

конкурентоспособности аграрной компании. Самые крупные агрохолдинги, как правило, имеют самые высокие показатели безотказности сельскохозяйственных машин.

Разработка более совершенных методов и правил в рамках обеспечения работоспособности сельскохозяйственных машин в процессе эксплуатации для аграрных компаний является актуальным вопросом.

Если вероятность предотвращения возникновения отказа по результатам внедрения мероприятий по снижению рисков возникновения отказа равна нулю, то мероприятия являются неэффективными, все события в этом случае реализуются. Если вероятность предотвращения возникновения отказа по результатам внедрения мероприятий по снижению рисков возникновения отказа стремится к единице, соответственно, мероприятия являются эффективными.

Ключевые слова: вероятность, потеря, эксплуатация, работоспособность, сельскохозяйственная машина

УДК 631.47.2

ВІБРОНАВАНТАЖЕНІСТЬ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН З ЛЮФТОМ

В. Г. Опалко, здобувач*
e-mail: opalko_viktoriya@ukr.net

Анотація. Безперервно зростаючі вимоги до технічного рівня сільськогосподарських машин пов'язані з необхідністю забезпечувати їх надійність, високу продуктивність, які визначаються такими експлуатаційними показниками їх деталей та вузлів як зносостійкість, контактна жорсткість, герметичність з'єднань.

Під час оцінювання різьбових з'єднань сільськогосподарської техніки визначається їх здатність максимально тривалий час забезпечувати щільність або герметичність стиків. Розкриття стику деталей визначається як показниками якості самих нарізних елементів (обробка поверхонь стику, число стиків, точність нарізі), так і особливостями експлуатації посівної техніки (корозія, забруднення, зношування заводських покриттів

*Науковий керівник – доктор технічних наук В. Д. Войтюк

© В. Г. Опалко, 2017

і т.д.). У більшості випадків вищезгадані ефекти можуть відбуватися в одному з'єднанні. Тому розуміння причин і механізмів феномена ослаблення різьбових з'єднань є важливим.

Для моделювання різьбових з'єднань застосовуються прості дискретні моделі, які дозволяють оцінити стан різьбових з'єднань на основі як теоретичних, так і експериментальних досліджень. Для подальшого дослідження цілісності різьбових з'єднань була створена його схема з зазором і розроблена математична модель. Досліджений вплив параметрів вібрації на динамічні властивості різьбових з'єднань сівалки.

Ключові слова: різьбові з'єднання, вібрація, дисипативні характеристиками

Постановка проблеми. В конструкції сільськогосподарських машин використовуються нерухомі роз'ємні різьбові з'єднання, які забезпечують точну фіксацію відносного положення деталей. Тому під час оцінювання різьбових з'єднань сільгосптехніки визначається їх здатність максимально тривалий час забезпечувати щільність або герметичність стиків за рахунок досягнення необхідного навантаження або ступеня затягування.

На практиці розкриття стику деталей залежить не тільки від значення сили затягування, а й від її збереження в процесі експлуатації. Останнє визначається як показниками якості самих нарізних елементів (обробка поверхонь стику, число стиків, точність нарізи), так і особливостями експлуатації посівної техніки (корозія, забруднення, зношування заводських покриттів і т.д.). Умови експлуатації сільськогосподарських машин обумовлені її мобільністю, виконанням технологічних функцій, станом поверхні поля. У більшості випадків вищезгадані ефекти можуть відбуватися в одному різьбових з'єднань. Це пов'язано зі складним характером процесів деформування елементів конструкцій, а також зі складністю полів напружень. Тому розуміння причин і механізмів феномена ослаблення різьбових з'єднань є важливим.

Спостереження за роботою сільськогосподарських машин переконливо доводять, що умови роботи різьбових з'єднань цих машин мають істотну специфіку, яку треба враховувати при їх проектуванні, виготовленні та експлуатації [1–5]. В реальних умовах роботи різьбових з'єднань машин їх експлуатаційні показники визначаються комплексом умов.

