

Laivo supimosi vizualizavimo uždavinys

Andrius Antanas BIELSKIS, Vasilij DJAČKOV, Olegas RAMAŠAUSKAS,
Erikas SESELSKIS (KU)

el. paštas: olegas@ik.ku.lt, vasilijd@balticum-tv.lt

Išvadas

Vienas šio darbo tikslų yra laivo vertikalios ir kilinio supimosi charakteristikų tyrimas, jų algoritmizavimas, siekiant numatyti laivo elgesį ekstremalioje situacijoje. Sudarę laivo vertikalios bei kilinio supimosi matematinių modelių, nustatome laivo padėties bangos atžvilgiu ir apskaičiuojame svarbius išilginio laivo supimosi dinamiškumo koeficientus. Kadangi tai sudėtingi skaičiavimai [1], todėl šiame darbe parodyta, kaip vaizdžiai automatizuoti skaičiavimus, taikant sukurtuosius algoritmus ir kompiuterines programas. Antra vertus, laivų projektavimo įmonės šiuo metu naudoja įvairias automatizuotojo projektavimo sistemas (APS). Užsibrėžtam tikslui pasiekti parinkome tinkamiausią atviros architektūros APS, turinčią aukšto lygio vidinę programavimo kalbą, leidžiančią įdiegti sukurtuosius originalius programinius modulius, pakankamai aiškiai vizualizuoti darbo rezultatus [2, 3].

Metodologija

Laivo išilginio supimosi atvejų tyrimo modelis yra esminių realios sistemos savybių išraiška, kuri tam tikru būdu atspindi (mėgdžioja) sistemos funkcionavimą (elgseną) ir padeda ją tirti. Tai nebūtinai tikslus ir išsamus sistemos aprašymas, jis tik imituoja jos kūrėją dominančią sistemos elgseną [4].

Tirdami laivo supimosi ekstremaliose sąlygose charakteristikas ir pavojingas padėtis, sudarysime ir analizuosime vertikalios ir kilinio supimosi reguliariose bangose matematinių modelių. Žinome sistemą, kuri išreiškia laivo vertikalios ir kilinius svyravimus reguliariose bangose [1]:

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{\zeta} + b_{11}\dot{\zeta} + c_{11}\zeta + a_{12}\ddot{\psi} + b_{12}\dot{\psi} + c_{12}\psi = F_1 \cos \omega_k t + F_2 \sin \omega_k t; \\ a_{22}\ddot{\psi} + b_{22}\dot{\psi} + c_{22}\psi + a_{21}\ddot{\zeta} + b_{21}\dot{\zeta} + c_{21}\zeta = M_1 \cos \omega_k t + M_2 \sin \omega_k t; \end{cases} \quad (1)$$

čia v – laivo greitis (m/s), $\omega_k = \omega - k \cdot v \cdot \cos \beta_v$ – menamasis kampinis greitis (1/s), ω – ciklinis bangos dažnis (1/s), β_v – kampas tarp laivo judėjimo ir bangų sklaidimo krypties (laipsniai), a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , ($i, j = 1, 2$) – prijungtųjų masių bei dempferavimo koeficientai, jėgos F_1 , F_2 (N) ir momentai M_1 , M_2 (Nm), ζ – laivo svorio centro aplikatė (m); ψ – laivo posvyrio kampas (rad).

Reikia rasti analitiškai neišsprendžiamos diferencialinių lygčių sistemos (1) sprendinius, nustatyti vertikalios ir kilinio supimosi reguliariose bangose dinamiškumo

charakteristikas (svarbiausios: amplitudinė – dažninė, fazinė – dažninė). Vertikalūs ir kiliniai svyravimai susideda iš savųjų ir priverstinių. Reguliariose bangose dėl stipraus dempferuojančių jėgų poveikio savieji svyravimai greitai gęsta ir lieka tik priverstiniai, kurių formą nusako dešinės lygčių sistemos (1) pusės – harmoninės laiko funkcijos [5]. Todėl pakaktų sistemos banginio sprendinio

$$\begin{cases} \zeta = \zeta_1 \cos \omega_k t + \zeta_2 \sin \omega_k t, \\ \psi = \psi_1 \cos \omega_k t + \psi_2 \sin \omega_k t. \end{cases} \quad (2)$$

