

REFERENCES

1. A.N. Klement'ev, M.YU.CHurin, Issledovanie yavleniya dinamicheskoy prosadki rechnyh sudov pri dvizhenii na techenii, Rechnoj transport (XXI vek) № 2 2017
2. V.F. Bavin i dr. Hodkost' i upravlyaemost' sudov (uchebnik, utv. Upravl. kadrov i ucheb. zavedenij MRF RSFSR, dlya stud. in-tovvodn. tr-ta, pod red. V.G. Pavlenko). – M.: Transport, 1991.– 455 s.
3. Reshetnikov M.A. Obosnovanie bezopasnyh glubin dlya krupnotonnazhnogo sudna pri ego vyhode iz kamery sudohodnogo shlyuza: Dis. kand. tekhn. nauk. – Nizhnij Novgorod, 2017. – s.
4. Raschet gidrodinamicheskikh processov vyhoda sudna iz kamery shlyuza: tekhnicheskij otchet. – Moskva, 2011. – 60 s.
5. Polunin A.M. Opredelenie bezopasnyh rezhimov dvizheniya rechnyh po melkovod'yu, Novosibirsk, Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1965 g.
6. Brown's Nautical Almanac / Brown, Son and Ferguson. Ltd. – Glasgow, G41 2SD, 2015.
7. Haak R. Schiffswinderstand und Schiffslétrubnach-Versuhen auf dem Dormund-Ems-Kanal, Berlin, 1900.
8. Suhomel G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po kanalam i melkovod'yu. – Kiev: «Naukova dumka», 1966. – 80 s.
9. Suhomel G.I., Zass V.M., YAnkovskij .I. Issledovanie dvizheniya sudov po ogranichennym farvateram – Kiev: Iz-vo AN Ukrainskoj SSR, 1956.– 163 s.
10. CHurin M.YU. Metod opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov smeshannogo reka-more plavaniya / //Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2013. – Vypusk 3. [Elektronnyj resur]. Rezhim dostupa: www.science-education.ru/111-10228.
11. Klement'ev A.N., CHurin M.YU., Zubkova E.V. Dinamicheskaya prosadka tolkaemyh sostavov i osobennosti eyo opredeleniya / // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – N. Novgorod, 2020. – №62. – 187 s.
12. Razrabotka prakticheskikh rekomendacij po vyboru bezopasnyh skorostej v usloviyah melkovod'ya na rekah Lenskogo bassejna (predvoritel'nye rekomendacii): otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote, - Novosibirsk, 1978 g. - 42 s.
13. Ukazaniya po proektirovaniyu sudohodnyh kanalov: VSN 3-70. – Leningrad, 1971 g. – 71 s.
14. Kondrat'ev, S.I. Teoreticheskie osnovy upravleniya krupnotonnazhnymi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Novorossiyskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossiysk, 2004
15. Kondrat'ev S.I. Sintez programmyh traektorij metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Tekst] / S.I. Kondrat'ev // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2003. № S6. S. 41-43.
16. Grinek A.V., Timofeev S.P., Kondrat'ev S.I., Hurtasenko A.V. Sposob kontrolya parametrov geometricheskoy tochnosti sudovyh valoprovodov// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 3-1 (49). S. 90-96.
17. Epihin A.I., Hekert E.V., Modina M.A. Principy nejroupravleniya i varianty arhitektury nejronnyh setej, primenitel'no k slozhnoj dinamicheskoy sisteme SEU-SUDNO//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 18-22.
18. Epihin A.I., Kondrat'ev S.I., Hekert E.V. Prognozirovaniye mnogomernyh nestacionarnyh vremennyh ryadov s ispol'zovaniem nejromodelirovaniya//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 4-4 (50). S. 23-27.
19. Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonimicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovyh specialistov: eksperimental'naya aprobaciya predlozhennyh modelej i procedur//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 4-3 (46). S. 104-110.
20. Pechnikov A.N., Hekert E.V., Savel'ev V.G., Aderihin I.V. Ergonimicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovyh specialistov: modeli transformacii dejstviya v processe ego osvoeniya i procedura ih prakticheskogo primeneniya//Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. № 1-2 (43). S. 104-111.

