

2. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, Design and Control. NW: SRS Press Taylor & Francis Group; 2014.

3. Малинин А.Г. Устройство горизонтальной завесы с помощью струйной цементации грунта. URL: <http://jet-grouting.info>

4. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: монография. Пермь: Пресстайм; 2007.

[Malinin A.G. Struinaya tsementatsiya gruntov: monografiya. Perm': Presstaim; 2007. (In Russ).]

5. His J.P., Yu J.B.Y. "Jet grout application for excavation in soft marine clay" // Proceeding of the 16th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Osaka. 2005; 1485-1489.

6. Форум проектировщиков Белоруссии. URL: <https://www.skyscrapercity.com>

УДК 677.053.2

Завертанный Богдан Сергійович

Аспірант

Кафедра прикладної механіки та машин

Київський національний університет технологій та дизайну

Манойленко Олександр Петрович

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри

Кафедра прикладної механіки та машин

Київський національний університет технологій та дизайну

Акимов Олександр Олександрович

Кандидат технічних наук, доцент

Науково-випробувальний відділ

Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України

Горобець Василь Андрійович

Кандидат технічних наук, доцент,

Кафедра прикладної механіки та машин,

Київський національний університет технологій та дизайну

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ УКОЧУЮЧОГО РОЛИКА МЕХАНІЗМУ НАМОТУВАННЯ БОБІНАЖНО-ПЕРЕМОТУВАЛЬНИХ МАШИН

Завертанный Богдан Сергеевич

Аспирант

Кафедра прикладной механики и машин

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Манойленко Александр Петрович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой

Кафедра прикладной механики и машин

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Акимов Александр Александрович

Кандидат технических наук, доцент

Научно-испытательный отдел

Государственный научно-испытательный центр Вооруженных Сил Украины

Горобец Василий Андреевич

Кандидат технических наук, доцент,

Кафедра прикладной механики и машин,

Киевский национальный университет технологий и дизайна

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ УКАТЫВАЮЩЕГО РОЛИКА МЕХАНИЗМА НАМОТКИ БОБІНАЖНО-ПЕРЕМОТОЧНЫХ МАШИН

Zavertannyi Bogdan

Postgraduate student

Department of Applied Mechanics and Machines

Kyiv National University of Technology and Design

Oleksandr Manoilenko

PhD, Associate Professor, Head of Department

Department of Applied Mechanics and Machines

Kyiv National University of Technologies and Design

Oleksandr Akymov

PhD, Associate Professor

Research and testing department

COMPARATIVE ANALYSIS OF DEVICES OF THE ROLLING ROLLER OF THE MECHANISM FOR WINDING OF THE BOBBIN-REWINDING MACHINES

Анотація. Наведена структура нових пристроїв укочуючого ролика. Виконано порівняння 5-ти нових намотувальних механізмів перемотувальних машин з різними пристроями укочуючого ролика. Критеріями порівняння прийняті значення частот власних коливань при взаємодії системи укочуючий ролик – пакування. Розроблено математичну модель, яка дозволяє визначити власні коливання коромисла з укочуючим роликом. Змодельовано поведінку вільних коливань під час роботи нових конструкцій пристроїв укочуючого ролика. Нові конструкції укочуючого ролика дозволяють забезпечити надійне прилягання останнього до пакування вздовж всієї лінії контакту. Також нові конструкції створюють додаткове демпфування коливань коромисла укочуючого ролика та зменшують витрати енергії при проковзуванні циліндричного укочуючого ролика по конічному пакуванні. Це спрямовано на підвищення якості пакування конічної форми, яке отримується на обладнанні, та надійності процесу перемотування. Проведено порівняння власних коливань системи укочуючий ролик – пакування при різних жорсткостях пружних елементів пристроїв укочуючого ролика. Зі зміною жорсткості пружних елементів змінюється не тільки частота власних коливань, а і коефіцієнт динамічності, який показує у скільки разів амплітуда вимушених коливань більше статичного відхилення та дає оцінку впливу частоти вимушеної сили. В порівнянні з базовим механізмом нові механізми дозволяють знизити власні частоти коливань коромисла на 70÷85 %. Це дозволяє підвищити робочі швидкості механізму намотування на 9÷12 %. Розроблені механізми дозволяють зменшити динамічне навантаження від коромисла з укочуючим роликом на механізм намотування при застосуванні пружних елементів з коефіцієнтом жорсткості $C_p=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ в порівнянні з базовою конструкцією. Це також дозволяє підвищити робочі швидкості та зменшити вібрації в перемотувальній машині.

Анотация. Приведена структура новых устройств укатывающего ролика. Выполнено сравнение 5-ти новых намоточных механизмов перемоточных машин с различными устройствами укатывающего ролика. Критериями сравнения приняты значения частот собственных колебаний при взаимодействии системы укатывающий ролик – паковка. Разработана математическая модель, которая позволяет определить собственные колебания коромысла с укатывающим роликом. Смоделировано поведение свободных колебаний при работе новых конструкций устройств укатывающего ролика. Новые конструкции укатывающего ролика позволяют обеспечить надежное прилегание последнего к упаковке вдоль всей линии контакта. Также новые конструкции создают дополнительное демпфирование колебаний коромысла укатывающего ролика и уменьшают затраты энергии при проскальзывании цилиндрического укатывающего ролика по конической паковке. Это направлено на повышение качества упаковки конической формы, получаемого на оборудовании, и надежности процесса перемотки. Проведено сравнение собственных колебаний системы укатывающий ролик – паковка при разной жесткости упругих элементов устройств укатывающего ролика. С изменением жесткости упругих элементов меняется не только частота собственных колебаний, а и коэффициент динамичности, который показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний больше статического отклонения и дает оценку влияния частоты вынужденной силы. По сравнению с базовым механизмом новые механизмы позволяют снизить собственные частоты колебаний коромысла на 70÷85 %. Это позволяет повысить рабочие скорости механизма намотки на 9÷12 %. Разработанные механизмы позволяют уменьшить динамическую нагрузку от коромысла с укатывающим роликом на механизм намотки при применении упругих элементов с коэффициентом жесткости $C_p=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ по сравнению с базовой конструкцией. Это также позволяет повысить рабочие скорости и уменьшить вибрации в перемоточной машине.