Istatę (2) į (1) ir kairėje jos pusėje sutraukę koeficientus prie $\cos \omega_k t$ ir $\sin \omega_k t$, gauname keturių lygčių sistemą su nežinomaisiais $\zeta_1, \zeta_2, \psi_1, \psi_2$. Sprendžiame, parinkę laivo charakteristikas F_1, F_2, M_1, M_2 , bei suradę a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} ($i, j = 1, 2$). Išreiškiame

$$\begin{aligned} a_{11} &= D/g + \Delta M, & a_{12} &= \Delta M x_1, & b_{11} &= v_\zeta, & b_{12} &= v_\zeta \psi - v \Delta M, \\ c_{11} &= 2\gamma S_k, & c_{12} &= 2\gamma S_k l - v v_\zeta, \\ a_{21} &= \Delta M x_1, & a_{22} &= I_y + \Delta I_y, & b_{21} &= v_\zeta \psi + v \Delta M, & b_{22} &= v_\psi + (v^2/\omega^2) v_\zeta, \\ c_{21} &= 2\gamma S_k l + v v_\zeta, & c_{22} &= D H - v^2 \Delta M, \end{aligned}$$

čia D – laivo svorinė vandentalpa (N), g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2), H – laivo didelis (išilginis) metacentrinis aukštis (m), γ – vandens specifinis tankis (N/m^3), S_k – konstruktyvinės vaterlinijos plotas (m^2), x_g – laivo svorio centro abscisė (m), x_c – vaterlinijos ploto centro abscisė (m), $l = x_g - x_c$ – atstumas tarp vaterlinijos ploto centro ir laivo svorio centro (m), I_y – laivo masės inercijos momentas (kgm^2).

Iš plokščiųjų laivo skerspjūvių teorijos [5, 6] kiti elementai surandami taip: $\Delta M = 2 \int_{L_f}^{-L_a} \mu_0(x) dx$ – prijungtosios vertikalaus supimosi masės (kg), $\Delta M x_1 = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x \mu_0(x) dx$ – prijungtųjų masių statinis momentas aplink skersinę svorio centro ašį (kgm), $\Delta I_y = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x^2 \mu_0(x) dx$ – vandens masės inercijos prijungtasis momentas (kgm^2), $v_\zeta = 2 \int_{L_f}^{-L_a} v_0(x) dx$ – vertikalaus supimosi pasipriešinimo koeficientas (kg/s), $v_{\zeta\psi} = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x v_0(x) dx$ – vertikalaus ir kilinio supimosi tarpusavio sąveikos pasipriešinimo koeficientas (kgm/s), $v_\psi = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x^2 v_0(x) dx$ – kilinio supimosi pasipriešinimo koeficientas (kgm^2/s). Sužadinančios jėgos ir momentai

$$\begin{aligned} F_1 &= r_0(\gamma a_0 - \omega^2 a_0'' - \omega b_0'), & F_2 &= -r_0(\gamma b_0 - \omega^2 b_0'' - \omega a_0'), \\ M_1 &= r_0(\gamma a_1 - \omega^2 a_1'' - \omega b_1'), & M_2 &= -r_0(\gamma b_1 - \omega^2 b_1'' - \omega a_1'), \end{aligned} \quad (3)$$

čia r_0 – bangos amplitudė (m).

Pagrindinių sužadinančių jėgų dedamosios:

$$a_0 = 2 \int_{L_f}^{-L_a} y_1 \cos kx dx, \quad (\text{m}^2), \quad a_1 = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x y_1 \cos kx dx, \quad (\text{m}^3),$$

$$b_0 = 2 \int_{L_f}^{-L_a} y_1 \sin kx \, dx, \quad (m^2), \quad b_1 = 2 \int_{L_f}^{-L_a} x y_1 \sin kx \, dx, \quad (m^3), \quad (4)$$

čia $y_1 = y_0 - (k/2)S_f$, y_0 – laivo pusplotis, konstruktyvinės vaterlinijos lygyje (m), $k = 2\pi/\lambda$ – bangos skaičius (kiek bangų telpa į 2π metrų) (1/m), λ – bangos ilgis (m), x – atstumas tarp skaičiuojamojo laivo skerspjūvio ir jo svorio centro (m), S_f – panardintas španhauto plotas (m^2).