Аналіз останніх досліджень. Розрахунок різьбових з'єднань на сьогодні вивчений недостатньо. Якщо для розрахунку нерухомих з'єднань достатньо розглянути неоднорідний напружено-деформований стан елементів, то у випадку різьбових з'єднань

посівних машин, адекватним можна вважати лише розрахунок, виконаний з урахуванням взаємних зміщень робочих поверхонь деталей. Цей процес супроводжується складним перерозподілом об'ємних напружень та складними трибологічними явищами на контактних поверхнях. Для визначення механічних характеристик конструкцій з'єднань розроблено низку методів розрахунку на основі застосування дискретних, континуальних, та дискретно-континуальних розрахункових моделей. Розрахунок різьбових з'єднань розглядається у монографіях [6–9]. Значна увага дослідників зосереджена на розробці числових методів розв'язування таких задач. Це – методи скінчених елементів, методи граничних елементів, деякі комбіновані методи. Проте, постає питання раціонального добору рівня складності моделі. З математичної точки зору загальна тривимірна постановка задачі даного типу є достатньо складною. Труднощі її розв'язання значно посилюються у зв'язку зі складністю моделювання окремих трубчастих елементів. Це свідчить про те, що розроблення достатньо точних і, в той же час, раціональних математичних моделей напружено-деформованого стану різьбових з'єднань сівалки має не лише прикладне, а й теоретичне значення. У роботах [10, 11] подано огляд проблем міцності і довговічності різьбових з'єднань. Хоча відомо багато робіт по застосуванню методу кінцевих елементів для розрахунку різьбових з'єднань, аналітичні методи застосовуються надалі, наприклад [12–14], де розглядається механізм релаксації різьбових з'єднань.

Мета досліджень. Експлуатаційною характеристикою різьбових з'єднань сівалок буде його можливість зберігати цілісність під час роботи з різним динамічним навантаженням при певних параметрах, які забезпечуються його частотними, дисипативними характеристиками.

Результати досліджень. Основний показник, який забезпечується в умовах експлуатації різьбових з'єднань сільськогосподарських машин, – їх цілісність. На цілісність різьбових з'єднань впливає ряд факторів: фізико-механічні властивості, параметри нарізних деталей і з'єднаних ними частин конструкції, їх конструктивне і технологічне вирішення, характер навантаження. У більшості випадків вищезгадані ефекти можуть відбуватися в одному різьбовому з'єднанні. Тому розуміння причин і механізмів феномена ослаблення різьбових з'єднань є важливим. При цьому основний фактор це градієнт (характер зміни) вібрації.

Різьбові з'єднання, що застосовуються в сільгоспмашинобудуванні, різноманітні за своїми конструктивно-технічними формами. Різьбові з'єднання сільськогосподарської

техніки представляють собою системи, на які впливають як зовнішні фактори, наприклад поверхня поля, так і внутрішні динамічні впливи. Логіка розвитку підходу передбачає використання не тільки понять жорсткості (або пружності), опору, маси, але і поняття, що характеризує взаємодію між різьбовими з'єднаннями і поверхнею поля, між фрагментами системи. При більш загальному підході реальну механічну (коливальну) систему можна представити як багатовимірну систему з m входами і n виходами. Формалізоване уявлення про це може дати передаточна функція. Зручність такого підходу полягає в можливості формалізованої оцінки всього різноманіття простору рішень.

В теорії автоматичного управління для опису динамічних властивостей системи використовується поняття передаточної характеристики, яка представляє собою відношення вихідної величини до вхідної, представлених в операторній формі або у функції комплексної змінної

$$\Phi = \frac{y(t)}{z(t)}, \quad (1)$$

При цьому під вхідним впливом $x(t)$ розуміють прикладені до системи силові фактори (гармонічні, полігармонічні, імпульсні), а під вихідною реакцією $y(t)$ – зміни параметрів коливань системи. Параметри вхідного впливу $z(t)$ і вихідної реакції $y(t)$ функціонально пов'язані з допомогою Φ , який визначає характер трансформації вхідного впливу при його проходженні через систему.

