

І. М. Рудько
Б. Я. Бакай
І. Р. Каратник
В. М. Гобела
І. В. Радяк

КОМПЕНСАТОРИ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТРИМАЛЬНИХ КАНАТІВ ПІДВІСНИХ ДОРІГ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЛІСОМАТЕРІАЛІВ

Національний лісотехнічний університет України

Підвісні дороги для транспортування лісоматеріалів за технологічністю, питомими енерговитратами, матеріаломісткістю та рівнем негативного впливу на довкілля в складних природних умовах експлуатування є достатньо ефективними, порівняно з аналогічними типами машин. Оскільки у лісопромисловому виробництві зазвичай застосовують нестационарні підвісні дороги, які характеризуються полегшеною конструкцією з відносно невеликими запасами міцності елементів канатної оснастки, то для такого типу доріг важливими чинниками їхньої ефективної роботи є надійність і безпечність експлуатування тримальних канатів. Тримальні канати з метою зменшення вартості та тривалості виконання монтажно-демонтажних робіт зазвичай жорстко закріплюють до дерев, пнів або штучних опор. Така схема закріплення канатів є зручною у технічному плані, однак не дозволяє забезпечити постійний натяг тримальних канатів під час руху каретки з вантажем уздовж прольоту, при вітровому навантаженні, можливих коливаннях температури, обледенінні елементів конструкцій, аварійних ситуаціях. Як наслідок, інтенсивна зміна натягу канатів у процесі їхньої експлуатації спричиняє виникнення динамічних навантажень і коливань канатної оснастки, а також нерівномірне і пришвидшене зношування тримальних канатів, зниження їхньої довговічності. Для таких умов з метою підвищення надійності роботи канатної оснастки підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів (як окремих наявних зразків техніки, так і новітніх) запропоновано оснащувати їх компенсаторами переміщень тримальних канатів. Проаналізувавши низку прототипних пристроїв, які ефективно застосовують у суміжних галузях промисловості, зроблено висновок, що для умов лісопромислового виробництва раціональними можна вважати пневматичні, механічні та гідравлічні конструкції компенсаторів. Тому, зважаючи на зазначене, виконано детальний розрахунок та спроектовано основні технічні елементи компенсатора, розроблено схему керування його робочим органом, з використанням програмного комплексу Autodesk Inventor проаналізовано його напружено-деформований стан. Використання раціональних конструкцій компенсаторів і відповідних схем керування їхніми робочими органами створить передумови для надійної й безпечної експлуатації підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів у різних режимах роботи й рельєфно-кліматичних умовах, мінімізує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Ключові слова: компенсатор, стабілізація натягу, тримальний канат, підвісна дорога, транспортування лісоматеріалів.

Вступ

Підвісні канатні дороги ефективно застосовують у багатьох галузях промислово розвинених країн світу для транспортування різного роду вантажів. За рівнем негативного впливу на довкілля та технологічністю, а також за показниками питомих енерговитрат і матеріаломісткістю, такі системи в складних природних умовах експлуатування є достатньо ефективними, порівняно з іншими (аналогічними) типами машин [1–3].

У лісопромисловому виробництві України та інших країн Європи зазвичай застосовують нестационарні підвісні дороги, які характеризуються полегшеною конструкцією з відносно невеликими запасами міцності елементів канатної оснастки загалом і канатів зокрема ($n_s \approx 1,75-4$). У виробничій практиці строки служби тримальних та інших канатів є достатньо обмеженими і зазвичай не перевищують 1 року [4], тому зрозуміло, що для такого типу доріг важливими чинниками їхньої ефективної роботи є надійність і безпечність експлуатування [5]. У зазначених конструкціях ефективність роботи тримального каната як основного елемента підвісної дороги є визначальною для трельовальної системи в цілому [6, 7], оскільки вартість канатної оснастки загалом є значною і сягає в середньому 25–40 % загальної вартості установки, а трудовитрати для навішування канатів еквівалентні 55–65 % тривалості виконання монтажно-демонтажних робіт.

Для зменшення вартості та тривалості виконання монтажно-демонтажних робіт [8] тримальні

канати зазвичай жорстко закріплюють до пнів або штучних анкерних опор (інколи до дерев [9], закріплених частин стовбурів, стаціонарних та інвентарних щогл, підвішених на деревах канатів тощо). Використання такої схеми закріплення в технічному плані є зручним, однак не дає можливості забезпечити постійний натяг тримальних канатів під час руху каретки з вантажем уздовж прольоту (натяг канатів під час маятникового руху каретки з вантажем змінюється у великому діапазоні [10], відповідно, змінюються і запаси міцності канатів; відношення максимального натягу тримального каната до його мінімального натягу для наявних установок коливається в межах від 1,3 до 2,5, а коефіцієнт запасу міцності – від 2,5 до 6,25). Окрім того, зміну натягу тримальних канатів у процесі їхньої експлуатації спричиняють також вітрове навантаження, можливі коливання температури, обледеніння елементів конструкцій внаслідок атмосферного впливу, інші чинники, зокрема аварійні ситуації, які є особливо небезпечними. Зі свого боку інтенсивна зміна натягу канатів у процесі їхньої експлуатації спричиняє виникнення суттєвих динамічних навантажень і коливань усіх елементів канатної оснастки [11], а також нерівномірне і пришвидшене зношування тримальних канатів, зниження їхньої довговічності [12].