УДК 53.091; 629.5

DOI: 10.34046/aumsuomt97/23

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА МОБИЛЬНОГО СТАНКА ПРИ ОБРАБОТКЕ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

Е.Н.Сюсюка, кандидат технических наук, доцент

В статье рассматриваются математические зависимости для расчета траектории движения инструмента мобильного станка при обработке валопроводов, обеспечивающие геометрическую точность восстановления цилиндрической поверхности валопровода; обоснована возможность применения линейного электрогидравлического шагового привода (ЛЭГПП) с корректирующей программой для реализации обработки с учетом автоматических измерений и заданной погрешности.

Ключевые слова: валопровод, дефекты, токарная обработка, мобильный станок, базирование станка, погрешности, корректирующая программа.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL DEPENDENCIES FOR CALCULATING THE TRAJECTORY OF A MOBILE MACHINE TOOL FOR PROCESSING SHIP SHAFT LINES

E. N. Syusyuka

The article discusses the mathematical dependences for calculating the trajectory of the tool of a mobile machine when processing shafting, ensuring the geometric accuracy of restoring the cylindrical surface of the shafting; substantiated the possibility of using a linear electrohydraulic stepping drive (LEGSHD) with a correcting program to implement processing, taking into account automatic measurements and a given error.

Key words: shafting, defects, turning, mobile machine, machine tool base, inaccuracies, corrective program.

Гребные валы изготавливаются кованными из углеродистой стали марок – Сталь 35. Основными характерными дефектами гребных валов являются трещины на цилиндрических и конических поверхностях в районах большого основания конуса и шпоночного паза в месте посадки гребного винта. Для обнаружения границ трещин используется магнитный контроль. Глубину трещин определяют с помощью ультразвукового контроля. Устранение трещин производится путем вырубки, разделки и зачистки и проточки вала для устранения поверхностных и не глубоких дефектов, таких как риски, наработки, задир на рабочих шейках вала. При этом, овальность и конусообразность рабочих шеек не должна превышать 0,03 мм, а шероховатость

поверхности Ra 0,63. Выполнение сварочных работ при ремонте валопровода категорически запрещено.

Важнейшую роль в обеспечении геометрической точности восстановления тел вращения играет пространственное положение мобильного станка. При каждой обработке детали, например, поверхностей качения валопровода, требуется геометрическая настройка станка, состоящая в установке параллельности линии подачи вершины резца и оси обрабатываемой детали. При установке мобильного станка ось вращения валопровода является основной базой при установке мобильного станка. Деталь в системе координат Oxyz технологической системы с мобильным станком с ЧПУ может быть изображена рис. 1.

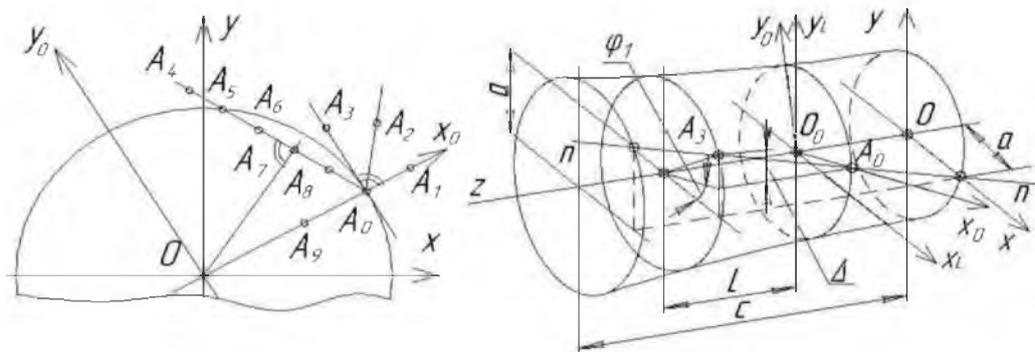


Рисунок 1 – Схема для расчета коррекции погрешности установки станка: а – возможные погрешности установки A_0A_i в системе координат $X_0Y_0Z_0 O_0$, б – обработанная поверхность длиной L как часть гиперболоида вращения