Abstract. The structure of new devices of the rolling roller is given. The comparison of 5 new winding mechanisms of rewinding machines with different devices of the roller has been done. By the comparison criteria adopted the values of the frequencies of natural oscillations in the interaction of the system roller – packing. A mathematical model has been developed to determine the oscillations of a rocker with a rolling roller. The behavior of free oscillations during the work of new designs of devices of the rolling roller has been modeled. The new rolling roller construction allows the latter to be fitted securely to the package along the entire contact line. Also, new constructions create additional damping of oscillations of the rocker arm of the rolling roller and reduce energy consumption when the cylindrical rolling roller is slid across the conical packing. This aims to improve the quality of the conical packing that is obtained on the equipment and the reliability of the rewinding process. The comparison of the oscillations of the system of the rolling roller - the packing at different rigidity of the elastic elements of the devices of the rolling roller has been done. As the rigidity of the elastic elements changes, not only the oscillation frequency changes, but also the dynamic coefficient, which shows how many times the amplitude

of the forced oscillations is greater than the static deviation and gives an estimate of the effect of the frequency of the forced force. In the comparison with the basic mechanism, the new mechanisms allow to reduce the natural oscillation frequencies of the rocker by 70÷85%. This allows the working speed of the winding mechanism to be increased by 9÷12%. The developed mechanisms allow to reduce the dynamic load from the rocker arm with the rolling roller to the winding mechanism when applying elastic elements with a coefficient of rigidity $C_p = 5 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ in comparison with the basic structure. It also helps to increase operating speeds and reduce vibrations in the rewinding machine.

Ключові слова: бобіна, частота коливань, укочуючий ролик, механізм намотування, коефіцієнт динамічності, динамічна модель, метод напівжорсткого шпинделя.

Ключевые слова: бобина, частоты колебаний, укатывающий ролик, механизм намотки, коэффициент динамичности, динамическая модель, метод полужесткого шпинделя.

Keywords: bobbin, oscillation frequency, rolling roller, winding mechanism, dynamic coefficient, dynamic model, semi-rigid spindle method.

1. Вступ

Якісне намотування текстильного матеріалу (ниток, пряжі) на бобіну впливає не тільки на якість продукції готового виробу, але й на надійність роботи технологічного обладнання. В процесі перемотування текстильних матеріалів і укладання на бобіну необхідна стабілізація натягу та рівномірна щільність пакування для подальшої безперебійної переробки матеріалу. Ці вимоги забезпечуються встановленням механізму укочуючого ролика.

Актуальним являється вивчення впливу конструкції пристрою укочуючого ролика на віброактивність механізму намотування. Це дає можливість визначити вплив укочуючого ролика на робочі швидкості обладнання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботах [1-13] розглянута кінематична та динамічна сутність процесу намотування пряжі. Однак в більшості робіт не розглядається вплив частот коливань окремих елементів механізму намотування на його працездатність, не враховуються пружні властивості матеріалу. В тих же роботах [9-13] де ці фактори враховуються, не досліджується вплив величини та характеру зовнішніх сил, які діють на укочуючий ролик, що не дає повного опису коливальної системи механізму намотування. Так, у роботах [1, 2] не надається важливого значення впливу структури механізму укочуючого ролика на частоти власних коливань механізму намотування, що впливає на динамічні характеристики машини і, відповідно, на якість її роботи. В роботі [3] розглянуто вплив швидкості розмотування нитки на технологічні параметри та вібрації при намотуванні. Показано вплив динамічної поведінки пряжі при намотуванні, але без врахування впливу конструктивних особливостей обладнання на процес намотування. У роботах [4, 5] описано конструкції механізмів намотування та укочуючих роликів з використанням жорсткого кріплення укочуючого ролика без визначення його впливу на динамічні характеристики механізму намотування. Так в роботі [6] окрім опису механізмів намотування розглянуто та визначені параметри швидкості намотування. Так, наприклад, в роботах [6, 7] визначаються швидкісні параметри

намотування без розгляду частот коливань окремих кінематичних ланцюгів механізму. Розгляд впливу значень параметрів бобіни з пакуванням на частоти коливань системи кінематично зв'язаних роторів в роботах [8, 9] виконаний без врахування величини впливу зовнішніх сил. Антологічний недолік мають і роботи [12, 13] присвячені дослідженню критичних швидкостей та нелінійних вільних коливань гнучкої роторної системи. Аналогічне дослідження, але з врахуванням пружності опор та вала, проведено в роботі [13]. Таким чином, відомі методики досліджень не дають повного опису коливальної системи механізму намотування перемотувальних машин, оскільки не враховують вплив величини та характеру зовнішніх сил, які виникають з боку укочуючого ролика.

Для регулювання щільності пакування та натягу нитки в намотувальних механізмах (рис. 1, а) бобінажно-перемотувальних машин застосовується пристрій укочуючого ролика, в якому укочуючий ролик рухомо встановлений на жорстко закріплену вісь в коромислі. Така конструкція укочуючого ролика застосована в перемотувальних машинах «Полікон» ф. Бармаг (Німеччина), ф. SSM Textile Machinery (Швейцарія) [6] та машинах типу БП (Росія) [14–17]. Основною перевагою даного механізму є простота конструкції укочуючого ролика, що знижує собівартість обладнання. Однак, поряд з перевагами, типова конструкція пристрою укочуючого ролика має суттєві недоліки. По-перше, жорстке закріплення вісі укочуючого ролика в коромислі не забезпечує демпфування коливань, які виникають в результаті обертання бобіни. Також це призводить до нерівномірного притискання його до бобіни з пакуванням по всій довжині твірної конуса, і, як наслідок, до нерівномірної щільності пакування текстильного матеріалу. Крім того, в процесі роботи машини укочуючий ролик вводиться у контакт з напрацьованим пакуванням через коромисло з противагою. Коромисло при вібраціях створює додаткове динамічне навантаження на бобіну, внаслідок чого укочуючий ролик періодично втрачає контакт з пакуванням, що також призводить до зниження якості пакування. По-друге, суттєвим недоліком є відсутність можливості самовстановлення укочуючого ролика відносно пакування та бобіни. Все це призводить до

відхилення осі укочуючого ролика від лінії твірної конуса бобіни з пакуванням, що призводить до нерівномірного притискання його до пакування та до різної його щільності. І, на останнє, різна величина лінійних швидкостей вздовж твірної бобіни з пакуванням призводить до проковзування циліндричного укочуючого ролика по пакуванню, що супроводжується втратами енергії на тертя та також зниженням якості пакування.

Таким чином, виходячи із вищевказаного, можна стверджувати, що в літературних джерелах не виявлені дослідження динамічної взаємодії укочуючого ролика з пакуванням з врахуванням впливу зовнішніх сил. Також не досліджено вплив цієї взаємодії на якість пакування та роботу механізму намотування в цілому.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка нових структур пристроїв укочуючого ролика, в яких забезпечується надійне прилягання його до пакування вздовж всієї лінії контакту, демпфування коливань та зменшення витрат енергії при проковзуванні.