Метою роботи є виокремлення раціональних конструкцій, розроблення схеми керування та обґрунтування параметрів компенсаторів, які в автоматичному режимі забезпечуватимуть стабілізацію натягу тримальних канатів підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів, а також сприятимуть зниженню динамічних навантажень на робоче устаткування, підвищенню надійності роботи канатної оснастки.

Результати дослідження

З метою усунення зазначених недоліків схем кріплення і регулювання натягу тримальних канатів підвісні дороги для транспортування лісоматеріалів оснащують спеціальними пристроями – компенсаторами [13, 14]. Використання компенсаторів переміщень тримальних канатів дозволяє забезпечити їх рівномірний натяг, уникати пікових навантажень (перевантажень), зменшити ймовірність виникнення аварійних ситуацій і збільшити надійність роботи підйомно-транспортного устаткування загалом.

Проблема підтримання та автоматичного регулювання сили натягу гнучкого елемента з необхідною точністю є актуальною для машин та устаткування, в яких потрібно контролювати навантаження на тягово-тримальні органи [15, 16]. Саме для цього в суміжних із лісопромисловим виробництвом галузях економіки (підйомно-транспортному машинобудуванні, суднобудівній, видобувній, енергетичній, легкій та текстильній промисловостях) використовують низку різних за ефективністю і точністю способів та пристроїв [17, 18]. Компенсацію переміщень канатів, кабелів чи проводів виконують переважно у вузлах анкерних закріплень компенсаторами різних конструкцій: блочно-вантажними, з барабанами різного діаметра, гідравлічними, газогідравлічними, пружинними тощо.

Пневматичні компенсатори (натяжні пристрої) зазвичай виготовляють у вигляді циліндрів односторонньої дії, штокову порожнину яких заповнюють газом під тиском [5, 8, 19]. Недоліком компенсаторів такої конструкції є залежність їхніх робочих характеристик від температури навколишнього середовища, а також складність обслуговування й експлуатації (наявні процеси переведення газу в зріджений агрегатний стан), особливо в гірських умовах, на заболочених ділянках тощо. В умовах лісопромислового виробництва і технічної експлуатації підвісних канатних доріг для транспортування лісоматеріалів керувати роботою зазначених пневматичних компенсаторів можна, зокрема, за схемою, вказаною на рис. 1.

Система керування роботою пневматичного компенсатора передбачає виконання певних операцій. Насамперед оператор вмикає компресор 1. При нагнітанні тиску та його стабілізації (до 10^6 Па) оператор переміщує важіль 3. При цьому змінюється положення плунжера розподільника 2. Стиснуте повітря нагнітається в безштокову порожнину 5, змінюючи положення штока пневмоциліндра двобічної дії 4. При досягненні необхідного зусилля на штоку F [Н] оператор переводить його в середнє положення, чим блокує вихід повітря з обох порожнин циліндра. Для підтримання постійного тиску до безштокової порожнини під'єднане реле тиску 7 із спектротактами. При падінні тиску реле дає сигнал на електромагніт розподільника 8, який, змінюючи положення плунжера цього розподільника, забезпечує додаткове нагнітання повітря завдяки наявним з'єднанням із ресивером 9. Постійний контроль тиску з боку реле дає можливість стабілізувати зусилля на штоку F. Для розвантаження штока оператор важелем 3 змінює положення плунжера розподільника 2 у зворотному напрямку, що призводить до нагнітання повітря в штокову порожнину 4 та виходу повітря із безштокової порожнини 5. Перекриття потоку стиснутого повітря забезпечують регулювальним органом (запірним пристроєм). Величину тиску стиснутого повітря в елементах системи контролюють установленими манометрами.