Форма поверхности катания при погрешностях установки суппорта относительно оси детали при отсчёте от точки A_0 плоскости $X_0O_0Y_0$ (начала обработки) изображена на рис. 1. На рисунке обозначено R – радиус обработки, L – длина обработки (ширина ролика), φ – угловая погрешность при линейной погрешности установки станка $\Delta = A_0A_3$ на длине обработки L для положения A_3 (рис. 1).

С использованием ЧПУ на базе ЛЭГШД может быть реализована корректирующая про-

грамма, которая позволит получить цилиндрическую поверхность (или другой заданный профиль) по результатам измерения первого прохода при установке станка с погрешностью относительно оси детали. Текущий радиус после обработки в системе координат $X_0O_0Y_0$ определится уравнением

$$R(z) = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{z\Delta}{L}\right)^2 + 2R_0z\frac{\Delta}{L}\cos\varphi}, \quad (1)$$

где $R_0 = O_0 A_0$ – радиус в начале обработки.

Текущая погрешность обработки относительно цилиндрической поверхности радиуса R_1 составит

$$\Delta(z) = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{z\Delta}{L}\right)^2} + 2R_0 z \frac{\Delta}{L} \cos \varphi - R_0 \quad (2)$$

Произведя после первого прохода замеры радиусов детали R_{10} , R_{20} , R_{30} – вначале, посередине ширины, то есть на расстоянии $Z=0,5L$, и в конце обработки соответственно, получим значения погрешностей [1],

$$\Delta = \sqrt{2(R_{10}^2 + R_{20}^2 - 2R_{30}^2)}$$

$$\varphi = \arccos \left(\frac{4R_{30}^2 - 3R_{10}^2 - R_{20}^2}{2\sqrt{2} \cdot R_{10} \sqrt{R_{10}^2 + R_{20}^2 - 2R_{30}^2}} \right), \quad (3)$$

используя которые производим расчет корректирующей программы обработки поверхности с учетом погрешности установки станка (без его корректирующей переустановки).