Sužadinančių jėgų difrakcinės pasipriešinimo dedamosios:

$$\begin{aligned} a'_0 &= \int_{L_f}^{-L_a} v_0(x) \cos kx \, dx, \quad (kg/s), \quad a'_1 = \int_{L_f}^{-L_a} x v_0(x) \cos kx \, dx, \quad (kg \cdot m/s), \\ b'_0 &= \int_{L_f}^{-L_a} v_0(x) \sin kx \, dx, \quad (kg/s), \quad b'_1 = \int_{L_f}^{-L_a} x v_0(x) \sin kx \, dx, \quad (kg \cdot m/s), \end{aligned} \quad (5)$$

čia $v_0(x)$ – izoliuoto kontūro, turinčio teorinio španhauto formą, vertikalių svyravimų pasipriešinimo koeficientas. Koeficientas randamas iš Salkajevo grafikų [5], priklauso nuo β , $b/2d$ ir $\pi b/\lambda$ (β – španhauto pilnumo koeficientas, b – španhauto plotis konstrukcinės vaterlinijos lygyje, d – laivo grimzlė nuo konstrukcinės vaterlinijos).

Sužadinančių jėgų difrakcinės inercinės dedamosios:

$$\begin{aligned} a''_0 &= \int_{L_f}^{-L_a} \mu_0(x) \cos kx \, dx \quad (kg), \quad a''_1 = \int_{L_f}^{-L_a} x \mu_0(x) \cos kx \, dx \quad (kgm), \\ b''_0 &= \int_{L_f}^{-L_a} \mu_0(x) \sin kx \, dx \quad (kg), \quad b''_1 = \int_{L_f}^{-L_a} x \mu_0(x) \sin kx \, dx \quad (kgm), \end{aligned} \quad (6)$$

čia $\mu_0(x)$ – teorinio španhauto formą turinčio izoliuoto kontūro vertikalių svyravimų prijungtosios masės koeficientas. Koeficientas randamas iš Salkajevo grafikų [5].

Analogiškai, laivo išilginio supimosi lygtys (laivo greitis v):

$$\begin{cases} \left(\frac{D}{g} + \Delta M \right) \ddot{\xi} + v_{\xi} \dot{\xi} + \gamma S_k \xi + \Delta M x_1 \ddot{\psi} + (v_{\xi} \psi - v \Delta M) \dot{\psi} + (2\gamma S_k l - v v_{\xi}) \psi \\ \quad = r_0(\gamma a_0 - \omega^2 a''_0 - \omega b'_0) \cos \omega_k t - r_0(\gamma b_0 - \omega^2 b''_0 - \omega a'_0) \sin \omega_k t, \\ (I_y + \Delta I_y) \ddot{\psi} + (v_{\psi} + \frac{v^2}{\omega^2} v_{\xi}) \dot{\psi} + (DH - v^2 \Delta M) \psi \\ \quad + \Delta M x_1 \ddot{\xi} + (v_{\xi} \psi + v \Delta M) \dot{\xi} + (\gamma S_k l + v v_{\xi}) \xi \\ \quad = r_0(\gamma a_1 - \omega^2 a''_1 - \omega b'_1) \cos \omega_k t - r_0(\gamma b_1 - \omega^2 b''_1 - \omega a'_1) \sin \omega_k t. \end{cases} \quad (7)$$

Suradę ξ_1 , ξ_1 , ψ_1 , ψ_2 , bangines lygtis galime išreikšti vienanariais funkcionalais

$$\xi = \xi_m \cos(\omega_k t - \varepsilon_{\xi}), \quad \psi = \psi_m \cos(\omega_k t - \varepsilon_{\psi}),$$

$$\text{čia } \varepsilon_{\xi} = \arctan \frac{\xi_1}{\xi_2}, \quad \varepsilon_{\psi} = \arctan \frac{\psi_1}{\psi_2}. \quad (8)$$

Taip pat išreikšime vertikalą ir kilnio svyravimų amplitudes

$$\zeta_m = \sqrt{\zeta_1^2 + \zeta_2^2}, \quad (9)$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_1^2 + \psi_2^2}. \quad (10)$$