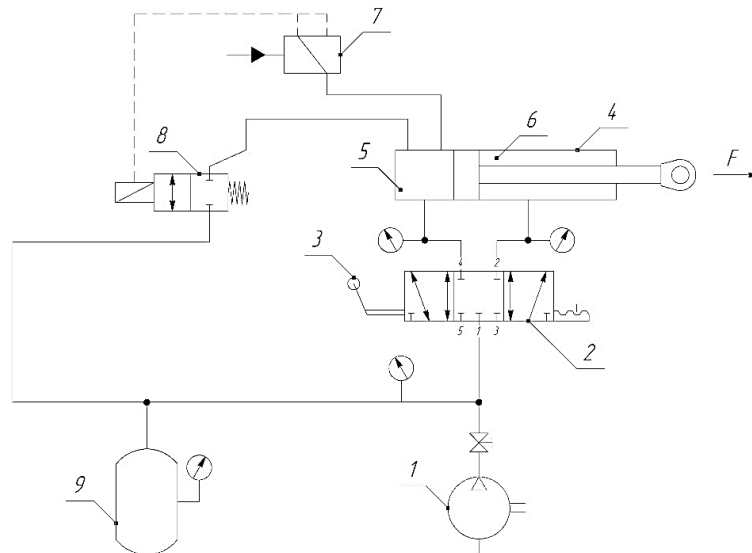


Рис. 1. Схема керування роботою пневматичного компенсатора

Застосування газогідравлічних компенсаторів, порівняно з іншими компенсаторами, дає змогу змінювати натяг тримальних (тягових) конструкційних елементів у вузьких межах, забезпечити зручність виконання монтажних робіт і мінімально можливі габарити пристроїв, що дозволяє використовувати звичайні анкерні опори (без їх підсилення чи збільшення розмірів). Однак конструкція газогідравлічних компенсаторів є складною і дорогою, будова газогідравлічних компенсаторів не є уніфікованою, їхні параметри значною мірою залежать від довжини траси (ділянки обслуговування), діапазону зміни робочої температури та інших параметрів.

З урахуванням вимог лісопромислового виробництва щодо міцності, жорсткості [5], герметичності, вагових та геометричних конструкційних параметрів, а також впливу коливань температури та атмосферного тиску раціональним є проектування та застосування у транспортувальному процесі механічних компенсаторів [20], які розміщують біля головних або тильових опор однопрольотних чи багатопрольотних підвісних доріг (залежно від їхнього типу та конструкції). Окрім лісопромислового виробництва, механічні пружинні та важільно-пружинні компенсатори широко використовують для компенсуючого анкерування проводів контактної підвіски, у тунелях, для фіксування тросів гнучких поперечок та жорстких поперечок тощо. Робочими елементами механічних компенсаторів зазвичай є комплекти пружин підвищеної жорсткості (наприклад, тарілчастих пружин), які можуть витримувати тривалі ударні навантаження. У процесі роботи зусилля від тримального каната передається через обвідний блок і шток на пакет пружин, які під час динамічного завантаження деформуються і переміщуються разом зі штоком у корпусі. Механічні компенсатори ефективно застосовувати в однопрольотних системах на коротких дистанціях із штучними опорами (оскільки в системах із природними опорами натяг саморегулюється завдяки податливості опор, а в багатопрольотних системах – завдяки переміщенню тримального каната з суміжних прольотів). Механічні компенсатори загалом є простими в експлуатації і не вимагають значних інвестицій для їх виготовлення, а також для модернізації підвісних доріг. Використання механічних компенсаторів переміщень тримальних канатів дозволяє стабілізувати їхній натяг у процесі роботи, зменшити динамічні навантаження, підвищити надійність експлуатації підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів незалежно від зміни температури зовнішнього середовища. Можливими недоліками використання механічних компенсаторів є потреба в ручному регулюванні ступеня стиснення пружинного пакета (наприклад, за допомогою гайок), а також значна маса та габарити пристрою, порівняно з аналогами.

Проаналізувавши основні експлуатаційні вимоги до будови компенсаторів, наявні обмеження щодо їх вартості, маси, габаритів, складності монтажу й використання, умов навколишнього середовища, а також врахувавши потребу у плавності ходу робочих органів і надійності роботи, зроблено висновок про доцільність проектування та застосування у транспортувальному процесі гідравлічних компенсаторів [17, 21, 22] з метою оснащення ними окремих типів підвісних доріг. У такому разі, врахувавши технічні вимоги міцності, жорсткості [5], герметичності, можливий вплив вітрового навантаження, зміни атмосферного тиску, температурних коливань [23], хімічний склад використовуваної рідини (гідравлічної оливи), наявні обмеження вагових та геометричних параметрів конструкції, а також галузеві рекомендації щодо технологічних параметрів процесу транспортування лісоматеріалів і кращі інженерні практики, основні конструкційні параметри проєктованих

гідравлічних компенсаторів визначатимуться показниками, зазначеними у табл. 1 (приклад розрахунку наведено для варіантів $d_k = d_{\min} = 14$ мм та $d_k = d_{\max} = 27$ мм).