В теорії управління відношення 1 зображують графічно (рис. 1).

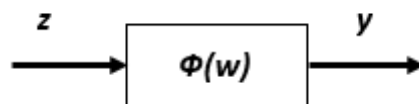


Рис. 1. Схема лінійної системи.

Будемо вважати, що система різьбового з'єднання (рис. 1) перемещується по гармонічному закону:

$$z = z(t) = C e^{ift}, \quad (2)$$

де: $C e^{ift}$ – комплексне кінематичне збурення; $e^{ift} = \cos ft + i \sin ft$ – рівняння Ейлера, яке описує гармонічні коливання; C – амплітуда.

Якщо вхідним сигналом системи є гармонічна функція з частотою w , то вона викликає вихідний гармонічний сигнал тієї ж частоти. Частинне рішення рівняння можна представити у вигляді

$$y = y(t) = A e^{i(ft+\beta)}, \quad (3)$$

Тоді

$$\Phi(f) = \frac{c+ifb}{c+ifb-mf^2}. \quad (4)$$

Як правило передаточна характеристика це комплексна функція, тому її представляють через модуль та аргумент. Модуль представляє собою відношення амплітуди гармонічної вихідної реакції системи до амплітуди вхідного гармонічного впливу. Це відношення залежить від частоти ω , тому воно називається амплітудною частотною характеристикою $\Phi(f)$ системи. Показник $\beta(f)$ є фазовим зсувом між вихідним і вхідним гармонічними процесами, і називається фазовою частотною характеристикою. Таким чином, комплексний коефіцієнт передачі лінійної системи можна записати у вигляді:

$$\Phi(f) = |\Phi(f)|e^{-i\beta(f)}, \quad (5)$$

де: $|\Phi(f)|$ – частотна характеристика; $\beta(f)$ – фазова характеристика.

Передаточна функція визначає динамічні властивості системи. Таким чином, експлуатаційні показники різьбових з'єднань машин визначаються їх динамічними властивостями. Хоча конструктивні рішення можуть бути різними, однак в кінцевому результаті нас цікавить робота різьбових з'єднань при збереженні щільності стику. Поява зазору (дефекту) призводить до зміни цих властивостей (а значить і $\Phi(f)$), що в свою чергу викликає відповідні зміни відгуку $y(t)$. Передаточна функція дозволяє крім двох зовнішніх змінних, які мають вхід і вихід системи, відобразити і всі внутрішні змінні системи, що особливо важливо при визначенні динамічних характеристик. Тоді експлуатаційною характеристикою різьбових з'єднань сільськогосподарських машин буде його можливість зберігати цілісність під час роботи з різним динамічним навантаженням при певних параметрах, які забезпечуються його частотними, дисипативними характеристиками.

Введемо наступний критерій втрати цілісності різьбових з'єднань:

$$Ц_{РЗ} = f(B(f), G_{РЗ}(f)). \quad (6)$$

де: B – характер зміни вібрації в околі різьбових з'єднань; $G_{РЗ}$ – конфігурація з'єднання (параметри різьбових з'єднань, конструктивне і технологічне вирішення елементів, що з'єднуються).

Для моделювання різьбових з'єднань застосовуються прості дискретні моделі [16, 17]. Такі моделі дозволяють оцінити стан різьбових з'єднань на основі як теоретичних, так і експериментальних досліджень. Для подальшого дослідження цілісності різьбових з'єднань була створена його схема з зазором (рис. 2) і розроблена математична модель.

Для того, щоб уникнути складного розрахунку послідовного з'єднання лінійного і нелінійного пружного елемента введемо деяку малу жорстку масу, розбивши пластину на малу початкову жорстку частину та подовгасту пружну (рис. 3).

