

SAT-1.202-1-RR-01

A COMPARATIVE STUDY OF GANTRY CRANES LEVEL-
LUFFING JIB SYSTEMS¹³⁷

Emil Bargazov, MSc. (Eng)

Aspirant Department "Repair, Reliability, Mechanisms, Machines, Logisticaliy and Chemical Technlogys", UniversityofRuse, Ruse 7017, Bulgaria
E-mail: ebargazov@uni-ruse.bg

Toni Uzunov, Assoc. Prof. PhD

Department "Repair, Reliability, Mechanisms, Machines, Logisticaliy and Chemical Technlogys", UniversityofRuse, Ruse 7017, Bulgaria
E-mail: tuzunov@uni-ruse.bg

Ognyan Alipiev, Prof. PhD

Department "Repair, Reliability, Mechanisms, Machines, Logisticaliy and Chemical Technlogys", UniversityofRuse, Ruse 7017, Bulgaria
E-mail: oalipiev@uni-ruse.bg

Danil Bortyakov, Assoc. Prof. PhD

Department "TRANSPORT AND TECHNOLOGY SYSTEMS"
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, St. Petersburg, Politekhnicheskaya ul. 29, Russia
E-mail: bortyakov@ratte.ru

***Abstract:** A comparative study of the two basic types of modification range systems of the level-luffing jib of the gantry cranes: 1) mounted on a support spatial frame – KPP 16(20)–30; 2) mounted on a column - SOKOL 16/20/32 t to 32/25/16 m is made. Basic operational and structural-technological parameters, characterizing the operation of cranes, using a mathematical model are studied. The interaction of this parameters and their impact on the operation of the crane are shown.*

***Keywords:** Gantry cranes, Boom system, Level-luffing jib system, Column, Gantry, Three-dimensional frame, Mathematical model*

Статията е резултат от сътрудничество между Катедра "Ремонт, Надеждност, Механизми, Машини, Логистични и Химични Технологии", Русенски университет, България и Кафедра "ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт металлургии, машиностроения и транспорта, г. Санкт-Петербург, Россия.

ВЪВЕДЕНИЕ

При съвременното високо ниво на развитие на информационните и комуникационни технологии, процесите на обработка на товари в мултимодалните терминали са отлично организирани с помощта на компютърни системи. Това изисква от претоварващата техника, в повечето случаи портални кранове, да работи с висока производителност и надеждност. Ето защо, при изследване, разработване и проектиране на портални кранове като цяло и отделно на системи за изменение на обсега на стрелата (СИОС), в днешните динамични условия с практически успех се използват математически модели, които дават възможност за оптимизация.

¹³⁷ Presented a parallel sessions room 1.202 report of October 29, 2016 with the original title: СПРАВНИТЕЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТРЕЛОВИ СИСТЕМИ НА ПОРТАЛНИ КРАНОВЕ

технологии моделирането на работата на машината, както и процесите, протичащи при взаимодействието между отделните ѝ елементи и в самите тях, се реализира с висока точност. Резултатите от това моделиране се считат за меродавни и се използват правомерно при съставянето на работна конструктивно-технологична документация и при практическата организация на производството.