Таблиця 1

Визначення технологічних зусиль та параметрів компенсаторів підвісних підйнятно-транспортувальних установок

№ з/п	Показник	Значення показника	
1	2	3	4
1	Діаметр тримального каната d_k , мм	14	27
2	Конструкція каната	канат сталевий подвійного звивання типу ЛК-Р, конструкції $6 \times 19 (1 + 6 + 6/6) + 1$ о. с.	
3	Розривне зусилля каната T_p , Н	131000	483500
4	Коефіцієнт запасу міцності каната n_k	2	
5	Номінальний тиск в циліндрі $p_{\text{ном}}$, Па	12×10^6	18×10^6
6	Максимальний тиск в циліндрі p_{max} , Па	15×10^6	22×10^6
7	Максимальний натяг каната T_k , Н: $T_k = T_p / n_k$	65500	241750
8	Мінімальний діаметр впадин різьби штока d_1 , м (підбираємо з урахуванням міцності різьбового кріплення поршня): $d_1 = \sqrt{4 \cdot T_k / \pi / [\sigma]}$	$22,8 \times 10^{-3}$	$43,9 \times 10^{-3}$
9	Допустимі напруження матеріалу штоку (сталі Ст20MnV6) на розтяг $[\sigma]$, Па	16×10^7	
10	Діаметр штока d , м	30×10^{-3}	50×10^{-3}
11	Метрична різьба штока (діаметр і крок різьби)	M25×1,5	M46×2
12	Бокове зусилля Q , Н	1000	2000
13	Мінімальний кут нахилу штока відносно горизонталі α , град	0	
14	Виліт штока l , м	0,08	0,12
15	Маса штока m , кг: $m = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot l \cdot \rho_{\text{ст}}$	0,44	1,84
16	Густина сталі (Ст20MnV6) $\rho_{\text{ст}}$, кг / м ³	7800	
17	Додаткове зусилля (від ваги штока) F , Н: $F = m \cdot 9,81 \cdot \cos \alpha$	4,32	18,03
18	Згинальний момент від бокового зусилля M_Q , Н / м: $M_Q = Q \cdot l$	80	240
19	Згинальний момент від маси штока M_F , Н / м: $M_F = F \cdot l / 2$	0,17	1,08
20	Момент опору січення штока W_x , м ³ : $W_x = \pi \cdot d^3 / 32$	27×10^{-7}	123×10^{-7}
21	Максимальне напруження у штоку $\sigma_{\text{ш}}$, Па: $\sigma_{\text{ш}} = (M_Q + M_F) / W_x$	$2,97 \times 10^7$	$1,96 \times 10^7$
22	Умова міцності на згин: $[\sigma] / \sigma_{\text{ш}} \geq 2$	$5,4 > 2$	$8,2 > 2$
23	Момент інерції штока I , м ⁴ : $I = \pi \cdot d^4 / 64$	$3,98 \times 10^{-8}$	$30,68 \times 10^{-8}$
24	Максимальний прогин штока від дії бокового зусилля f_Q , м: $f_Q = Q \cdot l^3 / 3 / I / E$	$20,82 \times 10^{-6}$	$18,23 \times 10^{-6}$
25	Модуль пружності сталі Ст20MnV6 E , Па	$2,06 \times 10^{11}$	
26	Максимальний прогин штока від власної ваги f_F , м: $f_F = F \cdot l^3 / 8 / I / E$	$0,03 \times 10^{-6}$	$0,06 \times 10^{-6}$
27	Сумарний максимальний прогин штока f , м: $f = f_Q + f_F$	$20,85 \times 10^{-6}$	$18,29 \times 10^{-6}$
28	Розрахунковий внутрішній діаметр компенсатора (діаметр гільзи) D , м: $D_p = \sqrt{4 \cdot T_k / \pi / p + d^2}$	$80,37 \times 10^{-3}$	$128,42 \times 10^{-3}$
29	Прийнятий внутрішній діаметр компенсатора D , м (діаметр гільзи)	85×10^{-3}	130×10^{-3}
30	Коефіцієнт запасу міцності гільзи n_r	2	
31	Границя текучості матеріалу гільзи SICAM $[\sigma_T]$, Па (для гарячекатаної / зварної / холоднотягнутої)	$3,55 \times 10^8 / 4,35 \times 10^8 / 6,5 \times 10^8$	
32	Мінімальна товщина стінки гільзи b , м (для гарячекатаної / зварної / холоднотягнутої труби): $b = 0,5 \cdot n_r \cdot p_{\text{max}} \cdot D / [\sigma_T]$	$3,59 \times 10^{-3} / 2,93 \times 10^{-3} / 1,96 \times 10^{-3}$	$8,06 \times 10^{-3} / 6,57 \times 10^{-3} / 4,4 \times 10^{-3}$