Задачами дослідження для досягнення цієї мети є:

- розробити методику та математичні моделі визначення динамічних характеристик процесу намотування, власних частот та коефіцієнтів динамічності з урахуванням впливу жорсткості кріплення укочуючого ролика та його конструкції;
- розробити нові види кріплень укочуючого ролика в коромислі та зміну конструкції самого ролика, які забезпечують покращення значень динамічних характеристик порівняно з базовою конструкцією пристрою укочуючого ролика;
- провести порівняльний аналіз запропонованих структур пристроїв укочуючого ролика з базовою.

4. Результати розробки пристроїв укочуючого ролика та їх аналіз

Запропоновано 5 нових структур намотувальних механізмів перемотувальних машин (рис. 1, б–е) з різними пристроями укочуючого ролика [18–22].

Пристрій базової конструкції механізму намотування нитки у бобіни містить електричний

привод, що включає електродвигун 1 (рис. 1, а). Електродвигун з'єднаний пасовими передачами 2–4 з механізмом розкладника 5 та бобінотримачем 6, на якому закріплена конічна бобіна 7. Регулювання зусилля натягу пасів здійснюється натяжним шківом 8. Пристрій укочуючого ролика 9 містить коромисло 10 з противагою 11, яке рухомо встановлено на валу 12. Укочуючий ролик 9 також рухомо встановлений в підшипниках кочення на осі 13, яка закріплена в коромислі 10, а його напрямна 14 з'єднана поступальною кінематичною парою з розкладником 5. Пристрій укочуючого ролика М1 (рис. 1, б) [18] відрізняється від базової конструкції встановленням осі 13 укочуючого ролика 9 в двох амортизаторах, які виконані у вигляді двох пружин 15.

Пружне кріплення укочуючого ролика в коромислі 10 забезпечує його щільне прилягання по всій лінії контакту та демпфування коливань, які виникають збоку пакування.

Пристрій укочуючого ролика М2 (рис. 1, в) [19] виконаний з амортизатором у вигляді пружних втулок 16. У пружних втулках закріплена вісь 13 укочуючого ролика 9, який аналогічно базовій конструкції встановлено на підшипниках кочення та противагою 11. Укочуючий ролик введено в силове замикання з конічною бобіною 7.

Пружне кріплення укочуючого ролика в коромислі 10 забезпечує його щільне прилягання по всій лінії контакту та демпфування коливань, які виникають збоку пакування.

Пристрій укочуючого ролика М3 (рис. 2, г) [20] має наступну структуру – кінці коромисла 10 з'єднані обертальними кінематичними парами з циліндричними пальцями 17, в отвори яких рухомо встановлені кінці штоків амортизаторів 18. Амортизатори виконані зі сферичними частинами та з різьбовими частинами (на рис. не позначено), на яких закріплені з можливістю регулювання гайки 19. На штоках амортизаторів 18 відповідно встановлені пружини 16, які забезпечують демпфування укочуючого ролика 9. Сферичне з'єднання пружин з віссю 13 укочуючого ролика 9 та циліндричне з'єднання з коромислом 10 забезпечує самовстановлення укочуючого ролика 9 на поверхні бобіни 7 з пакуванням.