Dalydami (9) iš bangos amplitudės r_0 ir (10) iš bangos nuolydžio α_0 , gauname vertikalą ir kilnio laivo (plaukiančio prieš bangas) supimosi dinamikos koeficientus. Kartojant iteracijas, galima sudaryti amplitudines – dažnines ir fazines – dažnines laivo supimosi charakteristikas, palyginant ordinates – laivo denio užliejimo schemą. Turint šias charakteristikas, galima įvertinti laivo išilginį supimąsi nereguliuose bangose. Spektrinių bangų ordinačių tankį galima apskaičiuoti [1]:

$$S_\zeta(h, \omega) = \frac{0,2596}{\omega_m(h)} h^2 \left(\frac{\omega_m(h)}{\omega} \right)^6 \cdot \exp \left[-1,5 \left(\frac{\omega_m(h)}{\omega} \right)^4 \right] + \frac{0,00565}{\omega_m(h)} h^2 \left(\frac{\omega_m(h)}{\omega} \right)^8 \cdot \exp \left[-0,48 \left(\frac{\omega_m(h)}{\omega} \right)^4 \right], \quad (11)$$

čia $\omega_m(h) = 1,42 \cdot h^{-0,45}$ – dažnis, atitinkantis spektro maksimumo (rad m/s).

Dabar galime apskaičiuoti dispersijas, kampų ψ ir ordinačių ζ_g vidutines ir 3% tikimybės amplitudes

$$D_\zeta = \int_0^\infty \left(\frac{\zeta_m}{r_0} \right)^2 \cdot S_\zeta(h, \omega) \cdot d\omega, \quad D_\psi = \int_0^\infty \left(\frac{\psi_m}{\alpha_0} \right)^2 \frac{\omega^4}{g^2} \cdot S_\zeta(h, \omega) \cdot d\omega; \quad (12)$$

$$\bar{\zeta}_m = 1,25 \sqrt{D_\zeta}, \quad \zeta_{m3\%} = 2,64 \sqrt{D_\zeta}, \quad \bar{\psi}_m = 1,25 \sqrt{D_\psi}, \quad \psi_{m3\%} = 2,64 \sqrt{D_\psi}. \quad (13)$$

Išsprendę sistemos dinamikos uždavinį ir sudarę skaitinį modelį, projektuojame vizualizavimo algoritmus [8] ir kuriame juos realizuojančią programą APS terpėje.

Rezultatai

Skaičiuojant konkretaus laivo supimosi dinamikos koeficientus, pirmiausia reikia parinkti jo konstrukcinius parametrus (laivo ilgį, svorinę vandentalpą, prijungtosios masės koeficientus, dämpferavimo koeficientus, vaterlinijos plotą, vaterlinijos centro abscisę, inercijos momentą, metacentrinę aukštį ir t.t.). Vadinasi, reikia, kad kuriamoji programa gebėtų iš laivo teorinio brėžinio visus šiuos parametrus surinkti arba apskaičiuoti. Sužinojus reikalingus duomenis bei pasirinkus laivo greitį, plaukimo kryptį bei bangos ilgį, galima panaudoti aprašytąjį modelį ir rasti laivo padėtį bei pakrypimą bet kuriuo laiko momentu, atlikti laivo supimosi vizualizavimą.

Objekto pasukimą aprašysime matrica $P' = PM(R(\alpha))$. Tačiau mūsų uždavinyje laivo svorio centras, apie kurį darysime pasukimą, gali nesutapti su koordinatinių sistemos pradžia, todėl mums reikia sudėtingesnio transformavimo, kurį galime išreikšti transformacijų grandinėle. Tarkime, kad laivo svorio centro taškas yra taške $C(C_x, C_y)$ ir mums reikia šio taško atžvilgiu reikia laivą pasukti kampą α . Tai mes galėsime atlikti trimis algoritmo žingsniais:

- laivą perkelti per $-C$, kad laivo svorio centras sutaptų su koordinatinių pradžia (perkėlimo transformacija);
- pasukti kampą α koordinatinių pradžios atžvilgiu (pasukimo transformacija);
- laivą perkelti per C , svorio centro grąžinimas (perkėlimo transformacija).