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
33	Монтажний зазор (щоб не пошкодити манжети) δ , мм	1,5	
34	Метрична різьба на кришці (діаметр D_r і крок різьби)	M90×2	M135×2
35	Матеріал гільзи	сталь 30	
36	Допустиме напруження на розтяг матеріалу гільзи $[\sigma_p]$, Па	115×10^6	
37	Стандартні (типові) розміри гільз	85 × 95, 85 × 100, 85 × 115, 85 × 120	130 × 145, 130 × 150, 130 × 160
38	Зовнішній (розрахунковий) діаметр гільзи D_z , м	95×10^{-3}	145×10^{-3}
39	Мінімальна площа січення гільзи (з найменшим зовнішнім діаметром), м ² : $A_r = \pi \cdot (D_z^2 - D_r^2) / 4$	$726,49 \times 10^{-6}$	$2199,12 \times 10^{-6}$
40	Зусилля зворотного ходу F, Н: $F_{зв} = p_{max} \cdot 0,10197 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 \cdot 9,81 \cdot \eta$	67085	224006
41	Коефіцієнт корисної дії η	0,9	
42	Розрахункові напруження розтягу в матеріалі гільзи: $\sigma_p = F_{зв} / A_r \leq [\sigma_p]$	$92 \times 10^6 < 115 \times 10^6$	$102 \times 10^6 < 115 \times 10^6$
43	Обрана конструкція (розміри) гільзи	85 × 95	130 × 145
44	Гідравлічна олива	HLp (DIN 51524, клас чистоти 16/13/10 ISO 4406, в'язкість VG46 ISO 3448)	
45	Максимальна швидкість руху поршня v_p , м/с	< 0,1	
46	Діапазон робочих температур (для гідравлічної оливи), °C	- 20...+ 60	

Будова проєктованого гідравлічного компенсатора та тривимірні моделі його основних деталей показані на рис. 2.

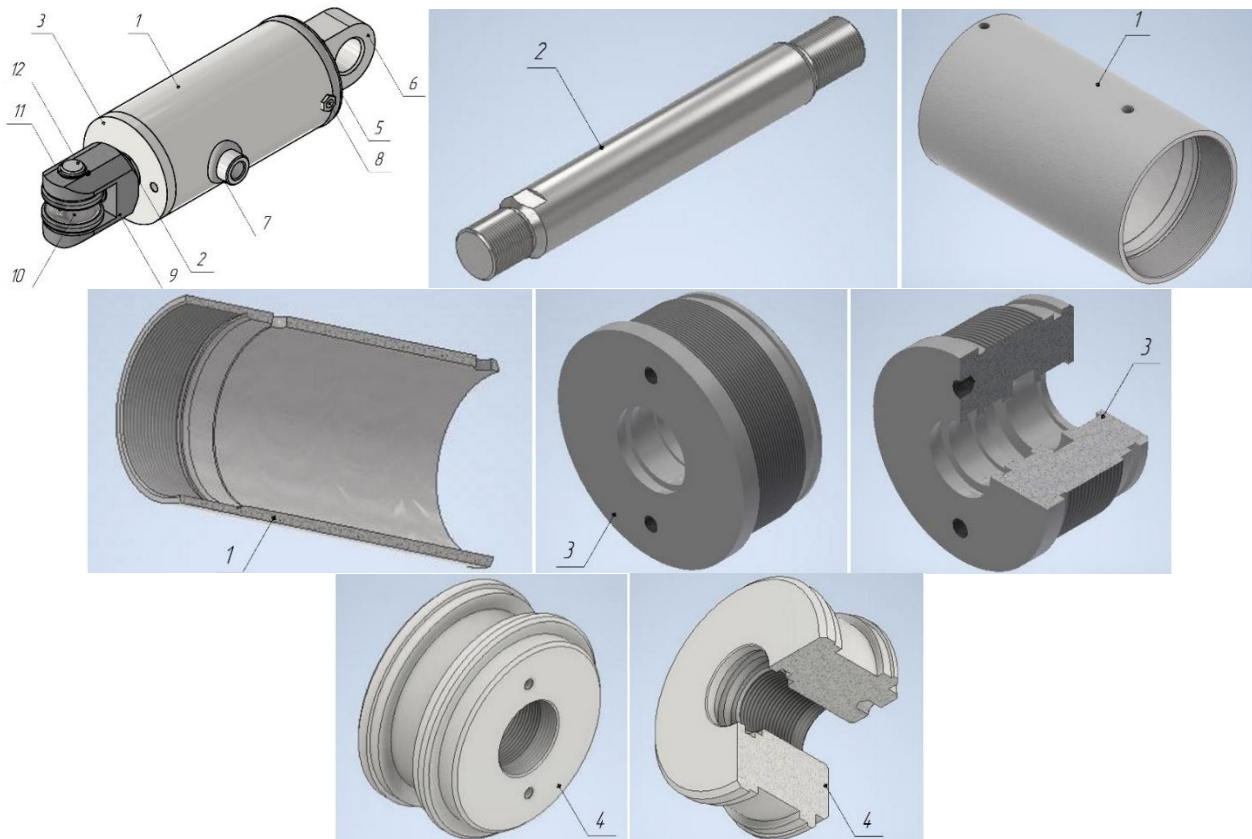


Рис. 2. Будова гідравлічного компенсатора:

1 – гільза, 2 – шток, 3 – кришка, 4 – поршень, 5 – дно, 6 – вухо заднє, 7 – борка, 8 – сапун G1/8", 9 – вилка передня, 10 – ролик, 11 – стопорне ексцентричне зовнішнє кільце А20Г (ДСТУ ГОСТ 13942:2008), 12 – вісь

Результати аналізу напружено-деформованого стану розробленої конструкції гідравлічного компенсатора із застосуванням програмного комплексу Autodesk Inventor й урахуванням особливостей контактної взаємодії деталей наведено на рис. 3.