II. МЕТОДИКАТА – ПРАКТИКА И ПРИЛОЖЕНИЕ

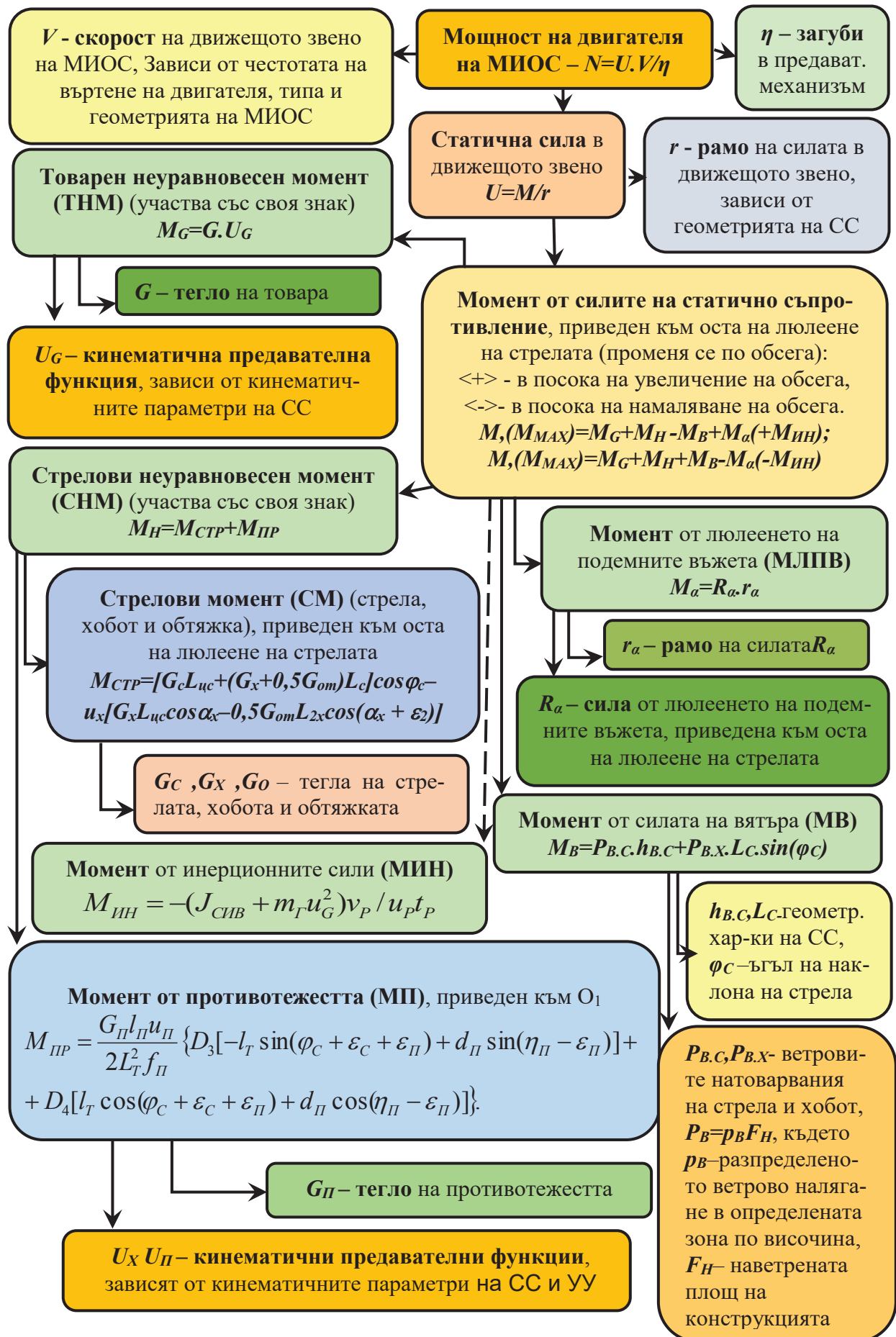
Методите за изчисление и оразмеряване на портални кранове се развиват през годините следвайки изискванията на обществото, възможностите на производството на машините и на инженерите, които ги разработват и проектират [1, 2, 3, 4].

Към момента съществуват работоспособни методики и съставени на тяхна основа компютърни математически модели за описание и изследване на всички елементи на порталния кран и отделно за СИОС [4]. Но в последните десетилетия с прогреса на електрониката, широко навлиза честотното управление на електродвигателите, практически във всички отрасли на машиностроенето. То осигурява безстепенно пускане, спиране и регулиране на скоростта на механизми и задвижвани полезни маси, при силно намалени динамични процеси и икономия на електроенергия. Това създава условия тези машинни елементи да бъдат по-леко натоварени в сравнение със съществуващите задвижвания. Появява се реална възможност, да бъдат преоразмерени в посока на намаляване на масата им, но за това са необходими съвременни системи за изчисление и оптимизация.

В отговор на тези изисквания, приложени върху СИОС, е създадена съвременна методика за описание на работата, изследване и проектиране на тази система с помощта на математически модел [1]. Получените резултати с успех се използват в производството на портални кранове. Методиката е продукт на натрупания опит в катедра „Транспортни и технологични системи“ на Санкт-Петербургския политехнически университет „Петър Велики“ и е дело на Д.Е.Бортяков и А.Н.Орлов. Тя се основава на векторния метод на Зиновьев В.А. за изследване на равнинни механизми, при който по аналитичен начин се установява връзка между кинематичните характеристики на механизма и неговите метрични параметри (размерите на звената) и използването на кинематични предавателни функции (КПФ) – аналози на съответните величини. С помощта на уравненията на Лагранж от втори род се съставят необходимия брой диференциални уравнения според избраните степени на свобода, описващи движението на системата и чрез тях се моделират различни режими и процеси. По този начин е представена работата на СИОС, като взаимодействие на включените в нея (фиг. 1): А) Стрелова система (СС) – състояща се от: хобот - 3, стрела - 4 и обтяжка - 5; Б) Уравновесяващо устройство (УУ) – с включени в него: щанга - 7, кобилица - 9 и противотежест - 10; В) Механизъм за изменение на обсега на стрелата (МИОС) – със съставни части: рейка - 8 и предавателен механизъм (люлка, редуктор), съединител, спирачка и двигател - 11. Подемният механизъм е изобразен чрез: окачения товар - 1, подемните въжета - 2 и подемната лебедка - 6, която реално се намира на височина около нивото на оста Y_K , но показаното ѝ разположение не влияе на модела. Според тази подробна схема, се представя методиката на аналитично изследване на СИОС.

Блок - схема на последователността на изчисленията за определяне на действащите натоварвания и на мощността на двигателя, необходима за преодоляването им, е показана на фиг. 2.