Transformacijos matricinis pavidalas artimas tradiciniam kompiuterinėje grafikoje (notifikacija $\sin \alpha$ ir $\cos \alpha$ sutrumpinta atitinkamai s ir c).

$$P' = P \cdot M(T(-C)) \cdot M(R(\alpha)) \cdot M(T(C))$$

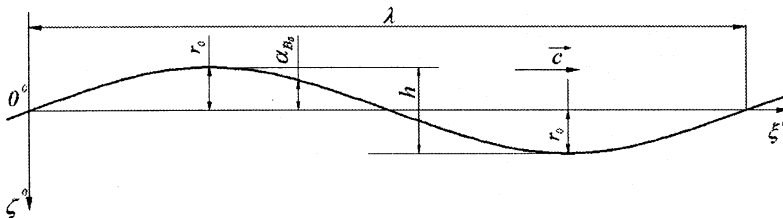
$$= P \cdot \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ -C_x s + C_y c + C_x & -C_x s - C_y c + C_y & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Aprašytosios laivo padėties koordinatės perskaičiuojamos kiekviename vizualizavimo ciklo žingsnyje. Reikia pavaizduoti ne tik laivą, bet ir judančią bangą. Norėdami nubrėžti bangą, turime žinoti ordinatės $r_w = r_0 \sin(\omega t - k\xi^0)$, čia ξ^0 – pradinė vandens dalelės padėtis, reikšmės bent penkiuose fiksuotuose abscisės taškuose $0, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$ ir tuos taškus sujungti B-splainu (1 pav.).

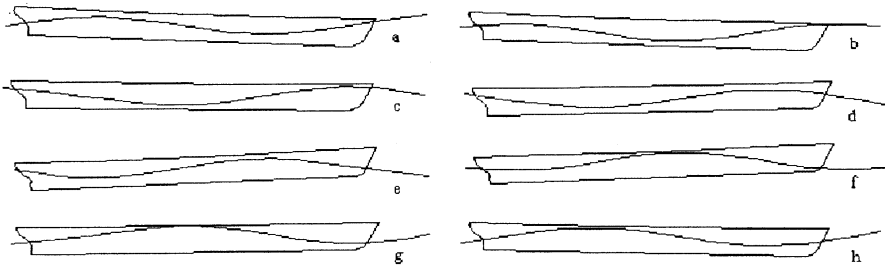
Sudėtingų kreivių vizualizavimo aspektai atskleidžiami darbuose [2, 7, 9]. Dabar galime pasinaudoti formule, kuri aprašo, kaip, laikui bėgant, fiksuotame abscisės taške keičiasi bangos aukštis (ordinatė). Susieję laivo padėties matricę skaičiavimą su bangos B-splaino geometrinių charakteristikų skaičiavimu, realizuojame nagrinėtųjų uždavinių sprendimų algoritmus kompiuterinės grafikos priemonėmis, įdiegę į APS AutoCAD Visual Lisp modulį, analogišką [3, 8], kuris iš laivo teorinio brėžinio duomenų apskaičiuotų ir vizualizuotų laivo supimąsi.

Sudarę bangavimo poveikio skaitmeninį modelį ir algoritmus, rašome programą, kuri apskaičiuotų laivo vertikalią padėtį, posvyrio kampą bei vizualizuotų laivo vertikalųjį ir kilinį supimąsi reguliariose bangose. Duomenis (bangų ir laivo charakteristikas) perduodame programai kaip parametrus. Gaunamas rezultatas kompiuterio ekrane – APS grafiniame darbo lange nupiešiama bėgančioji banga ir besisupantis laivas. Vaizdo fragmentai matyti 2 pav.

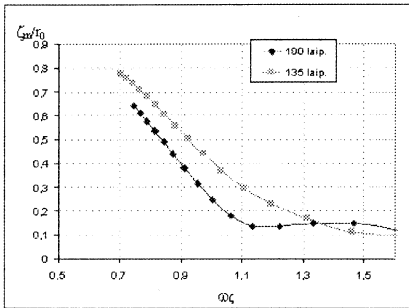
Šiuo atveju matome vaizdą, kai laisvai pasirinktasis bangos ilgis yra lygus laivo ilgiui su skaitine verte 110 m, o laivo momentinis judėjimo greitis lygus 5,14 m/s. Jeigu skaičiavimai rodo užliejimo galimybę, tai vaizdžiai galima stebėti ekrane, gauti perspėjančius pranešimus. Programos darbo metu apskaičiuotieji rezultatai



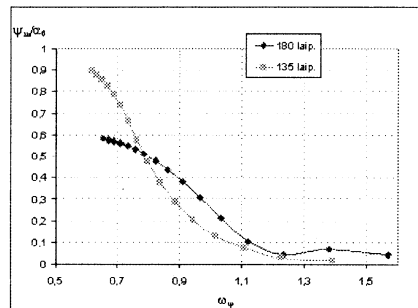
1 pav. Bangos profilio parametrai.