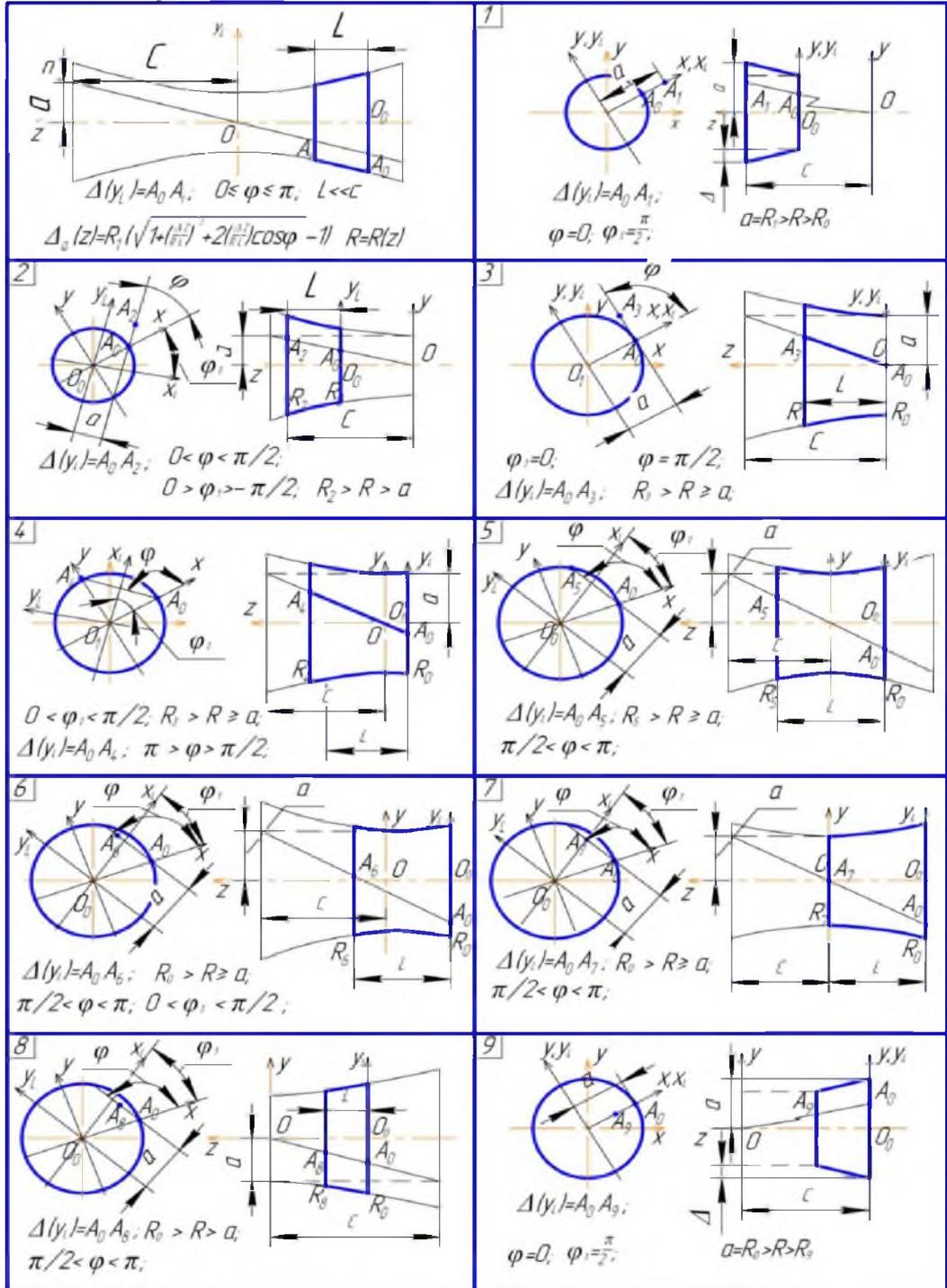


Рисунок 2 – Схемы к расчету коррекции погрешностей от установки станка при последующей обработке

Для этого используем выражение (3) в форме

$$\Delta(z) = R_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{z\Delta}{R_0 L} \right)^2 + 2 \frac{z\Delta}{R_0 L} \cos \varphi} - 1 \right] \quad (4)$$

из которого следует, что величина погрешности обработки зависит не только от погрешностей установки станка, но и от соотношения Δ/R_0 .

Для схем погрешностей установки 1 и 9, изображенных на рис 2, когда в результате погрешностей установки формируется не цилиндр, а конус ($\varphi = 0, 180$ град), коррекцию можно рассчитывать по формуле

$$\Delta(z) = \pm \Delta \frac{z}{L}$$

для схемы 3, когда $\varphi = 90$ град

$$\Delta(z) = R_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{z\Delta}{R_0 L} \right)^2} - 1 \right]$$

В остальных случаях рекомендуется использовать выражение (4). Исследованием выражения (4), можно доказать, что минимальный радиус гиперboloида будет иметь место при

$$z_{\text{м}} = -L \left(\frac{\Delta}{R_0} \right)^{-1} \cos \varphi \quad (5)$$

Для значений $\varphi \geq 0,5 \pi$, при которых выполняется соотношение

$$0 \leq \left(\frac{\Delta}{R_0} \right)^{-1} \cos \varphi \leq 1 \quad (6)$$

наименьший радиус гиперboloида будет располагаться на поверхности качения, т.е. $0 \leq z \leq L$ (схемы 3...7 рис. 2).