Методиката разглежда СИОС като два четиризвенни механизма СС и УУ с корави звена, показани на фиг. 1 в координатна система $Y_K O_K Z_K$. Работейки с подходящи геометрични зависимости са съставени необходимите функции на положението - КПФ от нулев порядък [1] и след тяхното диференциране по времето са определени изразите на КПФ от първи порядък (аналози на скоростта) както следва на елементите:



Фиг. 2. Блок - схема за определяне на мощността на двигателя в МИОС

- Подемните въжета при вертикално движение по оста Z_K - $u_K = -\dot{H}_{ПЕР} / \dot{\varphi}_C$ (1)
- Върха на хобота при вертикално движение по оста Z_K - $u_Z = \dot{z}_{OX} / \dot{\varphi}_C$ (2)
- Товара при вертикално движение по оста Z_K - $u_G = \dot{z}_Г / \dot{\varphi}_C = u_Z + u_K$ (3)
- Товара и върха на хобота при хоризонтално движение по оста Y_K - $u_\rho = \dot{\rho} / \dot{\varphi}_C$ (4)
- Хобота при равнинно движение в равнината $Y_K O_K Z_K$ - $u_X = \dot{\alpha}_X / \dot{\varphi}_C$ (5)
- Обтяжката при въртеливо движение около оста O_2 - $u_{OT} = \dot{\alpha}_{OT} / \dot{\varphi}_C$ (6)
- Противотежестта при въртеливо движение около оста O_5 - $u_\Pi = \dot{\alpha}_\Pi / \dot{\varphi}_C$ (7)
- Предавателния механизъм (двигател - люлка) - около оста O_4 - $u_M = \dot{\varphi}_D / \dot{y}_P$ (8)
- Задвижващото звено – рейката – при движение по нейната ос - $u_P = \dot{y}_P / \dot{\varphi}_C$ (9)
- Механизма за изменение на обсега на стрелата (МИОС) - $u_{ИВ} = u_M u_P = \dot{\varphi}_D / \dot{\varphi}_C$ (10)

Така определените КПФ характеризират изменението на функцията „скорост“ при положение, че звеното, към което се привеждат всички скорости, ускорения и моменти, в случая стрелата, се завърта с постоянна скорост $\varphi_C = 1 \text{ s}^{-1}$, (фиг. 1). Това е физическият смисъл на тези КПФ. За да бъдат изчислени ускоренията на елементите на СИОС или техни възли, са съставени изразите за КПФ от втори порядък - вторите производни по времето от функциите на положението (аналози на ускорението) [5]. С помощта на КПФ се определят интересуващите ни величини, участващи в изчисленията.

Определени са кинетичната и потенциалната енергия на СИОС. Кинетичната енергия T на системата представлява сума от кинетичните енергии на:

- стрелата - $T_C = 0,5 J_C \dot{\varphi}_C^2$, (11)

- хобота- $T_X = 0,5 (M_X l_C \dot{\varphi}_C^2 + J_X \dot{\alpha}_X^2 - 2 M_X l_C l_{Ц.X} \dot{\varphi}_C \dot{\alpha}_X \cos(\alpha_X + \varphi_C))$, (12)

- обтяжката - $T_{OT} = 0,5 J_{OT} \dot{\alpha}_{OT}^2$, (13)

- противотежестта - $T_\Pi = 0,5 J_\Pi \dot{\alpha}_\Pi^2$, (14)

- елементите на МИОС - $T_{ИВ} = 0,5 J_{ИВ} \dot{\varphi}_D^2$, (15)

- товара - $T_\Gamma = 0,5 m_\Gamma (\dot{z}_\Gamma^2 + \dot{y}_\Gamma^2)$. (16)

В горните уравнения J_C, J_X, J_{OT}, J_Π - са масовите инерционни моменти на стрелата, хобота, обтяжката и противотежестта съответно относно точките $0_1, 0_C, 0_2, 0_5$ съгласно фиг.1, M_X - масата на хобота, $J_{ИВ}$ - масовия инерционен момент на въртящите се елементи на МИОС.

Използвайки изразите за КПФ, за кинетичната енергия може да се запише

$$T = 0,5 [J_{СИВ} + m_\Gamma (u_\rho^2 + u_G^2)] \dot{\varphi}_C^2 + 0,5 m_\Gamma \dot{y}_\Gamma^2 + m_\Gamma \dot{\varphi}_C \left[\dot{y}_\Gamma u_\rho + \frac{y_\Gamma u_G}{H} \left(\dot{y}_\Gamma + \frac{y_\Gamma}{2H} u_K \dot{\varphi}_C \right) \right], \quad (17)$$

където приведенят към координатата φ_c масов инерционен момент на елементите на СИОС се определя по формулата

$$J_{СИБ} = J_C + J_X u_X^2 + M_X l_C^2 - 2M_X l_C l_{Ц.X} u_X \cos(\alpha_X + \varphi_C) + J_{OT} u_{OT}^2 + J_{П} u_{П}^2 + J_{ИБ} u_{ИБ}^2 \quad (18)$$

Потенциалната енергия Π на силите от теглата на елементите на СИОС представлява сума от потенциалните енергии на стреловата система Π_C , уравниващото устройство $\Pi_{П}$ и товара $\Pi_{Г}$ и се определя по формулата.

