вимозі мінімізації термінального критерію [36]. Необхідно зробити зауваження стосовно інтегральних та термінальних критеріїв. Інтегральний критерій дає оцінку показнику якості руху на всьому проміжку руху динамічної системи. У деякі моменти часу підінтегральний вираз критерію (5) може приймати великі значення. Але, оскільки, тривалість таких моментів незначна, то вони не значно вплинуть на величину критерію. Однак, великі значення оцінюваного показника руху, який виражається підінтегральною функцією у (5), можуть кардинально впливати, наприклад на надійність крана. У випадку використання інтегрального критерію (1) короткочасні „пікові” динамічні зусилля можуть викликати поломку кінематичних зачеплень у приводі. Вказаний недолік інтегрального критерію компенсує термінальний: дійсно, вираз цього критерію можна підібрати так, щоб він оцінював значення динамічного зусилля у певні „критичні” моменти часу (пуск, реверс тощо). Однак термінальний критерій не дає змоги дати оцінку режиму руху ланки механізму на всьому проміжку $[0, t_p]$, що, звичайно, є недоліком цього критерію. Для того, щоб поєднати бажані властивості і позбутись недоліків інтегрального та термінального критеріїв використовують інтегрально-термінальний (узагальнений) критерій:

$$IT = I + T. \quad (7)$$

Зазначимо, що критерій IT можна розглядати як модифікований інтегральний критерій, оскільки моменти часу t_α у структурі термінального критерію входять у проміжок часу $[0, t_p]$, за яким проводиться оцінка за допомогою інтегрального критерію. Критерій (5) можна перетворити у (7), якщо назначити значну „ціну” підінтегрального виразу у моменти часу t_α . Варіаційні задачі, які відповідають приведеним критеріям (5-7) відомі під назвами: Лагранжа, Майера та Больца відповідно [37]. Інтегрально-термінальний (для систем із розподіленими параметрами) критерій:

$$IT_{p.n.} = \int_0^L P \left(x(t, l), \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial x}{\partial l}, \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 x}{\partial l^2}, \frac{\partial^2 x}{\partial t \partial l}, \dots, \frac{\partial^{k+s} x}{\partial t^k \partial l^s}, t, l \right) dl \Big|_{t=t_\alpha}, \quad (8)$$

де: s – найвищий порядок похідної за незалежною змінною l у підінтегральному виразі P ;

l – незалежна змінна (параметр) динамічної системи;

L – найбільше значення параметру l .

Диференціальними рівняннями у частинних похідних описуються коливальні рухи канатів (поперечні та повздовжні), балок кранових мостів, довгих валів у передачах тощо. Для оцінки руху цих та інших елементів крана можуть бути використані критерії (8). Ці критерії, наприклад, можуть

представляти вимоги щодо мінімізації енергії коливань елементу із розподіленими параметрами у моменти часу t_α (зокрема при $t = t_\delta$).

3. За структурою оптимізаційні критерії бувають: одиничні та комплексні. Одиничні критерії вимагають мінімізації одного небажаного показника. Якщо цей показник вибрано невдало, то мінімізація критерію не може у значній мірі вплинути на підвищення ефективності роботи вантажопідйомного крана. Для відображення декількох небажаних показників використовуються комплексні критерії загальної структури яких представляється у вигляді:

$$IT_{\text{компл}} = \sum_{j=1}^{\tilde{j}} \delta_j I_j + \sum_{i=1}^{\tilde{i}} \delta_i T_i, \quad (9)$$

де: δ_j – ваговий коефіцієнт, який відображає „вагу” j -того одиничного інтегрального критерію I_j ;

δ_i – ваговий коефіцієнт, який відображає „вагу” i -того одиничного термінального критерію T_i ;

\tilde{j} та \tilde{i} – кількість відповідно інтегральних та термінальних критеріїв.

Вагові коефіцієнти δ_j і δ_i пов’язані співвідношенням [19]:

$$\sum_{j=1}^{\tilde{j}} \delta_j + \sum_{i=1}^{\tilde{i}} \delta_i = 1. \quad (10)$$

Якщо прийняти, наприклад, $\sum_{j=1}^{\tilde{j}} \delta_j + \sum_{i=1}^{\tilde{i}-1} \delta_i = 0$, то критерій $IT_{\text{компл}}$

перетворюється у одиничний термінальний критерій. Якщо $\sum_{j=1}^{\tilde{j}-1} \delta_j + \sum_{i=1}^{\tilde{i}} \delta_i = 0$, то критерій $IT_{\text{компл}}$ перетворюється у одиничний інтегральний критерій.