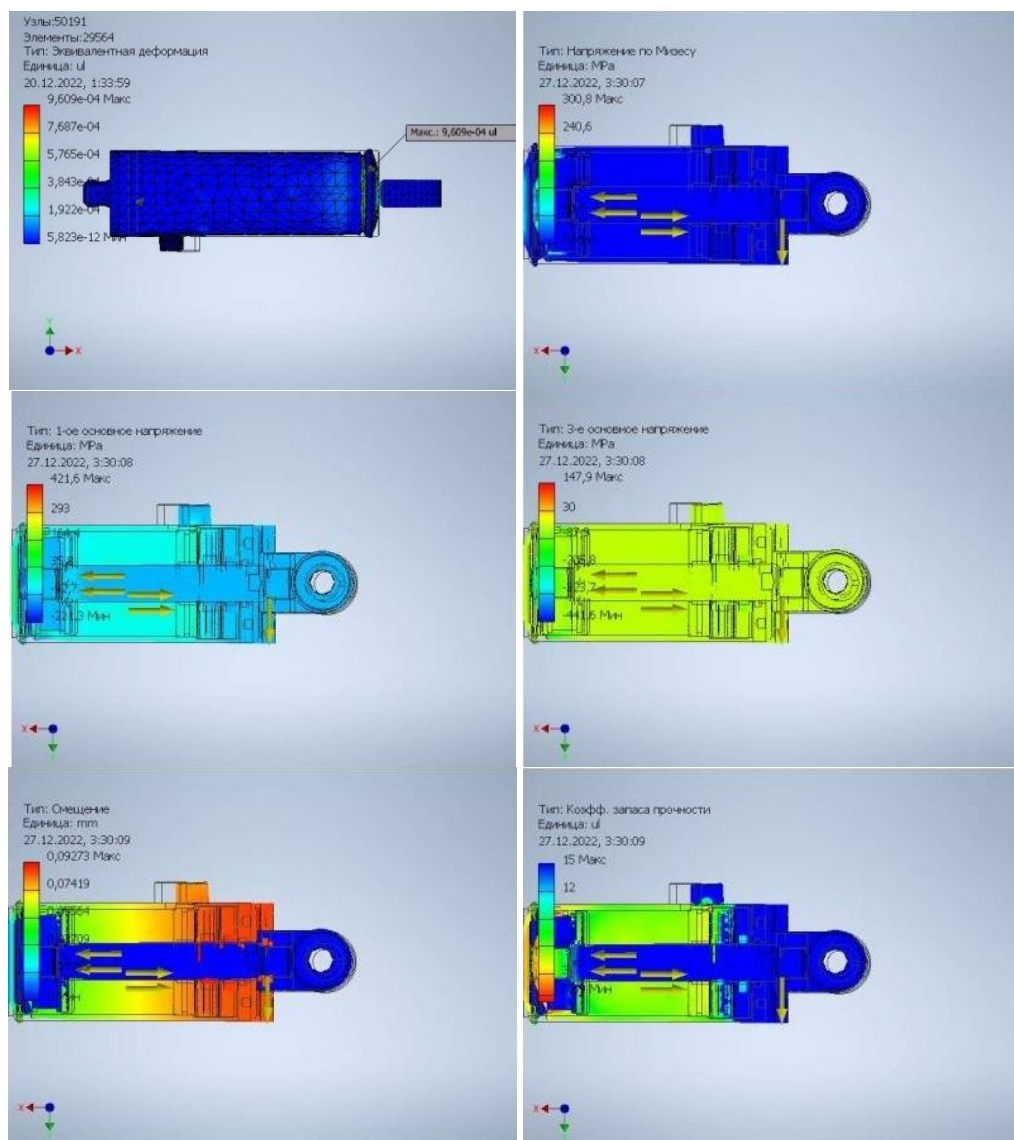


Рис. 3. Результати проведеного аналізу напружено-деформованого стану конструкцій гідравлічного компенсатора

З урахуванням особливостей технічної експлуатації підвісних канатних доріг і виробничих умов лісопромислового виробництва для керування робочими органами гідравлічних компенсаторів раціонально використовувати типові схеми [24], зокрема як для систем із постійним тиском.