$$\Pi = \Pi_C + \Pi_{П} + \Pi_{Г}, \quad (19)$$

където компонентите се определят по формулите:

$$\Pi_C = -G l_{ЦС} \sin \varphi_C - G_X (l_C \sin \varphi_C - l_{Ц.X} \sin \alpha_X) - G_{OT} (d_{OT} \sin \eta_{OT} + l_{Ц.OT} \sin \alpha_{OT}), \quad (20)$$

$$\Pi_{П} = -G_{П} (d_{П} \sin \eta_{П} - l_{П} \sin \alpha_{П}), \quad \Pi_{Г} = G_{Г} z_{Г}, \quad (21)$$

където G_C , G_X , G_{OT} , $G_{П}$ – са съответно теглата на стрелата, хобота, обтяжката и противотежестта; $l_{ЦС}$, $l_{Ц.X}$, $l_{Ц.OT}$ – дължините, определящи положенията на центъра на масите на стрелата, хобота и обтяжката, показани на фиг. 1.

След диференцирането на изразите за кинетичната и потенциалната енергии, според избраните степени на свобода, използвайки уравненията на Лагранж от втори род, е съставена система от диференциални уравнения, описващи движението на СИОС на крана с товар

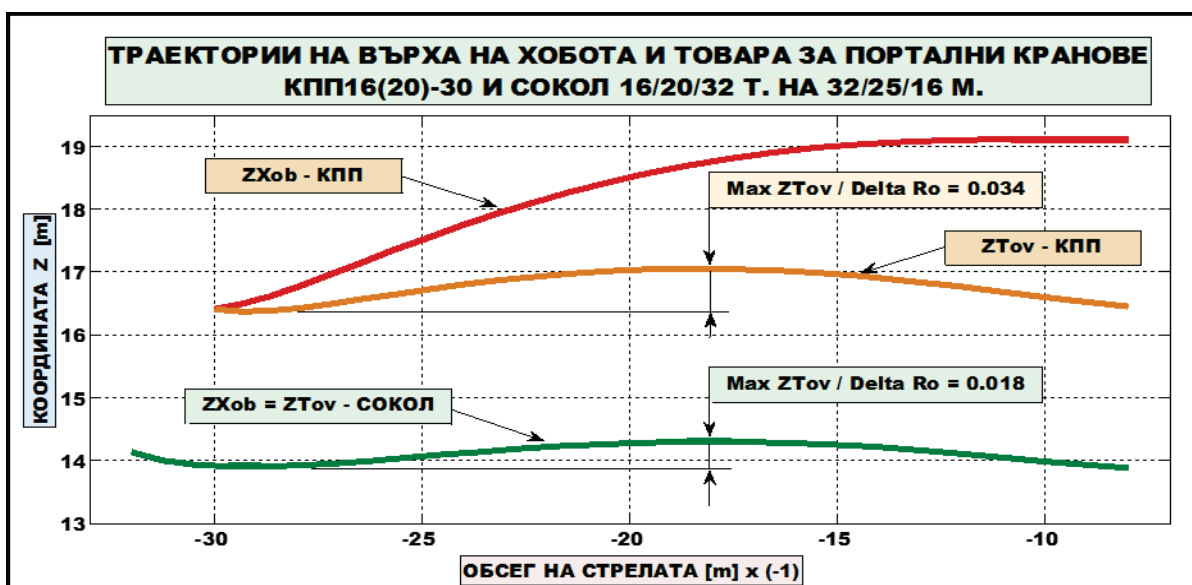
$$\begin{aligned} & (J_{СИБ} + m_{Г} u_{Г}^2 - m_{Г} u_{Г} u_{\rho} y_{Г} / H) \ddot{\varphi}_C = M_{ИБ} + M_{Г} + M_{Н} + M_{СТ} + M_{В} + \\ & + y_{Г} \frac{G u_{\rho}}{H} \left(1 + \frac{\dot{\varphi}_C^2}{g} \frac{\partial u_{Г}}{\partial \varphi_C} \right) - 0,5 \dot{\varphi}_C^2 \frac{\partial}{\partial \varphi_C} (J_{СИБ} + m_{Г} u_{Г}^2), \\ & (J_{СИБ} + m_{Г} u_{Г}^2) \ddot{y}_{Г} = -u_{\rho} \left[M_{ИБ} + M_{Г} + M_{Н} + M_{СТ} + M_{В} - 0,5 \dot{\varphi}_C^2 \frac{\partial}{\partial \varphi_C} (J_{СИБ} + m_{Г} u_{Г}^2) \right] + \\ & + \left(\frac{P_{В}}{m_{Г}} - \dot{\varphi}_C^2 \frac{\partial u_{\rho}}{\partial \varphi_C} \right) (J_{СИБ} + m_{Г} u_{Г}^2) - y_{Г} \frac{g}{H} [J_{СИБ} + m_{Г} (u_{Г}^2 + u_{\rho}^2)] \cdot \left(1 + \frac{\dot{\varphi}_C^2}{g} \frac{\partial u_{Г}}{\partial \varphi_C} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Получената система от уравнения е универсална, не се изменя при различните изпълнения на СС, УУ и МИОС. Така например схемата на УУ се характеризира само със стойностите на $M_{ПР}$ и $u_{П}$. Това обстоятелство позволява да се използва една и съща система от уравнения за сравняването на елементите на СИОС, изпълнени по различни конструктивни схеми. Системата уравнения позволява ефективно да се изследват различните режими на работа на СИОС.