4. За розмірністю критерії поділяються на: розмірні та безрозмірні. Розмірні критерії дають змогу наглядно оцінити ефект від їх мінімізації. Наприклад, критерій (3), одиницею якого є Джоуль, показує енергетичні витрати при реалізації оптимізованого режиму руху механізму. Критерій (4), який вимірюється у секундах, відображає тривалість часу на виконання руху. Зазначимо, що використання комплексного розмірного критерію вимагає приведення різних фізичних величин до однієї розмірності. Це виконується шляхом множення їх на відповідні розмірні коефіцієнти, наприклад: сталі часу, жорсткості, коефіцієнти демпфування тощо. Приведемо найпростіший приклад:

$$I_{\text{компл}} = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} F_{in}^2 dt + \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} F_{np}^2 dt = \frac{m^2}{t_p} \int_0^{t_p} \dot{x}^2 dt + \frac{c^2}{t_p} \int_0^{t_p} x^2 dt, \quad (11)$$

де: F_{in} – сила інерції одномасової коливної системи;
 F_{np} – сила пружності пружного елемента системи;
 m – зосереджена маса елемента системи;
 c – жорсткість пружного елемента системи;
 x – координата зосередженої маси системи.

Критерій (11) відображає середньоквадратичні, за період часу $[0, t_p]$, значення сил інерції та пружної сили, які виникають у коливній системі. Безрозмірні критерії вимагають приведення усіх їх складових до безрозмірних величин. Прикладом безрозмірного критерію є безрозмірна питома дія [38, 39].

5. За видом математичного виразу критерії розрізняють: лінійні та нелінійні. Лінійні критерії оптимізації вимагають розв'язання лінійних екстремальних задач. Прикладом лінійних критеріїв є функціонали (1) та (2) Розв'язок цих задач, як правило, шукають аналітичними методами. Мінімізація нелінійних критеріїв вимагає знаходження розв'язку нелінійних оптимізаційних задач. У загальному випадку ці розв'язки неможливо знайти у аналітичному вигляді і тому використовуються наближені чисельні методи. Прикладом нелінійного критерію є критерій виду:

$$I = \int_0^{t_p} (\dot{x} - v)^b dt, \quad (12)$$

де: v – задана швидкість руху ланки механізму;
 b – показник степеня підінтегрального виразу критерію.

Якщо $b = 2$, то оптимізаційна задача називається лінійно-квадратичною. У випадку $b > 2$, наприклад, $b = 4$ критерій (12) є нелінійним. Такий критерій „штрафує” значні відхилення швидкості ланки механізму від заданого значення v протягом часу $t \in [0, t_p]$. Якщо обрати $b = 0,2$, то критерій (12) приблизно однаково „штрафує” як невеликі так і великі відхилення швидкості ланки механізму від заданого значення v протягом часу $t \in [0, t_p]$. У загальному випадку показник степеня b є несталим, який змінюється в залежності від величини динамічної похибки швидкості руху системи $\dot{x} - v$. У випадку $b \rightarrow 0$ критерій (12) перетворюється у критерій швидкодії (4). Загалом найбільший інтерес для оптимізації режимів руху механізмів вантажопідійомних машин представляють нелінійні критерії. Тому актуальним завданням є вибір чисельних методів їх розв'язку. При виконанні вказаного вибору чисельного методу необхідно враховувати обчислювальні можливості цифрової системи, необхідність розв'язувати оптимізаційну задачу в режимі реального часу, складність самої задачі та інші фактори.

Висновки. У даному дослідженні приведено класифікацію критеріїв оптимізації, які використовуються для синтезу режимів руху кранових механізмів. Проаналізовано властивості, переваги та недоліки критеріїв та вказані раціональні області їх використання. Приведені результати можуть бути

використані для подальших досліджень оптимальних режимів руху механізмів вантажопідйомних кранів. Крім того, деякі із приведених критеріїв можуть бути використані при виконанні динамічного аналізу вантажопідйомних машин у якості характерних показників руху системи.

Список використаних джерел

1. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2003. – 614 с.
2. Александров В.В. Оптимальное управление движением / В.В. Александров, В.Г. Болтянский, С.С. Лемак, Н.А. Парусников, В.М. Тихомиров. – М.: Физматлит, 2005. – 376 с.
3. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
4. Фельдбаум А.А. Методы теории автоматического управления / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 744 с.
5. Ж.Л. Лионс Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными [пер. с франц. Розова]. – М.: Мир, 1972. – 416 с.
6. Лурье К.А. Оптимальное управление в задачах математической физики / К.А. Лурье. – М.: Наука, 1975. – 480 с.
7. Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения / А.В. Фурсиков. – Новосибирск: Научная книга, 1999. – 352 с.
8. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский – М.: Наука, 1965. – 476 с.
9. Григоров О.В. Совершенствование рабочих характеристик крановых механизмов: дисс. на соиск. степ. доктора техн. наук: 05.05.05 / Григоров Отто Владимирович. – Х., 1995. – 386 с.
10. Свиргун В.П. Разработка оптимальных законов управления мостовым грейферным краном и применение микропроцессорной системы для их реализации: автореф дисс. на соиск. степ. канд техн. наук: спец. 05.05.05 „Подъемно-транспортные машины” / В.П. Свиргун. – Х., 1989. – 15 с.
11. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Єрофєєв. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
12. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв. – Одесса.: СМІЛ, 2008. – 192 с.
13. Бушер В.В. Асинхронный электропривод подъемно-транспортных механизмов с микропроцессорным управлением: автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: спец. 05.09.03 „Электрические комплексы и системы, включая их управление и регулирование” / В.В. Бушер. – Одесса, 1993. – 16 с.