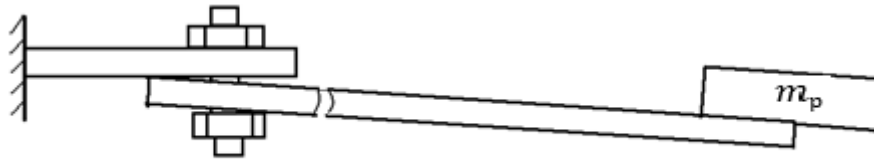


Рис. 2. Загальний вигляд різьбового з'єднання з зазором.

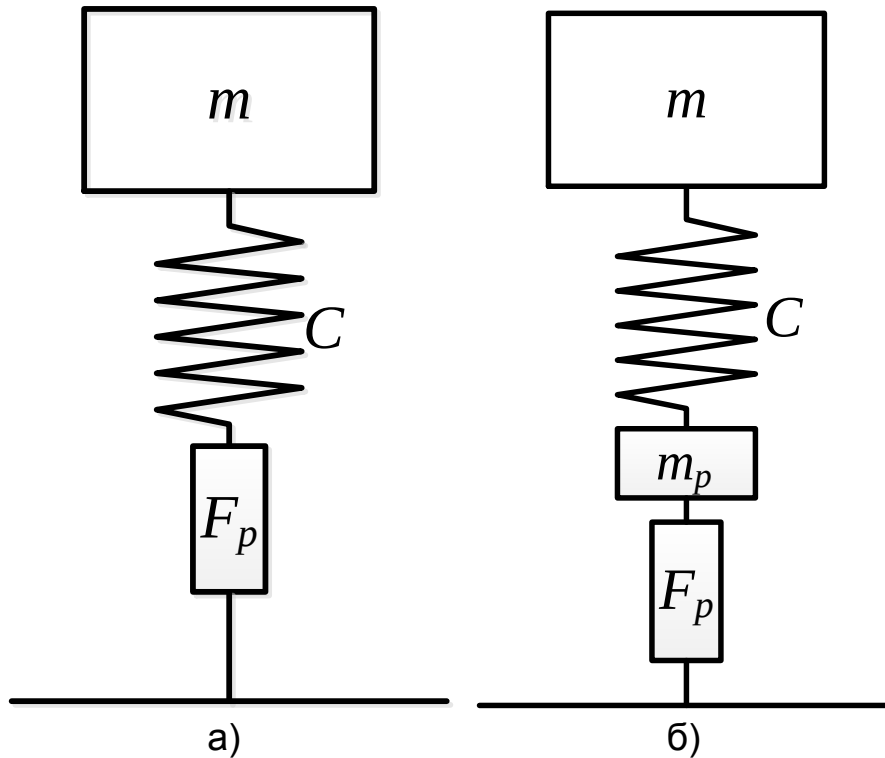


Рис. 3. Розрахункова схема різьбового з'єднання: а – одномасова; б – двомасова.

Рівняння для цієї розрахункової схеми різьбового з'єднання з зазором та додатковою масою будуть мати вигляд

$$\begin{cases} m\ddot{y}_1 + c(y_1 - y_0) + F_p(y_1 - y_2) = 0 \\ m_p\ddot{y}_2 - F_p(y_1 - y_2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

де: y_0 – кінематичне збурення; y_1 , y_2 – переміщення мас; c – жорсткість РЗ; F_p – нелінійна функція.

У цьому випадку, крім в'язкого тертя, розглядається також сухе тертя між поверхнею болта і поверхнею отвору при наявності зазору. Для опису сухого тертя будемо використовувати найбільш поширену модель Кулона, відповідно до якої сила тертя спрямована протилежно вектору швидкості і пропорційна з коефіцієнтом тертя силі нормального тиску.

$$F_p = -c_{пл}y - b_{пл}\dot{y}, \quad |y| > A \quad (8)$$

$$F_p = -c_v y - b_v \dot{y} - k \cdot \text{sign}\dot{y}, \quad |y| < A \quad (9)$$

де: $c_{пл}$ – жорсткість площадок опору болта; $b_{пл}$ – в'язке демпфування у площадці; c_v – жорсткість опору різьбового з'єднання при переміщенні; b_v – в'язке демпфування при переміщенні; k – коефіцієнт сухого тертя.