При расчете корректирующего перемещения может возникнуть необходимость учета направления подачи резца (рис. 3).

С учетом направления подачи вершина резца при коррекции должна переместиться в точку $A_{4к}$, а не в точку В. Определение перемещения $A_4 A_{4к}$, а подобно ему и всех перемещений, зависящих от координаты z , производим, используя свойства треугольников $\Delta OA_0 A_4$ и $\Delta OA_4 A_{4к}$.

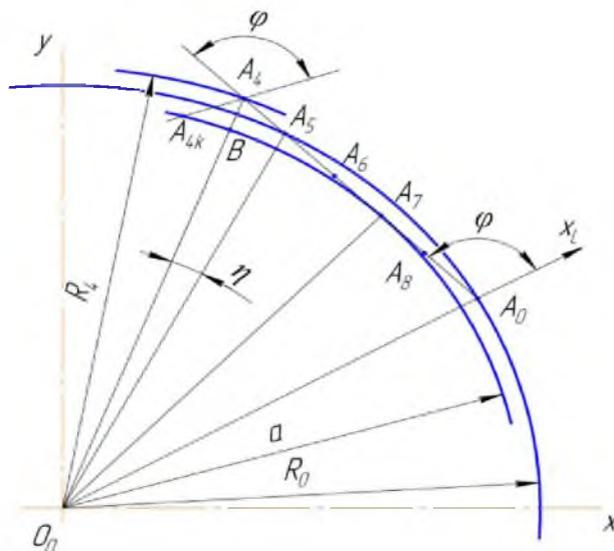


Рисунок 3.– К учету направления подачи при погрешности установки встраиваемого станка

Из теоремы синусов для $\Delta OA_0 A_4$ получаем

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{R_1}{R_2} \sin(180 - \varphi) \right] \quad (7)$$

Из теоремы синусов для $\Delta OA_2 A_{2к}$

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{R_1}{R_2} \sin(\varphi - \alpha) \right] \quad (8)$$

Корректирующее перемещение в точке A_2 определится как

$$A_2 A_{2к} = R_1 \frac{\sin \gamma}{\sin(\varphi - \alpha)} \quad (9)$$

Для коррекции по ходу перемещения (по координате z) необходимо в выражениях (9) произвести замену $A_2 A_{2к}$ на z . Если угол $\beta = \varphi - \alpha$, то при расчете $A_2 A_{2к}$ будет $z = L$, и можно направление подачи не учитывать, принимая корректирующее перемещение $\Delta_k(z) = \Delta(z)$.

Используя выражения, полученные в данном разделе, представляется возможным, используя следящий привод на базе ЧПУ (в том числе и предло-

женный с ЛЭГШП), разработать программы для повышения точности обработки валопровода по результатам замера после первого прохода без подналадки погрешности установки станка.

Разработанные устройства для автоматического измерения параметров цилиндрической формы [2, 3], а также методика определения геометрических параметров формы поверхности катания крупногабаритных цилиндрических деталей с нестационарной осью вращения, ставят задачу выбора управляющего устройства для реализации резания в режиме учета погрешности и одновременной корректировки установка режущего инструмента и регулирования сил резания. [4] Для реализации обработки необходимо использовать быстродействующий суппорт с небольшой величиной хода и управляемый автоматически.