Висновки

З метою підвищення надійності роботи канатної оснастки підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів (як окремих наявних зразків техніки, так і новітніх – нестационарних, змонтованих на базі трактора або високопрохідного автомобіля) запропоновано оснащувати їх компенсаторами переміщень тримальних канатів. Проаналізувавши низку прототипних пристроїв, які ефективно застосовують у суміжних галузях промисловості (за такими критеріями, як вартість, вага й габарити устаткування, плавність і надійність роботи, складність монтажу та експлуатації, залежність від умов навколишнього середовища тощо), зроблено висновок, що для умов лісопромислового виробництва раціональними можна вважати пневматичні, механічні та гідравлічні конструкції компенсаторів. Зважаючи на зазначене, виконано детальний розрахунок та проектування основних технічних елементів компенсатора, розроблено схему керування його робочим органом, із використанням програмного комплексу Autodesk Inventor проаналізовано напружено-деформований стан елементів-складників (з урахуванням особливостей контактної взаємодії деталей). Використання запропонованих

конструкції компенсаторів забезпечить надійну та безпечну роботу підвісних доріг для транспортування лісоматеріалів у різних рельєфно-кліматичних умовах і режимах експлуатації, мінімізує ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Запропоновані конструкції компенсаторів є відносно нескладними в обслуговуванні й не потребують значних інвестицій для їх виготовлення, а також проведення робіт з модернізації вже наявних зразків техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Birda M., Borz S. A. «A comparison between tractor based and skyline based mechanized systems for timber logging.» *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, Vol. 5(1), pp. 19–24. 2012. Available: https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_II/article/view/1428.
- [2] Рудько І. М. Потреба і передумови впровадження лісозаготівельних технологій з використанням канатних доріг лісопромислового призначення. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць*. Вип. 25.9. С. 233–239. 2015. doi: 10.15421/40250937.
- [3] Cavalli R. Prospects of research on cable logging in forest engineering community. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. 2012. Vol. 33(2), pp. 339–356. Available: https://crojfe.com/site/assets/files/3778/13_cavalli_339-356.pdf
- [4] Матіішин М. В., Мартинців М. П., Рудько І. М. Підвищення надійності канатних лісотранспортувальних систем. *Проблеми трибології: міжнародний науковий журнал*. 2003. № 1. С. 44–47. URL: https://www.researchgate.net/publication/360626440_Pidvisenna_nadijnosti_kanatnih_lisotransportovalnih_sistem
- [5] Мартинців М. П., Сологуб Б. В. Матіішин. М. В. Динаміка та надійність підвісних канатних систем. Львів, Україна: Вид-во НУ «Львівська політехніка». 2011. 188 с.
- [6] Мартинців М. П., Рудько І. М. Особливості багатокритеріальної оптимізації основних параметрів підвісних канатних лісотранспортних установок. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць*. Вип. 23. № 15. С. 108–115. 2013. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltu_2013_23.15_20
- [7] Мартинців М. П., Тисовський Л. О., Боратинський О. В., Рудько І. М. Аналіз роботи канатної лісотранспортної установки як складної системи. *Науковий вісник: збірник науково-технічних праць*. 2002. Вип. 12.8. С. 107–111. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2002/12_8/21.pdf
- [8] Турянський Р. І. Аналіз конструктивних особливостей монтажно-демонтажного обладнання підвісних канатних лісотранспортних систем і методів його розрахунку. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. № 23(17). С. 150–157. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_17/150_Tur.pdf
- [9] Marchi L., Grigolato S., Mogni O., Scotta R., Cavalli R., Montecchio L. State of the art on the use of trees as supports and anchors in forest operations. *Forests*, Vol. 9(8), pp. 1–17. 2018. doi: 10.3390/f9080467.
- [10] Тисовський Л. О., Рудько І. М. Моделювання роботи канатів підвісних транспортних установок. *Сучасні проблеми механіки: Всеукр. наук. конф. Львів, 2004*. С. 49–50.
- [11] Mogni O., Marchi L., Lyons C. K., Grigolato S., Cavalli R., Röser D. Skyline tensile forces in cable logging: Field observations vs. software calculations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 2021. Vol. 42(2), pp. 227–243. 2021. doi:10.5552/crojfe.2021.722.
- [12] Dupire S., Bourrier F., Berger F. Predicting load path and tensile forces during cable yarding operations on steep terrain. *Journal of Forest Research*, Vol. 21(1), pp. 1–14. 2016. doi: 10.1007/s10310-015-0503-4.
- [13] Рудько І. М., Барилляк В. В. Проектування компенсаторів для підвісних канатних підйально-транспортувальних установок. *Прикладні науково-технічні дослідження: матер. міжнар. наук.-практ. конф. Івано-Франківськ, 2017*, с. 47. doi: 10.5281/zenodo.7003894.
- [14] Rudko I., Horzov S., Bakay V., Gobela V. Design of compensating device for the cable logging system. *Scientific Collection InterConf: with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference Innovative Development in the Global Science*. Boston, 2022, pp. 433–438. Available: <https://archive.interconf.center/files/journals/3/issues/11/public/11-12-PB.pdf#page=434>.
- [15] Щербань В. Ю., Мурза Н. І., Кириченко А. М., Колиско О. З., Шолудько М. І. Компенсатор натягу: пат. Україна: D05B 47/00. № 117290 МПК (2017.01), 26.06.2017.
- [16] Кузьмінський В. П., Рудчик О. С. Компенсатор натягування кабеля: пат. Україна: B65H0/24, B65H77/00, B66D1/50. № 60560, 15.10.2003.
- [17] Hrabovsky L. Tensile forces in lift carrier ropes exerted by the fluid pressure. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2019. Vol. 13(3), pp. 31–37. doi:10.12913/22998624/110050.
- [18] Jian L, Yuan-Xiang L. «Multi-rope hoist steel rope tension on-line monitoring system. *National Conference on Information Technology and Computer Science (CITCS 2012)*, Lunzhou, 2012, pp. 229–232. Available: <https://www.atlantispress.com/article/3015.pdf>.
- [19] Параска Г. Б. Стабілізація натягу ниток основи на в'язальних машинах. Хмельницький: Редакційно-видавничий центр ХНУ, 2012, 275 с.
- [20] Барилляк В. В., Рудько І. М., Бичинюк І. В. Компенсатор натягу несучого каната лісотранспортної установки: пат. Україна: B61B 12/00. № 73489 МПК (2012.01), 25.09.2012.
- [21] Song Di, Xu G.-Y., Lei G.-Y., Zhang X.-G., Tian B.-L. Research on Dynamic Characteristics and Compensation of Wire Rope Tension and Load Measurement Based on Hydraulic Connection Device. *Shock and Vibration*, Vol. 2019, pp. 1–12 p. 2019. doi: 10.1155/2019/3809242.
- [22] Lei G., Xu G., Zhang X., Tian B. Study on dynamic characteristics and compensation of wire rope tension based on oil pressure sensor. *Advances in Mechanical Engineering*. Vol. 11(3), pp. 1–13. 2019. doi: 10.1177/1687814019836024.
- [23] Рудько І. М. Вплив зміни температури на силові та геометричні характеристики несучого каната підвісної транспортної установки. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки: науковий журнал*. 2006. № 6(87). С. 48–52. URL: http://lib.khnu.km.ua/pdf/visnyk_tup/2006/2006-6-1-T.pdf#page=48.
- [24] Timothy W. Dell. Hydraulic Systems for Mobile Equipment. 2nd Edition. Illinois, USA: The Goodheart-Willcox Company,