Для цієї моделі була складена програма на Фортрані і проведені обчислення. У процесі експерименту задавались такі параметри c, b, k , щоб досягнути максимального співпадіння теоретичних та експериментальних результатів. Нижче наведені віброграми з різним зазором у різьбовому з'єднанні

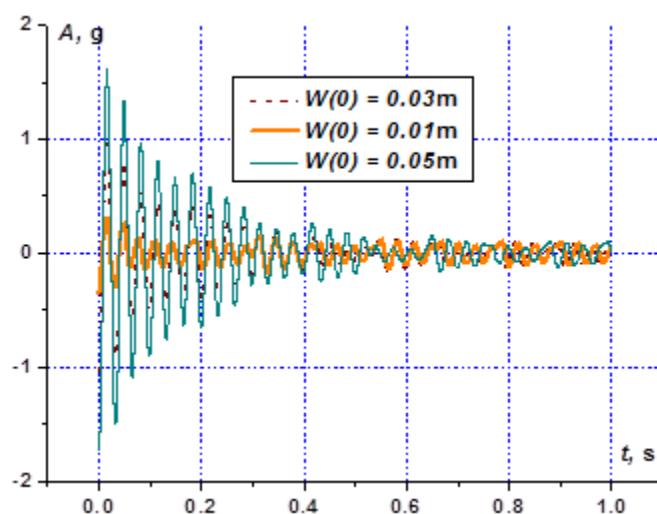


Рис. 4. Віброграми відхилення краю пластини при різних початкових даних.

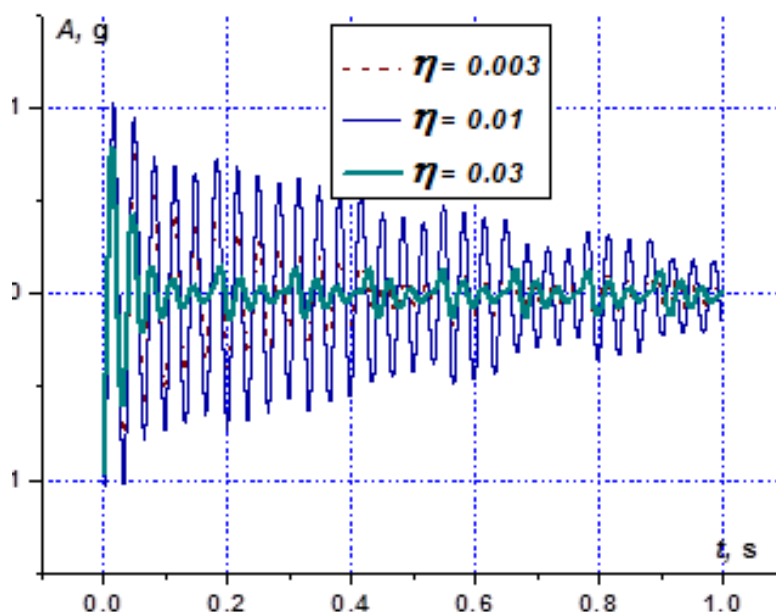


Рис. 5. Віброграми відхилення краю пластини при різних значення коефіцієнта демпфування.

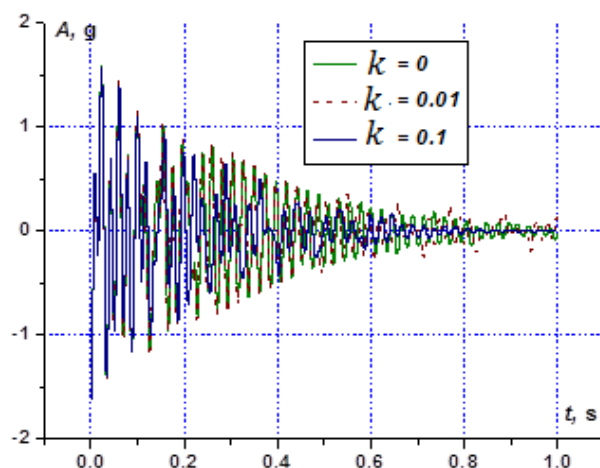


Рис. 6. Віброграми відхилення краю пластини при різних значення коефіцієнта сухого тертя.