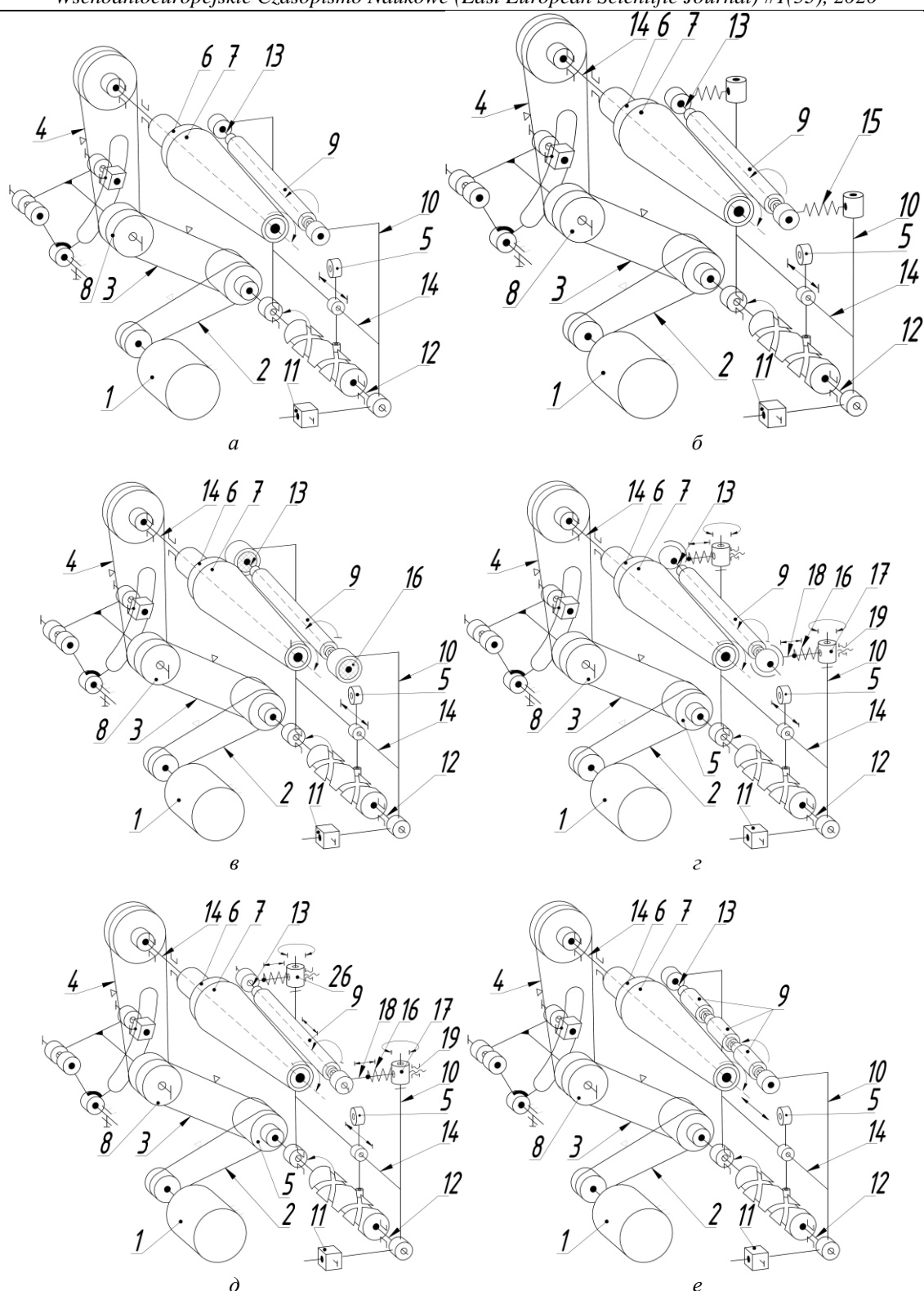


Рис. 1. Кінематичні схеми намотувальних механізмів базової конструкції та модифікації М1–М5 перемотувальних машин: а – базова конструкція; б – М1 з підпружиненим укочуючим роликом; в – М2 з демпферними втулками; г – М3 зі сферичним з'єднанням укочуючого ролика з коромислом пружними елементами; д – М4 з підпружиненим укочуючим роликом та з'єднаного циліндричними кінематичними парами з коромислом; е – М5 з трьома укочуючими роликами. 1 – електричний привод; 2–4 – пасові передачі; 5 – механізм розкладника; 6 – механізм бобінотримача; 7 – бобіна; 8 – натяжний шків; 9 – укочуючий ролик; 10 – коромисло; 11 – протизвага; 12 – вал; 13 – вісь; 14 – напрямна; 15 – пружина; 16 – втулка пружна; 17 – циліндричний палець; 18 – шток амортизатора; 19 – гайка

Пристрій укочуючого ролика М4 (рис. 2, д) [21] має структуру схожу з М3, відмінністю є те, що

кінці штоків амортизаторів 18 виконані у вигляді ковзних втулок. Втулки з'єднані зворотньо-

поступальною кінематичною парою з віссю 13 укочуючого ролика 9. Укочуючий ролик аналогічно противагою 11 введений в силове замикання з конічною бобіною 7. Регулювання жорсткості демпфера в конструкціях механізмів модифікації М3 та М4 здійснюється гайками 19.

Пристрій укочуючого ролика М5 (рис. 1, е) [22] на відміну від М1–М4 не має в конструкції амортизатора і його структура є найближчою до структури базового варіанту. На відміну від базової конструкції укочуючий ролик 9 виконаний у вигляді трьох окремих сегментів, що забезпечує

зменшення його проковзування відносно пакування бобіни.

З метою порівняння механізмів визначимо вплив жорсткості кріплення укочуючого ролика в коромислі на динамічні характеристики (власні частоти коливання, коефіцієнт динамічності) розглянутих механізмів модифікацій М1–М5.

Визначимо коливання коромисла з жорстко закріпленою віссю укочуючого ролика намотувального механізму (М1 та М5), динамічна модель, якого зображена на рис. 2.

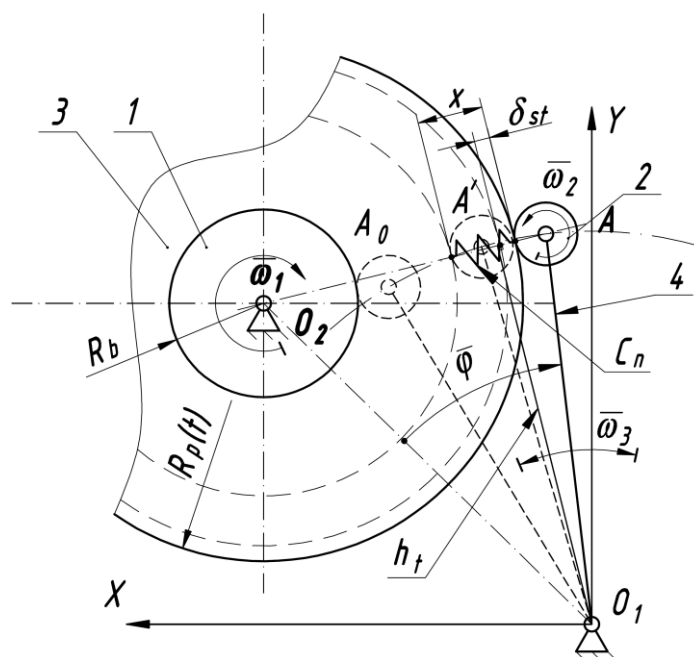


Рис. 2. Динамічна модель намотувального механізму (М1 та М5) з жорстким кріпленням вісі укочуючого ролика. 1 – бобінотримач; 2 – укочуючий ролик; 3 – пакування; 4 – коромисло

При нехтуванні обертанням укочуючого ролика та бобінотримача, положення системи визначатиметься координатою ω – кута повороту важеля O_1A укочуючого ролика відносно положення статичної рівноваги [23].

Розглядаючи переміщення коромисла з укочуючим роликом, як дискретні значення для конкретних мас пакування, для поточного положення ϕ кінетичну T та потенціальну Π енергії коливальної системи визначено наступними виразами:

$$T = \frac{1}{2} I \cdot \dot{\phi}^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} C_n \cdot \delta^2 + P \cdot h_t \cdot \phi - \frac{C_n \cdot \delta_{ст}^2}{2}, \quad (2)$$

$$C_n = C_l \cdot L_c, \quad (3)$$

де I – момент інерції укочуючого ролика з коромислом відносно його осі, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

δ – деформація бобіни в динамічних умовах, м;

P – вага укочуючого ролика з коромислом, Н;

C_n – жорсткість тіла намотування(пакування), Н/м;

C_l – жорсткість пакування розподілена по

довжині, Н/м²;

L_c – довжина твірної пакування, м;

h_t – плече сили реакції укочуючого ролика, м;

R_b – радіус бобіни, м;

$R_p(t)$ – поточний радіус пакування (в момент часу t), м;

$\delta_{ст}$ – попередня деформація тіла намотування, м.

Згідно з методу напівжорсткого [23] шпинделя для визначення власних частот коливань приймаємо, що бобінотримач та бобіна абсолютно жорсткі та недеформовані, а вал вважається пружним, тобто таким який може змінювати своє положення у просторі під дією сил. Жорсткість пакування C_n враховуємо у вигляді додаткової пружини.