2 pav. Laivo padėtis, programos sugeneruota skirtingais laiko momentais.



3 pav. Amplitudinė – dažninė laivo vertikalios supimosi charakteristika esant reguliariam bangavimui.



4 pav. Fazinė – dažninė laivo kilinio supimosi charakteristika esant reguliariam bangavimui.

išsaugomi sąrašinėse struktūrose. Koordinatų sąrašuose išsaugoti duomenys leidžia automatiškai sudaryti laivo vertikalios ir kilinio supimosi charakteringasias kreives, kurias atvaizduoja laivo elgesį, jam plaukiant skirtingais kampais bangų atžvilgiu (3–4 pav.).

Dalis laivo supimosi vizualizavimo uždavinio buvo atlikta, panaudojus aprašytųjų laivo padėties skaičiavimų duomenis, pritaikius programos Matlab R13 scenarijų (amplitudinė – dažninė ir fazinė – dažninė charakteristikos).

Išvados

Pavyko sukurti ir realizuoti vertikalios ir kilinio supimosi reguliariose bangose matematinio modelio vizualizavimo algoritmą, leidžiantį kompiuteriu modeliuoti ekstremalią situaciją ir vizualiai stebėti atvejus, kada vanduo užlieja denį, kadangi vien iš skaitmeninio modelio tai užfiksuoti keblu, o natūrinio eksperimento atlikti praktiškai neįmanoma.

Nustatyta, kad programavimo kalba Visual Lisp tinka laivo supimosi modeliavimui ir vizualizavimui. Sukurtoji programa yra lengvai integruojama į automatizuotojo projektavimo terpę AutoCAD, leidžia sparčiai atlikti laivo supimosi skaičiavimus, generuoti animuotus judesius.

Priemonė naudotina tiek studijų procese inžinerinės informatikos, laivo inžinerijos specialybės studentų mokymui, tiek gamyboje laivo inžinerinio personalo mokymui, taip pat analitinių modelių kompiuterizuoto tyrimo aspektų iliustravimui.

Literatūra

1. В.В. Луговский, *Качка корабля*, Санкт-Петербург (1999).
2. J. Čerka, M. Gedvilas, O. Ramašauskas, Automatizuotas laivo korpuso formos modeliavimas, *Jūra ir aplinka*, 1(8), 13–20 (2003).
3. V. Djačkov, O. Ramašauskas, I. Zubakov, Laivų projektavimo automatizavimas, *Vadyba, VLVK mokslo tiriamieji darbai*, 1(4), 32–36 (2004).
4. V. Denisov, Models of environmental education in higher educational system of Lithuania, in: *Modelle zur Umwelterziehung in der Bundesrepublik Deutschland*, 5, Umwelterziehung in den neuen Ländern, DGI/IPN, Kiel, 183–199 (1994).
5. В.В. Семенов-Тянь-Шанский, С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодили́н, *Качка корабля*, Судостроение, Ленинград (1969).
6. J. Čerka, *Laivo teorija*, KU leid., Klaipėda (1997).
7. И. Гардан, П. Кастельжо и др. (ред.), *Математика и САПР*, пер. с фр., том 1, Мир, Москва (1988).
8. V. Djačkov, D. Norkevičius, O. Ramašauskas, Laivo NURBS konstrukcijų vizualizavimo uždavinys, *Jūra ir aplinka*, 1(10), 27–34 (2004).
9. G. Farin, *NURBS from Projective Geometry to Practical Use*, 2nd ed., Natick, MA, Arizona St. Univ. (1999).

SUMMARY

A.A. Bielskis, V. Djačkov, O. Ramašauskas, E. Seselskis. Visualization task of the ship pitching

In this article the research and algorithms for calculation of longitudinal ship motion are evaluated. The program for ship's pitching and heaving modelling based of these algorithms is presented. Applying of this makes possible to determine ship's seakeeping characteristics mostly using data of the ship's bodyplan. It is created with Visual Lisp programming language what insures good visual results and good combination with the stages of ship design. The application can be used for training of naval architecture and informatics engineering students, and also in research field helping to create analytical models.

Keywords: regular sea swell, ship pitching and heaving, visualization.