Висновок. Розроблені нелінійні математичні моделі коливань послабленого різьбового з'єднання і побудовані графіки, які дозволили виявити характер коливального процесу при різних значеннях коефіцієнтів демпфування і сухого тертя.

Список літератури

1. Дівеєв Б. М., Николишин М. М., Опалко В. Г., Черчик Г. Т. Вібронавантаженість з'єднань елементів конструкцій колісних машин. Наукові нотатки. Луцьк. 2016. Вип. 55. С. 127—133.
2. Дівеєв Б. М., Коник І. В., Паращук Д. Л., Пелех Я. М. Дослідження розповсюдження вібрації та ударів від коліс до чутливого елемента машини. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2014. № 1. С. 47—53.
3. Вікович І. Дівеєв Б. Дискретно-континуальний метод розрахунку динаміки тракторного агрегату обприскувача з рідиною в ємкості. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та праладобудуванні. 2001. Вип 36. С. 47—53.
4. Stotsko Z. A., Diveyev B. M., Sokil B. I., Topilnytskyi V. G. Устройства устранения вибраций технологических машин. Часопис Кошіцького технічного університету «Manufacturing engineering», 2006. Cislo 2. Rocnik V. S. 52—53.
5. Bohdan Diveyev. Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science. 2016. Vol. 1, №2. P. 35—50.
6. Junker Kriterien für das selbsttätige Lösen von Verbindungselementen unter Vibration. Verbindungstechnik. 1969. 120 p.
7. Мочернюк Д. Ю. Исследование и расчет резьбовых соединений труб, применяемых в нефтедобывающей промышленности. Москва. Недра. 1970. 137 с.
8. Якушев А. И., Мустаев Р. Х., Мавлютов Р. Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений. Москва. Машиностроение. 1979. 356 с.
9. Бургер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. Москва. Машиностроение. 1990. 368 с.
10. Ibrahim R. A., Pettit C. L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners Journal of Sound and Vibration. 279 (2005). P. 858—936.

11. *Tao Wang. Gangbing Song, Shaopeng Liu, Yourong Li, and Han Xiao, Review of Bolted Connection Monitoring Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks Volume 2013, Article ID 871213, 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/871213>.*
12. *Tomotsugu Sakai. Mechanism for a Bolt and Nut Self Loosening under Repeated Bolt Axial Tensile Load Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. 2011. Vol. 5. No. 11. P. 627—639.*
13. *Ковтун А. В. Об изменении резонансных частот колебаний механических систем при наличии трения. Механіка і машинобудування. 2011. № 1. С. 47—53.*
14. *Курушин М. И., Курушин А. М., Барманов И. С. Распределение усилий по виткам и коэффициенты внешней переменной нагрузки в резьбовых соединениях в условиях вибрации изделий. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. №3(27). С. 47—53.*
15. *Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. Москва. Наука. 1967. 444 с.*
16. *Lee J. H., Singh R. Existence of super-harmonics in quarter-vehicle system responses with nonlinear inertia hydraulic track mount given sinusoidal force excitation. Journal of Sound and Vibration. 313 (2008). P. 367—374.*
17. *Gopala Rao L. V., Narayanan S. V. Preview control of random response of a half-car vehicle model traversing rough road. Journal of Sound and Vibration. 310 (2008). P. 352—365.*