Деформація δ в динамічних умовах при малих зміщеннях центра мас бобінотримача дорівнює:

$$\delta = \delta_{ст} + x - h_t \cdot \phi. \quad (4)$$

Підставляючи значення (4) в вираз (2) після перетворення одержимо:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_n (\delta_{ст} + x - h_t \cdot \phi)^2 + P \cdot h_t \cdot \phi - \frac{C_n \cdot \delta_{ст}^2}{2}. \quad (5)$$

Звідси:

$$\frac{d\Pi}{d\phi} = - C_n \cdot h_t \cdot \delta_{ст} - C_n \cdot h_t \cdot x + C_t \cdot h_t^2 \cdot \phi + P \cdot h_t. \quad (6)$$

Враховуючи, що при $\phi=0$ $\left. \frac{d\Pi}{d\phi} \right|_{\phi=0} = 0$, отримаємо умову статичної рівноваги:

$$C_n \cdot h_t \cdot \delta_{ст} - P \cdot h_t = 0. \quad (7)$$

З врахуванням кінетичної та потенціальної енергії, умови статичної рівноваги (7) за допомогою рівняння Лагранжа отримаємо диференціальне рівняння вільних коливань у вигляді:

$$I \cdot \ddot{\phi} + C_n \cdot h_t^2 \cdot \phi = 0 \text{ або } \ddot{\phi} + p^2 \cdot \phi = 0. \quad (8)$$

де $p = \sqrt{\frac{C_n \cdot h_t^2}{I}}$ – власна частота коливань бобіноотримача з бобіною без врахування пружності кріплення укочуючого ролика.

Для характеристики стабільності роботи

механізму важливими показниками є коефіцієнт динамічності η [24], який показує, у скільки разів амплітуда вимушених коливань більше статичного відхилення, та дає оцінку впливу частоти вимушеної сили:

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{p^2}} \quad (9)$$

де ω – кутова швидкість бобіно тримача, рад/с;
 p – власна частота коливань бобіно тримача, рад/с.

Розглянемо власні коливання коромисла з пружним кріпленням укочуючого ролика. З урахуванням [24] приймаємо, що систему дії сил можна розглядати у площині перпендикулярній та посередині лінії контакту пакування з укочуючим роликом, тоді динамічна модель для механізмів М2–М4 має вигляд рис. 3.

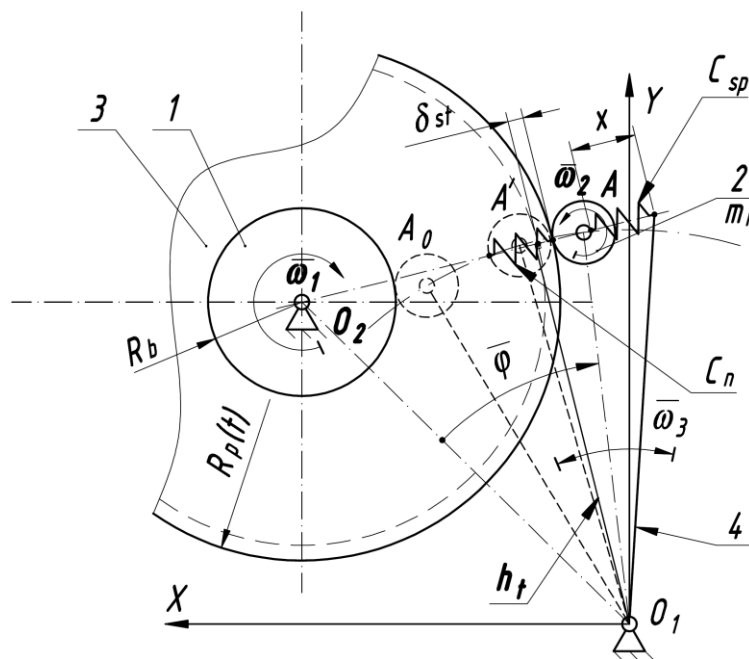


Рис. 3. Динамічна модель намотувального механізму з пружним кріпленням укочуючого ролика (М2–М4).
1 – бобіно тримач; 2 – укочуючий ролик; 3 – пакування; 4 – коромисло

Вираз для визначення кінетичної енергії набуває вигляду:

$$T = \frac{1}{2} I_1 \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_p \cdot \dot{x}^2, \quad (10)$$

$$I_1 = I - m_p \cdot L_p^2$$

де m_p – маса укочуючого ролика, кг; I_1 – момент інерції коромисла, кг·м².

Потенціальна енергія визначиться з виразу:

$$\Pi = \frac{1}{2} C_n \cdot x^2 + \frac{1}{2} C_p (x - h_t \cdot \phi)^2. \quad (11)$$

де C_p – жорсткість пружини механізму кріплення укочуючого ролика, Н/м;

Використовуючи вирази, що визначає кінетичну та потенціальну енергії та рівняння Лагранжа другого роду, одержимо систему диференціальних рівнянь другого порядку в наступному вигляді:

$$\begin{cases} m_p \cdot \ddot{x} + C_p(x - h_t \cdot \phi) + C_n \cdot x = 0, \\ I_1 \cdot \ddot{\phi} - C_p \cdot h_t(x - h_t \cdot \phi) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Згрупувавши значення жорсткостей відносно узагальненої координати, отримаємо:

$$\begin{cases} m_p \cdot \ddot{x} + (C_p + C_n)x - C_p \cdot h_t \cdot \phi = 0, \\ I_1 \cdot \ddot{\phi} - C_p \cdot h_t \cdot x + C_p \cdot h_t^2 \cdot \phi = 0. \end{cases} \quad (13)$$

За допомогою підстановки $\phi = A_1 \sin \omega t$ та $x = A_2 \sin \omega t$ одержимо характеристичну систему двох алгебраїчних рівнянь, з якої за допомогою процедури [23] одержимо визначник системи у вигляді:

$$D(p) = \begin{vmatrix} C_p + C_n - m_p \cdot p^2 & -C_p \cdot h_t \\ -C_p \cdot h_t & C_p \cdot h_t^2 - I_1 \cdot p^2 \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Значення p , при яких $D(p) = 0$, будуть значеннями власних частот коливання механічної системи.

Проведемо розрахунок частот власних коливань коромисла для механізмів в з жорстким закріпленням осі укочуючого ролика (M5 та базової конструкції) та пружного з'єднання з коромислом (M1–M4). Виходячи з [23] та експериментальних досліджень, з достатньою точністю можна прийняти те, що коефіцієнт пружності тіла намотування змінюється лінійно, а жорсткість пружин для механізмів M1–M4 вважається алгебраїчною сумою значень жорсткостей. Приймавши відповідно до [23] значення параметрів механізму, проведено розрахунки.