14. Базил Ш. Управление электроприводом циклически работающих механизмов горизонтального перемещения: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Базил Шафик. - Одесса, - 1993. – 186 с.
15. Мельникова Л.В. Автоматизация технологического процесса перемещения механизма с подвешенным грузом средствами микропроцессорного управления: дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: 05.09.03 / Мельникова Любовь Васильевна. - Одесса, 2000. – 116 с.
16. Зайцев Ю.И. Исследование нестационарных колебаний и оптимальные режимы работы грузоподъемных машин с поступательными движениями: автореф. дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук: спец. 01.02.06 „Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры”/Ю.И. Зайцев. –Х., 1981. – 26с.
17. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. - М.: Наука, 1980. - 384 с.
18. Акуленко Л.Д. Асимптотические методы оптимального управления / Л.Д. Акуленко – М.: Наука, 1987. – 368 с.
19. Ловейкин В. С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В.С. Ловейкин– К.: УМК ВО, 1990. – 168 с.
20. Будіков Л.Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідйомних кранів мостового типу: монографія / Л.Я. Будіков. – Луганськ: вид-во СНУ ім. Даля, вид. 2-е, 2003. – 210 с.
21. Геронимус Я.Л. О некоторых методах определения оптимального закона движения, рассматриваемого как управляющее воздействие / Я.Л. Геронимус, М.М. Перельмутер // Машиноведение. – 1966. – № 6. –С. 6-24.
22. Перельмутер М.М. Устранение колебаний груза, подвешенного к крановой тележке, воздействием на его электропривод / М.М. Перельмутер, Л.Н. Поляков // Известия вузов. Электромеханика. – 1971. – № 7. – С. 769-774.
23. Баничук Н.В. Введение в оптимизацию конструкций / Н.В. Баничук. – М.: Наука, 1986. – 303 с.
24. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников – М.: Наука, 1981 – 110 с.
25. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. [пер. с англ. В.А. Алтаева, В.И. Моторина] – М.: Мир, 1986. – 349 с.
26. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 2. [пер. с англ. В.А. Алтаева, В.И. Моторина]. – М.: Мир, 1986. – 320с.
27. Голубенцев М.О. Интегральные методы в динамике / М.О. Голубенцев – К.: Техніка, 1967. – 351 с.
28. Горский Б.Е. Динамическое совершенствование механических систем / Б.Е. Горский. – К.: Техніка, 1987. – 200 с.
29. Хитрик В.Э. Методы динамической оптимизации механизмов машин-автоматов / В.Э. Хитрик. – Л.: из-во Ленинградского ун-та, 1974. – 116 с.
30. Бербюк В.Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем / В.Е. Бербюк – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
31. Bellman R. Notes on control processes. I. On the minimum of maximum deviation. / R. Bellman // Quarterly. Oppl. Math. - January 1957. - Vol. 14. - P.

- 419-423.
32. Банди Б. Основы линейного программирования. [пер. с англ. О.В. Шихеева]. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
 33. Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. Единый подход. [пер. в англ. Д.А. Бабаева]. – М.: Советское радио, 1973. – 312 с.
 34. Арис Р. Дискретное динамическое программирование. [пер. в англ. Ю.П. Плотникова]. – М.: Мир, 1969. – 172 с.
 35. Смехов А.А. Автоматизированные склады / А.А. Смехов. М.: Машиностроение. 1987. – 296 с.
 36. Ловейкин В.С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом: монографія / В.С. Ловейкин, Ю.О. Ромасевич – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2010. – 184 с.
 37. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров– Л.: Энергия, 1977. – 280 с.
 38. Горский Б.Е. Безразмерные критерии динамического совершенствования механических систем / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Критерии качества и эффективности механических систем. – К.: Знание, 1978. – С. 12-15.
 39. Горский Б.Е. Расширение понятия коэффициента полезного действия на все удельные действия / Горский Б.Е., Ловейкин В.С. // Динамика и прочность тяжелых машин. – Днепропетровск.: из-во ДГУ, 1982. – Вып. 6. – С. 13-20.

Аннотация

КЛАССИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Ловейкин В.С., Ромасевич Ю.О.

В статье приведена классификация критериев оптимизации грузоподъемных кранов как динамических систем. Приводятся рекомендации относительно использования критериев для того или иного кранового механизма и режима его работы

Abstract

CLASSIFICATION OF OPTIMIZATION CRITERIA OF LOAD-LIFTING MACHINES MOVEMENT MODES

V. Loveikin, Y. Romasevich

In article classification of criteria of optimization of load-lifting cranes as dynamic systems is resulted. Recommendations concerning use of criteria for this or that mechanism of the crane and a mode of its work are resulted