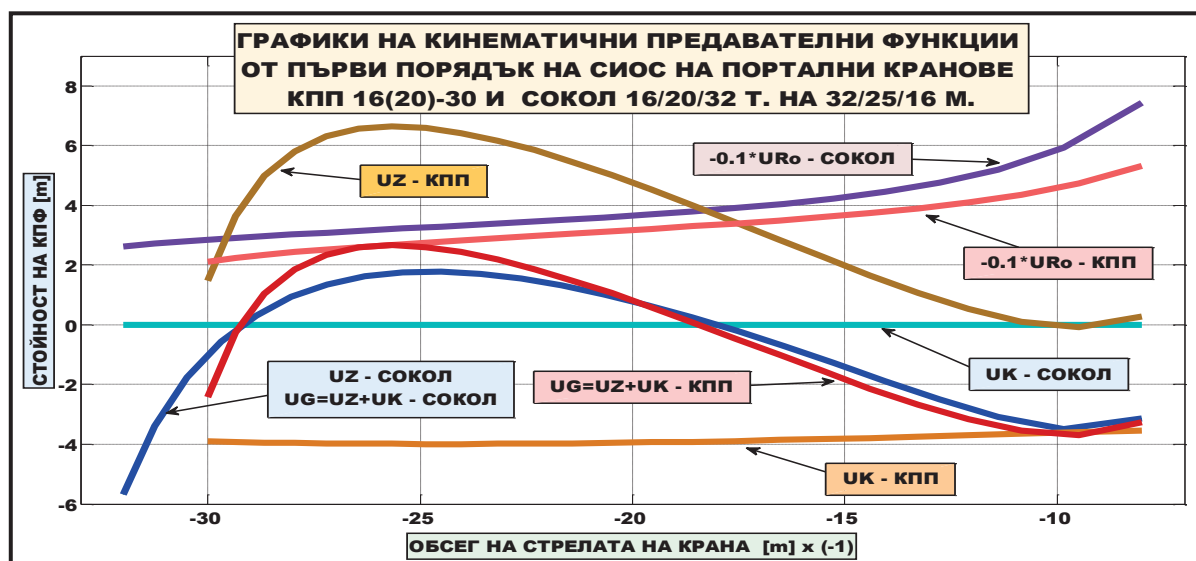
III. РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО

На основата на така представената методика [1], в среда на MATLAB, е разработена програма. С нейна помощ е направено сравнително изследване на СИОС на два модела портални кранове КПП 16(20)-30 и СОКОЛ 16/20/32 t на 32/25/16 m. Те са от един клас, най-често се срещат в българските пристанища и са представители на двата основни типа конструктивни схеми, при които СИОС е: 1) Монтирана върху опорна пространствена рама; 2) Монтирана върху колона. В процеса на изследването са построени графиките на КПФ и други параметри, които имат отношение към работата на крана.

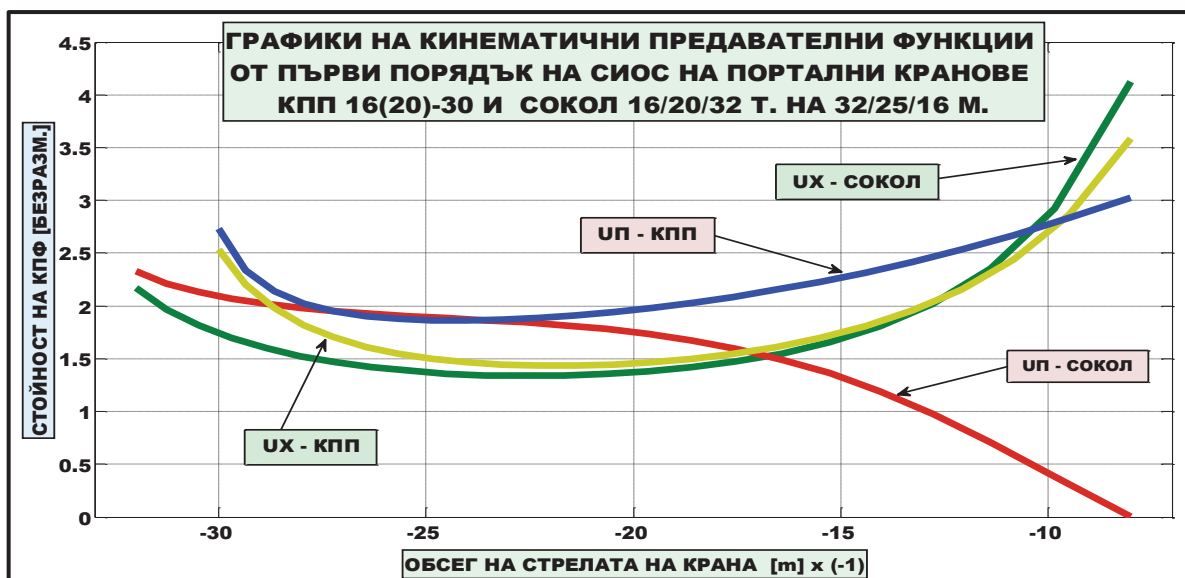
На фиг. 3 е показана една от разликите между двата разглеждани типа СИОС. Кран КПП има нееквидистантни траектории на върха на хобота и на товара по обсега. Това създава условия за възможно по-добра организация на въртящата част, в търсене и на други оптимални конструктивно-технологични решения. За кран СОКОЛ от програмата са начертани също две траектории но са една върху друга и се вижда само едната. Това е пример за еквидистантни траектории. Разликата между двата типа траектории е добре илюстрирана и на фиг. 4, където нулевите стойности на КПФ – UK, която характеризира вертикалното движение на подемните въжета, довежда до съвпадането на графиките на КПФ – UZ и UG за кран СОКОЛ. КПФ – UZ, UK и UG за кран КПП, с нееквидистантни траектории, имат своите различни значения. Това се определя от различната схема на преминаване на подемните въжета през СИОС. Максималното отклонение на траекторията на товара от хоризонталната линия е по-малко при кран СОКОЛ, което е по-добрият показател. Графиките на фиг.3 илюстрират и по-голямата височина на повдигане на товара за кран КПП, която има решаваща положителна роля при изпълнение на монтажни работи с крана, а също дава възможност да се организира склад с по-голям обем.