5. Результати моделювання власних частот коливань укочуючого ролика

В результаті розрахунків отримано динамічні характеристики пристроїв укочуючого ролика в залежності від товщини тіла намотування власної частоти коливання коромисла та коефіцієнта динамічності (рис. 4).

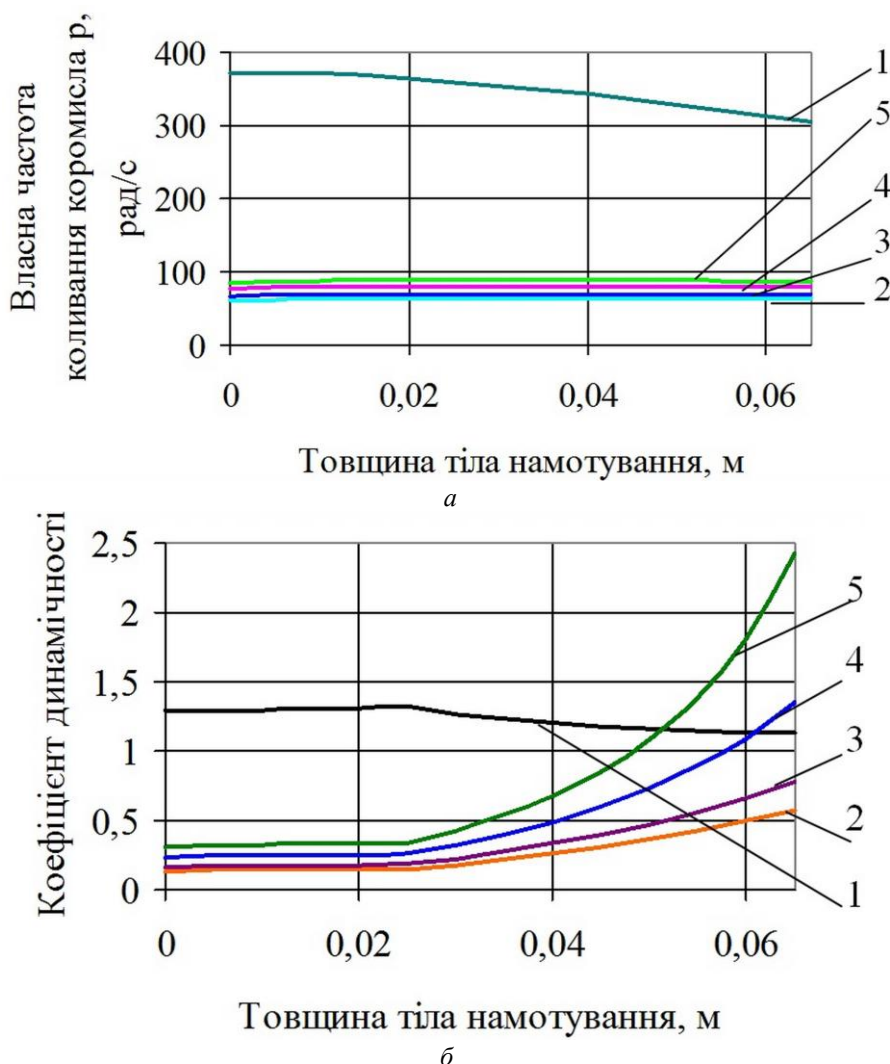


Рис. 4. Динамічні характеристики намотувальних механізмів: а – власна частота коливання коромисла; б – коефіцієнт динамічності; 1 – при жорсткому кріпленні осі укочуючого ролика в коромислі (M5 та базової конструкції); 2 – при жорсткості пружного елемента $C_{p1} = 5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$; 3 – при жорсткості пружного елемента $C_{p2} = 6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$; 4 – при жорсткості пружного елемента $C_{p3} = 8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$; 5 – при жорсткості пружного елемента $C_{p4} = 1 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$

З рисунка 4а видно значна ефективність використання пружного кріплення ролика, особливо на заключному етапі напрацювання пакування. Оптимальним значенням жорсткості кріплення пружного ролика $C_{p1}=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$.

Значення частот коливання ролика $\omega_n = 105 \text{ рад/с}$; $\omega_k = 639 \text{ рад/с}$.

Діапазон швидкостей намотування при вибраних параметрах:

Мінімальна $\omega_n = 105 \cdot 1.4 = 147 \text{ рад/с}$;
 $V = 147 \cdot 0,031 = 4,55 \text{ м/с}$;

Максимальна $\omega_k = 639 \cdot 0.7 = 447 \text{ рад/с}$;
 $V = 447 \cdot 0,031 = 14,87 \text{ м/с}$.

Робоча швидкість базової машини не більше 12 м/с

6. Обговорення результатів проведених досліджень

З аналізу отриманих діаграм значень частоти коливання укочуючого ролика встановлено:

1. Застування пружного з'єднання його з коромислом призводить до зниження частоти коливання коромисла. Криві 2 ($C_{p1}=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 3 ($C_{p2}=6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 4 ($C_{p3}=8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 5 ($C_{p4}=1 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$) (рис. 4, а) показують, що при збільшенні жорсткості кріплення укочуючого ролика власна частота коливань пропорційно збільшується.

2. Застування пружного з'єднання його з коромислом призводить до зниження коефіцієнта динамічності. Криві 2 ($C_{p1}=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 3 ($C_{p2}=6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 4 ($C_{p3}=8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$); 5 ($C_{p4}=1 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$) (рис. 4, б) показують, що при зменшенні жорсткості кріплення укочуючого ролика коефіцієнт динамічності має менші значення, що позитивно впливає на роботу механізму намотування [24].

3. Встановлено, що при пружному кріпленні укочуючого ролика власна частота коливань коромисла зменшується більше ніж в тричі (рис. 4, а).

4. При пружному кріпленні укочуючого ролика зменшується значення коефіцієнта динамічності при застосуванні пружних елементів з жорсткістю. В межах жорсткості $C_p = 5 \div 6 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$ призводить до зменшення коефіцієнта динамічності в двічі, що вказує на менші динамічні навантаження на систему в цілому.

7. Висновки

1. Розроблено нові структури пристроїв укочуючого ролика для намотувальних механізмів, які мають суттєві переваги порівняно з базовою конструкцією. 2. Вперше розроблена математична модель дослідження динаміки процесу намотування з урахуванням впливу зовнішніх сил, що діють на укочуючий ролик.

3. Проведений аналіз запропонованих пристроїв укочуючого ролика показав, що вони дозволяють зменшити вібрації механізму та забезпечити кращий контакт укочуючого ролика з пакуванням порівняно з базовим пристроєм.