Інс., 2023, 860 р.

Рудько Ігор Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг, e-mail: ihor.rudko@nltu.edu.ua

Бакай Борис Ярославович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг, e-mail: bakay@nltu.edu.ua

Каратник Ігор Романович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг, e-mail: ihor.karatnyk@nltu.edu.ua

Гобела Володимир Миколайович – старший викладач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг, e-mail: v.gobela@nltu.edu.ua

Радяк Іван Васильович – аспірант кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг, e-mail: ivan.radiak@nltu.edu.ua

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів

**I. Rudko
B. Bakay
I. Karatnyk
V. Gobela
I. Radiak**

Displacement compensators for the skylines of timber transportation cableways

Ukrainian National Forestry University

Cableways for timber transportation are quite effective in terms of manufacturability, specific energy consumption, material capacity and the negative impact level on the environment in difficult natural operating conditions, compared to similar types of machines. Since non-stationary cableways are usually used in forestry production, which are characterized by a light construction with relatively small safety margins of cable equipment elements, then for this type of roads, the reliability and safety of the skylines work are important factors for their effective operation. In order to reduce the cost and duration of installation and dismantling operations, the skylines are usually rigidly fixed to trees, stumps or artificial supports. Such a cable fastening scheme is technically convenient, but it does not allow for constant tension of the skylines when the carriage with the load is moving along the span, under wind load, possible temperature fluctuations, icing of structural elements, and emergency situations. As a result, intensive changes in cable tension during their operation cause dynamic loads and vibrations in the cable rigging, as well as uneven and accelerated wear of the skylines, and a decrease in their durability. Under such conditions, in order to increase the reliability of the cable rigging of timber transportation cableways (both individual existing models of equipment and the latest ones), it is proposed to equip them with displacement compensators for the skylines. After analyzing a number of prototype devices that are effectively used in related industries, it was concluded that pneumatic, mechanical, and hydraulic compensator designs can be considered rational for timber production. Therefore, in view of the above, we performed a detailed calculation and designed the main technical elements of the compensating device, developed a control scheme for its working body, and analyzed its stress-strain state using the Autodesk Inventor software package. The use of rational compensator designs and appropriate control schemes for their working bodies will create the prerequisites for reliable and safe operation of timber transportation cableways in various operating modes and terrain and climatic conditions, and minimize the likelihood of emergencies.

Key words: compensating device, tension stabilization, skyline, cableway, timber transportation.

Rudko Ihor – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, e-mail: ihor.rudko@nltu.edu.ua

Bakay Borys – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Forest Engineering, e-mail: bakay@nltu.edu.ua

Karatnyk Ihor – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, e-mail: ihor.karatnyk@nltu.edu.ua

Gobela Volodymyr – Senior Lecturer of the Department of Forest Engineering, e-mail: v.gobela@nltu.edu.ua

Radiak Ivan – Post-Graduate Student of the Department of Forest Engineering, e-mail: ivan.radiak@nltu.edu.ua