Фиг.3. Траектории на товара по обсега на стрелата



Фиг. 4. Графики на кинематични предавателни функции от първи порядък

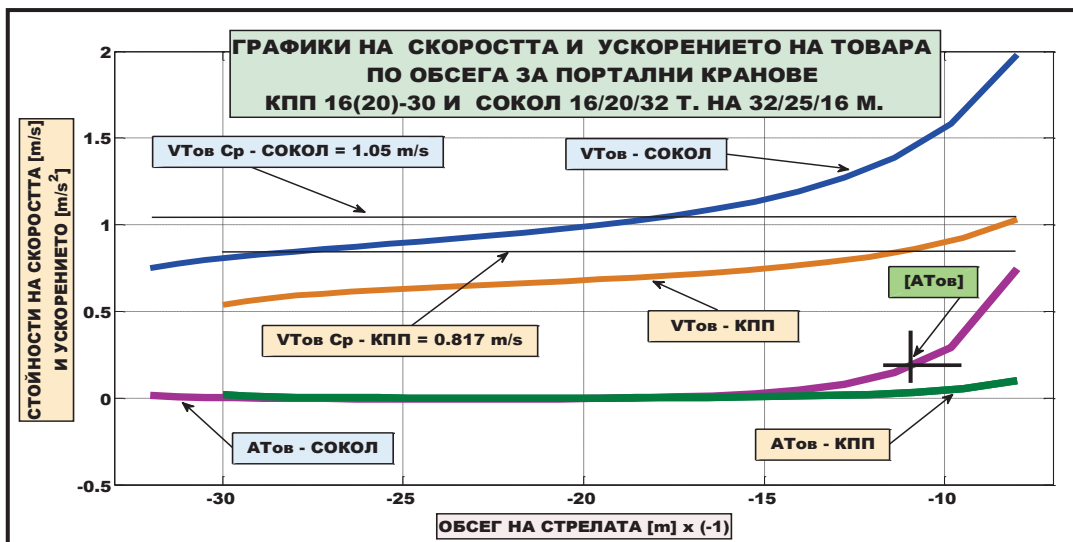


Фиг. 5. Графики на кинематични предавателни функции от първи порядък

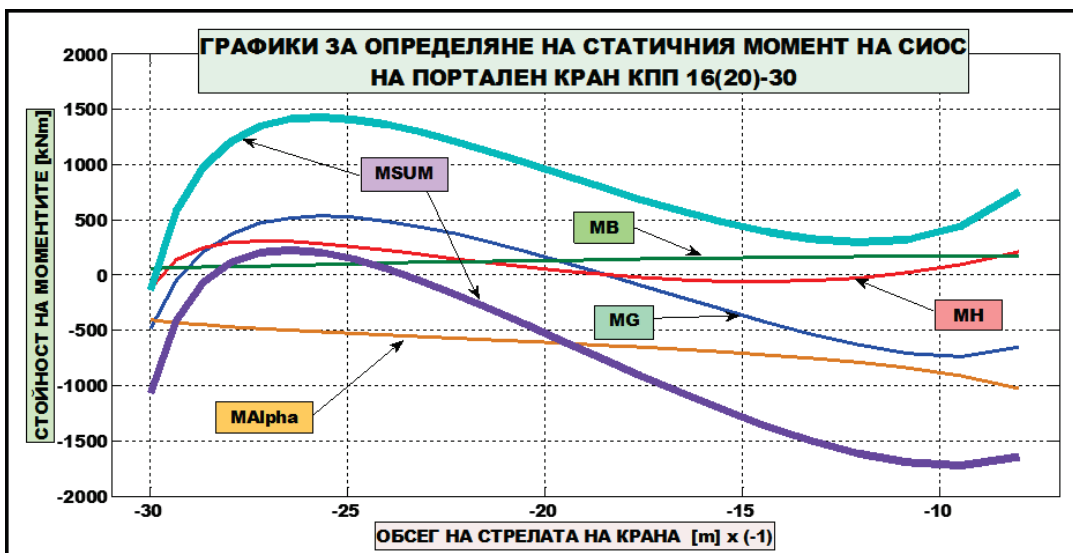
Графиките на КПФ – УП на фиг. 5 за двата крана показват разликата между УУ с долно и горно люлеене, съответно за СИОС - монтирани върху опорна пространствена рама и монтирани на колона. Поради това, че при втория случай - кран СОКОЛ надлъжните оси на стрелата - 4 и щангата - 7, която я свързва с кобилицата - 9 на подвижната противотежест (фиг. 1), на малък обсег застават почти на една права линия, влиянието на противотежестта, дори и с голямо рамо, е сведено практически до нула. Така е изпълнено едно от основните изисквания при конструиране на СИОС. Но тогава двигателят не среща съпротивлението от противотежестта и са създадени условия за увеличение на ускорението на товара $A_{Тов}$, което е показано на графиката от фиг. 6. От графиките на КПФ – УХ на фиг. 5 се вижда, че ъгловата скорост на хоботите $\dot{\varphi}_X$ на двата крана е практически еднаква.

Едно от основните експлоатационни предимства на шарнирно-счленените стрелови системи е, че при изменение на обсега, скоростта на товара $V_{Тов}$ се изменя в значително по-малки граници в сравнение с другите стрелови системи, например правите стрели. В заданието за проектиране и паспорта на крана се регламентира средната скорост на товара $V_{ТовСр}$, възможно е да бъде зададена и като време за изменение на обсега. С помощта на КПФ от първи порядък – URo , показани на фиг. 4 са построени на фиг. 6 графичните зависимости на скоростта на товара за двата крана. Показана е и средната скорост. С помощта на изразите на КПФ от втори порядък от [5], също на фиг. 6 са построени измененията на ускоренията на товара. Вижда се, че при нарастване на скоростта на малък обсег за кран СОКОЛ, силно нараства и ускорението на товара, свързано с кинематичната схема на СС. Това неблагоприятно обстоятелство е преодоляно, като в механизма за изменение на обсега на стрелата на този кран освен задвижващия има монтиран и спирачен двигател, който работи при преходните процеси на пускане и спиране и при достигане на крайните положения на системата. За правилната работа на двата двигателя се грижи монтиран в електрооборудването на механизма електронен блок за контрол на динамичното спиране. Независимо, че конструкцията на СИОС на кран КПП е създавана значително по-рано, тя притежава много добри експлоатационни показатели, благодарение на постигнатите добри, ниски стойности на ускоренията в целия диапазон на изменение на обсега, което осигурява плавна и спокойна работа, без залюлявания, а при пускане и спиране не възникват големи динамични сили, показано на фиг. 6.

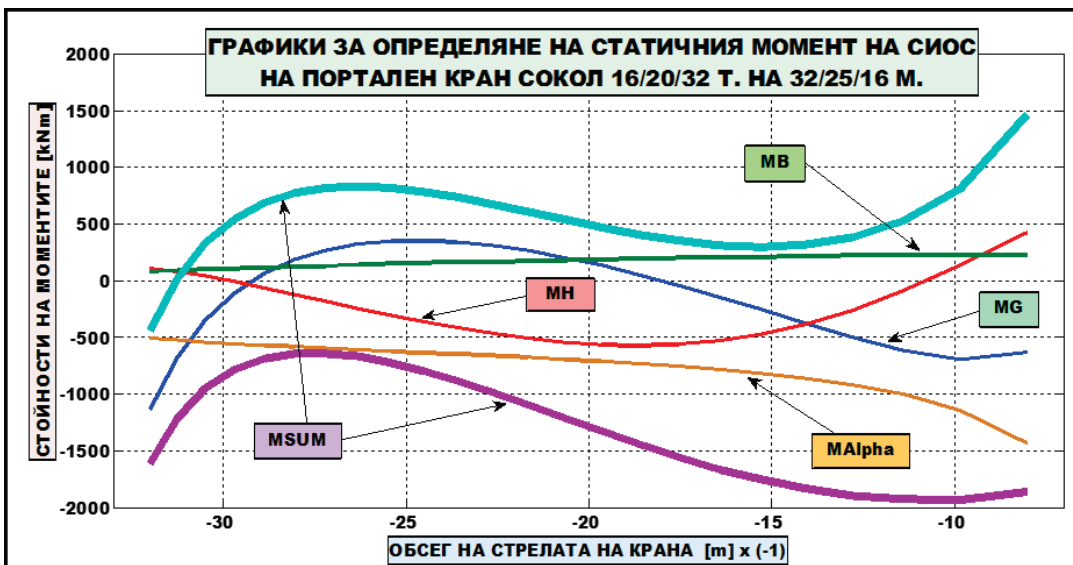
На фиг. 7 и фиг. 8 са представени моментите от съпротивителните сили, които действат на СИОС и се преодоляват от въртящия момент на двигателя. Те са изчислени съгласно методиката и според Блок-схемата на фиг. 2, като момента от инерционните сили не е отчетен. Показаният на фиг. 7 – МН, стрелови неуравновесен момент за кран КПП е точно