4. Розроблені пристрої в результаті зменшення власних частот коливань коромисла на 70÷85 % дозволяють зменшити динамічне навантаження від

коромисла з укочуючим роликом на механізм намотування.

5. Визначено динамічні характеристики укочуючого ролика з підвісом, швидкість намотування нитки механізмом, власні коливання підвісу при лінійній характеристиці пружності тіла намотування, власні коливання підвісу при пружному кріпленні укочуючого ролика.

6. Показана ефективність використання пружного кріплення ролика особливо на заключному етапі напрацювання пакування. Найбільш сприятлива жорсткість елементів кріплення укочуючого ролика $C_{p1}=5 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$.

7. Найбільша швидкість перемотування, яку може забезпечити механізм з пружним кріпленням ролика - 14,8 м/с, що майже на 20% вище досягнутої на виробництві.

Література

1. Мартынич К. И. Исследование динамики движения фрикционного цилиндра на подвесе к пустому патрону / Л. С. Мазин, К. И. Мартынич // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2012. – №4. – С. 43-45.

2. Башметов, В. С. Технология и оборудование для подготовки нитей к ткачеству : учебное пособие / В. С. Башметов, Т. П. Иванова, В.В. Невских. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009. – 366 с..

3. Panin, A.I. & Rakova, O.A. & Rybaulina, I.V. & Nikolaeva, N.A.. (2015). Analysis in the coiling thread winding packages. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2015. 55-58.

4. Singh, M.K.. (2014). Industrial practices in weaving preparatory. Industrial Practices in Weaving Preparatory. 1-283.

5. Gandhi, K.L.. (2012). Woven Textiles: Principles, Technologies and Applications. 1-457.

6. Koranne, Milind. (2013). Fundamentals of yarn winding. 159-173.

7. Ali, Mohamed & Ibrahim, H. & El-Amary, Noha & Mashaly, Raafat. (2015). An upgraded soft winding machines based on advanced yarn tension modelling. 571-572. 10.1109/ASEMD.2015.7453709.

8. Hassan Heydari, Amir Khorram. (2019). Effects of location and aspect ratio of a flexible disk on natural frequencies and critical speeds of a rotating shaft-disk system. International Journal of Mechanical Sciences, 152, 596-612.

9. Sghaier, Emna & Bourdon, Adeline & Remond, Didier & Dion, Jean-Luc & Peyret, Nicolas. (2019). Coupled bending torsional vibrations of non-ideal energy source rotors under non-stationary operating conditions. International Journal of Mechanical Sciences, 163.

10. Gorbatyuk, Sergey & Kondratenko, Valery & Sedykh, Larisa. (2019). Influence of critical speed when working shafts with asymmetrically located monolithic weighting on the accuracy of work surfaces. Materials Today: Proceedings. 10.

11. Shachar Tresser, Amit Dolev, Izhak

Bucher.(2018).Dynamic balancing of super-critical rotating structures using slow-speed data via parametric excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 415, 59-77.

12. Hanmant P Phadatare, Vinay Maheshwari, Kedar S Vaidya, Barun Pratiher. (2017). Large deflection model for nonlinear flexural vibration analysis of a highly flexible rotor-bearing system. *International Journal of Mechanical Sciences*, 134, 532-544.

13. H. Roy, S. Chandraker. (2017). Dynamic study of viscoelastic rotor: Modal analysis of higher order model considering various asymmetries. *Mechanism and Machine Theory*, 109, 65-77.

14. Машиностроение. Энциклопедия /Ред. Совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Машины и агрегаты текстильной и легкой промышленности. Т. IV–13 /И.А. Мартынов, А.Ф. Прошков, А.П. Яскин и др.: Под общ. Ред. И.А. Мартынова. 1997. – 608 с.

15. Регельман Е. З., Рокотов Н.В. Приемные механизмы машин для производства химических волокон / под ред. Е.З. Регельмана. – Л. : Издательство Ленинградского университета. 1988. – 248 с.

16. Иванова, Т.П. Технология и оборудование для подготовки нитей к ткачеству: учебно-методический комплекс / Т.П.Иванова / УО «ВГТУ». – Витебск, 2008. – 306 с.

17. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов / Жмыхов И.Н., Гальбрайт Л.С., Акулич А.В. – Мн.:Вышэйшая школа, 2013. – 587 с.

18. Пристрій для намотування нитки у бобіни: пат. 137209 Україна : МПК(2006) В65Н 54/00. № u201903356; заявл. 03.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.

19. Пристрій для намотування нитки у бобіни : пат. 136737 Україна : МПК(2006) В65Н 54/00. № u201903355; заявл. 03.04.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

20. Пристрій для намотування нитки у бобіни: пат. 136673 Україна : МПК(2006) В65Н 54/00. № u201902864; заявл. 22.03.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

21. Пристрій для намотування нитки у бобіни: пат. 136735 Україна : МПК(2006) В65Н 54/00. № u201903353; заявл. 03.04.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

22. Пристрій для намотування нитки у бобіни: пат. 136674 Україна : МПК(2006) В65Н 54/00. № u201902866; заявл. 22.03.2019; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.

23. Коритынский Я.И. Динамика упругих систем текстильных машин. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982, – 272 с.

24. Гафаров Р.Х. Что нужно знать о сопротивлении материалов: Учебное пособие для вузов обуч. по направлениям подгот. и спец. в области техники и технологии/ Р.Х. Гафаров, В.С. Жернаков; под ред. В.С. Жернакова. – М.: Машиностроение, 2007. – 275 с.

References

1. Martyinchik K. I. (2012) Issledovanie dinamiki dvizheniya friktsionnogo tsilindra na podvese k pustomu patronu [The study of the dynamics of the movement of the friction cylinder on a suspension to an empty cartridge]. *Izvestiya vuzov. Tehnologiya legkoy promyshlennosti*, 4, 43-45. [in Russian].

2. Bashmetov V. S. (2009) Tekhnologiya i oborudovanie dlya podgotovki nitej k tkachestvu : uchebnoe posobie [Technology and equipment for preparing threads for weaving] / V. S. Bashmetov, T. P. Ivanova, V.V. Nevskih. – Vitebsk : УО «ВГТУ» st' [in Russian].

3. Panin, A.I. & Rakova, O.A. & Rybaulina, I.V. & Nikolaeva, N.A.. (2015). Analysis in the coiling thread winding packages. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2015, 55-58.

4. Singh, M.K.. (2014). Industrial practices in weaving preparatory. *Industrial Practices in Weaving Preparatory*. 1-283.