Литература

1. Сюсюка Е.Н. Физические основы восстановительной обработки поверхностей крупногабаритных вращающихся тел. – Новороссийск: ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2018. – 147 с.
2. Хуртасенко А.В. Технология восстановительной обработки крупногабаритных деталей с использованием методов активного контроля: диссертация на соиск.ученой степени к.т.н.: 020508. – Белгород, 2007. – 170 с.
3. Гринек А.В., Тимофеев Ю.П., Кондратьев С.И., Хуртасенко А.В. Способ контроля параметров геометрической точности судовых валопроводов// Морские интеллектуальные технологии.– 2020.– № 3-1(49).– С. 90-96.
4. Сюсюка Е.Н. Анализ возможности повышения точности обработки валопроводов морских судов мобильными станками с использованием электрогидравлического шагового привода// Эксплуатация Морского транспорта.– 2019.– № 3 (92).– С.180-185.
5. Санин С.Н. Новые технологии восстановительной обработки поверхностей катания крупногабаритных деталей без их демонтажа: монография. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 86 с.
6. Бондаренко В.Н. О влиянии пространственного положения мобильного станка на назначение глубины резания на проходах. / В.Н. Бондаренко, Б.И.Почупайло, Е.Н. Сюсюка // Научно-теоретический журнал Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова.– 2010.–№2.– С. 55-57.
7. Кондратьев, С.И. Теоретические основы управления крупнотоннажными судами по критериям безопасности и энергосбережения [Текст] / С.И. Кондратьев: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.– Новороссийск: Новороссийская государственная морская академия, 2004.
8. Кондратьев С.И. Синтез программных траекторий методом динамического программирования [Текст] /С.И. Кондратьев //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки.– 2003.– № S6.– С. 41-43.
9. Печников А.Н., Хекерт Е.В. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: экспериментальная апробация предложенных моделей и процедур//Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– № 4-3 (46).– С. 104-110.

REFERENCES

1. Syusyuka E.N. Fizicheskie osnovi vosstanovitelnoi obrabotki poverhnosti krupnogabaritnih vrash'ayush'ihnya tel. – Novorossiisk: GMU im. admiral F.F. Ushakova, 2018. – 147s.
2. Hurtasenko A.V. Tehnologiya vosstanovitelnoi obrabotki krupnogabaritnih detalei s ispolzovaniem metodov aktivnogo kontrolya. Dissertaciya na soisk.uchenoj stepeni k.t.n.:020508. – Belgorod, 2007. – 170 s.
3. Grinek A.V., Timofeev YU.P., Kondratev S.I., Hurtasenko A.V. Sposob kontrolya parametrov geometricheskoj tochnosti sudovih valoprovodov. Morskie intellektualnie tehnologii, 2020, № 3-1(49), S.90-96.
4. E.N Syusyuka. Analiz vozmozhnosti povisheniya tochnosti obrabotki valoprovodov morskikh sudov mobilnimi stankami s ispolzovaniem elektrogidravlicheskogo shagovogo privoda. - Eksplyuatsiya Morskogo transporta, 2019. № 3 (92), S.180-185.
5. Sanin S.N. Novie tehnologii vosstanovitelnoi obrabotki poverhnosti kataniya krupnogabaritnih detalei bez ih demontazha: monografiya - Sanin S.N. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V.G. SHuhova, 2009. - 86s.
6. Bondarenko V.N. O vliyani prostranstvennogo polozheniya mobilnogo stanka na naznachenie glubini rezaniya na prohodah. / Bondarenko V.N., Pochupailo B.I., Syusyuka E.N. //, Nauchno-teoreticheskii zhurnal Vestnik BGTU imeni V.G.SHuhova, №2, - Belgorod: Izd-vo BGTU, 2010.- S.55-57.
7. Kondratev, S.I.Teoreticheskie osnovi upravleniya krupnotonnazhnimi sudami po kriteriyam bezopasnosti i energosberezheniya [Tekst] / S.I. Kondratev avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tehniceskikh nauk /Novorossiiskaya gosudarstvennaya morskaya akademiya. Novorossiisk, 2004
8. Kondratev S.I. Sintez programmnih traektorii metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Tekst] / S.I. Kondratev // Izvestiya visshih uchebnih zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tehnicheskie nauki. 2003.№ S6. S. 41-43.
9. Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskii podhod k ocenivaniyu deyatelnosti sudovih specialistov: eksperimentalnaya aprobaciya predlozhennih modelei i procedur//Morskie intellektualnie tehnologii. 2019. № 4-3 (46). S. 104-110.