Фиг. 6. Изменение на скоростта и ускорението на товара



Фиг. 7. Моменти действащи в СИОС на кран КПП за определяне на статичния момент съгласно Блок - схемата на фиг. 2



Фиг. 8. Моменти действащи в СИОС на кран СОКОЛ за определяне на статичния момент съгласно Блок - схемата на фиг. 2

потвърден при използването му в практиката при различни дейности. Начертаната графика показва, че СИОС има две положения на устойчиво равновесие и едно на неустойчиво, по средата. Аналогично от фиг. 8 за МН се вижда, че кран СОКОЛ има едно устойчиво равновесно положение и едно неустойчиво близо до максималния обсег. В конструкцията на МИОС на този кран, е предвиден диференциален краен прекъсвач, който превключва режимите на работа на двата двигателя на механизма, като осигурява понижена скорост на товара два метра преди максимален обсег и три метра преди достигане на минимален обсег, показано на фиг. 6. По този начин е избегнато влизането в зоната с неустойчивото равновесие на СИОС и в зоната на големите ускорения на товара с номиналната скорост на механизма.

От показаните зависимости се вижда, че стойностите на моментите от нормативните значения на отклонението на подемните въжета от вертикалната ос M_{Alpha} и ветровото натоварване M_B и за двата крана са съществени, поради това е задължително спазването на правилници и наредби, в частта си където забраняват работа с кран при силен вятър и с разлюлян товар. От графиките на фиг. 7 и фиг. 8 се вижда, че поради по-голямата наветрена площ на хобота на кран СОКОЛ, момента от ветровото натоварване върху неговата СС е по-голям. Стойностите на така изчислените моменти служат за определяне на средноквадратичното усилие в задвижващото звено - рейката 8, (фиг. 1) и избор на двигател и спирачка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощта на разработения програмен продукт, в съответствие с методиката [1, 5] е възможно точното изчисление на СИОС по аналитичен начин. Използването на уравненията на Лагранж от втори род позволява да се намали броя на съставените диференциални уравнения на движението до желани, в съответствие със степените на свобода за механизъм с корави звена или степените на подвижност за механизъм с еластични звена.

От направеното изследване се вижда, че конструктивно – технологичните различия на разглежданите СИОС на портални кранове оказват влияние върху важни експлоатационни характеристики. Независимо от разликата в годините на появяване - около 25, и двата модела портални кранове имат много добри експлоатационни показатели. Това показва, че независимо от методите на проектиране, в миналото също са постигнати много добри параметри от работата на машините. От проведеното изследване можем да направим следните изводи:

1. При конструктивното изпълнение на СИОС на колона е постигнато по-малко отклонение на траекторията на товара от хоризонтала, и по-висока скорост на товара по обсега свързано с особеностите на кинематичната схема на СС.

2. От изследваните зависимости на КПФ – УП от първи порядък се установи, че при СИОС монтирана на колона, със значително по-лека противотежест на УУ с горно люлеене, ъгловата скорост на кобилицата значително намалява на малък обсег. При това намалява и влиянието на МП в сумата на СНМ (фиг. 2). Независимо от дългото рамо на кобилицата, е спазен задния габарит на въртящата част на крана. Това е от съществено значение при претоварващите портални кранове. Друга положителна страна на тази по-съвременната конструкция е, че елементите и механизмите на крана, които са подложени на въздействието на противотежестта са по-малко натоварени, следователно имат по-малка маса от което следва, че двигателите в МИОС и в механизма за въртене на крана работят с по-малък разход на енергия.

3. От получените графични зависимости на скоростите и ускоренията на товара следва, че при експлоатация на два и повече крана, при обработката на тежки и специфични товари е необходимо да се предвиждат и отчитат особеностите на конструктивните схеми на крановете по отношение на динамичните характеристики на товара по обсега на стрелата, ситуация, потвърдена в практиката.

4. Разработеният програмен продукт в среда на MATLAB ще послужи при следващи изследвания свързани с оптимизиране на определени параметри и експлоатационни характеристики на портални кранове.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Бортыяков Д.Е. Орлов А.Н. Специальные грузоподъемные машины. Портальные, судовые и плавучие краны. СПб.: Изд-во Политехн. университета, 2009. –160 с.

[2] Горский Б.Е. Шарнирно-сочлененные укосины кранов. М., Машиностроение, 1965, 184 с.

[3] Ерофеев Н.И. Портальные краны. М., Морской транспорт, 1962, 564с.

[4] Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1; Т. 2. Под общ. ред. М. М. Гохберга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 536 с; - 563 с.: ил.

[5] www.bortyakov.ratte.ru