5. Gandhi, K.L.. (2012). Woven Textiles: Principles, Technologies and Applications. 1-457.

6. Koranne, Milind. (2013). Fundamentals of yarn winding. 159-173.

7. Ali, Mohamed & Ibrahim, H. & El-Amary, Noha & Mashaly, Raafat. (2015). An upgraded soft winding machines based on advanced yarn tension modelling. 571-572. 10.1109/ASEMD.2015.7453709.

8. Hassan Heydari, Amir Khorram. (2019). Effects of location and aspect ratio of a flexible disk on natural frequencies and critical speeds of a rotating shaft-disk system. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152, 596-612.

9. Sghaier, Emna & Bourdon, Adeline & Remond, Didier & Dion, Jean-Luc & Peyret, Nicolas. (2019). Coupled bending torsional vibrations of non-ideal energy source rotors under non-stationary operating conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 163.

10. Gorbatyuk, Sergey & Kondratenko, Valery & Sedykh, Larisa. (2019). Influence of critical speed when working shafts with asymmetrically located monolithic weighting on the accuracy of work surfaces. *Materials Today: Proceedings*. 10.

11. Shachar Tresser, Amit Dolev, Izhak Bucher.(2018).Dynamic balancing of super-critical rotating structures using slow-speed data via parametric excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 415, 59-77.

12. Hanmant P Phadatare, Vinay Maheshwari, Kedar S Vaidya, Barun Pratiher. (2017). Large deflection model for nonlinear flexural vibration analysis of a highly flexible rotor-bearing system. *International Journal of Mechanical Sciences*, 134, 532-544.

13. H. Roy, S. Chandraker. (2017). Dynamic study of viscoelastic rotor: Modal analysis of higher order model considering various asymmetries. *Mechanism and Machine Theory*, 109, 65-77.

14. Mashinostroenie. Enciklopediya /Red. Sovet: K.V. Frolov (pred.) i dr. М.: Mashinostroenie (1997). Mashiny i agregaty tekstil'noj i legkoj promyshlennosti.

T. IV–13 [Machines and units of textile and light industry. T. IV–13] / I.A. Martynov, A.F. Proshkov, A.P. YAskin i dr.: Pod obshch. Red. I.A. Martynova [in Russian].

15. Regel'man E. Z., Rokotov N.V. (1988) Priemnye mekhanizmy mashin dlya proizvodstva himicheskikh volokon [Reception mechanisms of machines for the production of chemical fibers] / pod red. E.Z. Regel'mana. – L. : Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta. [in Russian].

16. Ivanova, T.P. (2008) Tekhnologiya i oborudovanie dlya podgotovki nitej k tkachestvu: uchebno-metodicheskij kompleks [Technology and equipment for the preparation of threads for weaving: educational-methodical complex] / T.P.Ivanova / UO «VGTU». – Vitebsk [in Russian].

17. ZHmyhov I.N., Gal'braj L.S., Akulich A.V. (2013) Processy i oborudovanie proizvodstva voloknistyh i plenochnyh materialov [Processes and equipment for the production of fibrous and film materials] / ZHmyhov I.N., Gal'braj L.S., Akulich A.V. – Mn.: Vyshejschaya shkola [in Russian].

18. Pristrij dlya namotuvannya nitki u bobini: pat. 137209 Ukrayina : MPK(2006) B65H 54/00. № u201903356; zayavl. 03.04.2019 ; opubl. 10.10.2019, Byul. № 19.

19. Pristrij dlya namotuvannya nitki u bobini : pat. 136737 Ukrayina : MPK(2006) B65H 54/00. № u201903355; zayavl. 03.04.2019 ; opubl. 27.08.2019,

Byul. № 16.

20. Pristrij dlya namotuvannya nitki u bobini: pat. 136673 Ukrayina : MPK(2006) B65H 54/00. № u201902864; zayavl. 22.03.2019 ; opubl. 27.08.2019, Byul. № 16.

21. Pristrij dlya namotuvannya nitki u bobini: pat. 136735 Ukrayina : MPK(2006) B65H 54/00. № u201903353; zayavl. 03.04.2019 ; opubl. 27.08.2019, Byul. № 16.

22. Pristrij dlya namotuvannya nitki u bobini: pat. 136674 Ukrayina : MPK(2006) B65H 54/00. № u201902866; zayavl. 22.03.2019; opubl. 27.08.2019, Byul. № 16.

23. Koritysskij YA.I. (1982) Dinamika uprugih sistem tekstil'nyh mashin [The dynamics of elastic systems of textile machines] . M.: Legkaya i pishchevaya prom-st' [in Russian].

24. Kantorovich Z. B. (1960) Osnovy rascheta himicheskikh mashin i apparatov : uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of the calculation of chemical machines and apparatus: a textbook for universities] / Z. B. Kantorovich. – Moskva: Mashgiz [in Russian].

25. Gafarov R.H. (2007) Chto nuzhno znat' o soprotivlenii materialov [What you need to know about material resistance]: Uchebnoe posobie dlya vuzov obuch. po napravleniyam podgot. i spec. v oblasti tekhniki i tekhnologii/ R.H. Gafarov, V.S. ZHernakov; pod red. V.S. ZHernakova. – M.: Mashinostroenie [in Russian].

УДК 656.6

Shibaev O.G.

*doctor of technical science, professor,
Odessa National Maritime University*

Koskina Yu.O.

*candidate of technical science, associated professor,
Odessa National Maritime University*

DYNAMIC MODEL OF OPTIMIZATION OF PROJECT OF MARITIME MERCHANT FLEET OPERATING

Шибяєв О.Г.

*доктор технічних наук, професор
Одеський національний морський університет*

Коскіна Ю.О.

*кандидат технічних наук, доцент
Одеський національний морський університет*

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЕКТУ РОБОТИ МОРСЬКОГО ТОРГОВЕЛЬНОГО ФЛОТУ

Summary. The developed mathematical model allows to plan the merchant fleet work on carriages of cargoes by choosing the most profitable voyage during the certain time period divided for steps where each step is the vessel's voyage. The work of vessel on cargo transportation over a time period is considered based on the multi-step nature of this process, respectively – the task of maximizing profit of a searched period of time is formulated as a set of individual tasks that maximize profit at each step. The objective function of the model is the mathematical expectation of the profit from each voyage offered at the step and the probability of obtaining such profit is characterized by the probability of applying a certain strategy. The application of the proposed model is presented as an algorithm, according to which the initial values of the control variables are assumed to be equal at each step but are corrected from iteration to iteration allowing to solve the problem to obtain a certain value of a metric required.