References

1. *Diveev B. M., Nikolysyn M. M., Opalko V. G., Cherchik G. T. (2016). Vibro-loading of joints of elements of constructions of wheeled cars. Scientific notes. Interuniversity collection. Lutsk. Vol. 55. 127-133.*
2. *Diveev B. M., Konik I. V., Paraschuk D. L., Pelech Ya. M. (2014). Investigation of the propagation of vibration and impacts from the wheels to the sensitive element of the machine. Modern technologies in mechanical engineering and transport. No. 1, 47-53.*
3. *Vikovich I. Diveev B. (2001). Discrete-continual method of calculating the dynamics of a tractor unit of a sprayer with a liquid in a container. Ukr interspection Technical sciences Collection "Automation of Production Processes in Mechanical Engineering and Construction". Issue 36. 47-53.*
4. *Stotsko Z. A., Diveyev B. M., Sokil B. I., Topilnytsky V. G. (2006). Devices for eliminating the vibrations of technological machines. Chasopis Koshitskogo technical university «Manufacturing engineering». Cislo 2. Rocnik. 52-53.*
5. *Bohdan Diveyev. (2016). Impact and particle buffered vibration absorbers optimization and design. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Material Science. Vol. 1. №2. 35-50.*
6. *Junker Kriterien fur das selbsttatige Losen von Verbindungselementen unter Vibration. (1969). Verbindungstechnik. 120.*
7. *Mocherynu D. Yu. (1970). Investigation and calculation of threaded joints of pipes used in the oil-extracting industry. Moscow. Nedra. 137.*
8. *Yakushev A. I., Mustaev R. Kh., Mavlyutov R. R. (1979). Increase of strength and reliability of threaded joints. Moscow. Mashinostroyeniye. 356.*
9. *Birger I. A., Iosilevich G. B. (1990). Threaded and flanged connections. Moscow. Mashinostroyeniye. 368.*
10. *Ibrahim R. A., Pettit C. L. (2005). Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners Journal of Sound and Vibration. 279. 858-936.*

11. Tao Wang, Gangbing Song, Shaopeng Liu, Yourong Li, and Han Xiao. (2013). Review of Bolted Connection Monitoring Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks Volume. Article ID 871213. 8 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/871213>.
12. Tomotsugu Sakai. (2011). Mechanism for a Bolt and Nut Self Loosening under Repeated Bolt Axial Tensile Load Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. Vol. 5. No. 11. 627-639.
13. Kovtun A. V. (2011). Changes in the resonance frequencies of oscillations of mechanical systems in presence of friction Mechanics and machine building. № 1. 47-53.
14. Kurushin M. I., Kurushin A. M., Barmanov I. S. (2011). Distribution of forces by turns and coefficients of external variable load in threaded joints in the conditions of vibration of products, Bulletin of Samara State Aerospace University. №3(27). 47-53.
15. Timoshenko S. P. (1967). Fluctuations in Engineering. Moscow. Nauka. 444.
16. Lee J. H., Singh R. (2008). Existence of super-harmonics in quarter-vehicle system responses with nonlinear inertia hydraulic track mount given sinusoidal force excitation. Journal of Sound and Vibration. 313. 367-374.
17. Gopala Rao L. V. V., Narayanan S. (2008). Preview control of random response of a half-car vehicle model traversing rough road. Journal of Sound and Vibration. 310. 352-365.

ВИБРОНАГРУЖЕННОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С ЛЮФТОМ

В. Г. Опалко

Аннотация. Непрерывно растущие требования к техническому уровню сельскохозяйственных машин связаны с необходимостью обеспечивать их надежность, высокую производительность, которые определяются такими эксплуатационными показателями их деталей и узлов как износостойкость, контактная жесткость, герметичность соединений.

При оценке резьбовых соединений сельскохозяйственной техники определяется их способность максимально длительное время обеспечивать плотность или герметичность стыков. Раскрытия стыка деталей определяется как показателями качества самих резьбовых элементов (обработка поверхностей стыка, число стыков, точность резьбы), так и особенностями эксплуатации посевной техники (коррозия, загрязнение, износ заводских покрытий и т.д.). В большинстве случаев вышеупомянутые эффекты могут происходить в одном соединении. Поэтому понимание причин и механизмов феномена ослабления резьбовых соединений важно.

Для моделирования резьбовых соединений применяются простые дискретные модели, которые позволяют оценить состояние резьбовых соединений на основе как теоретических, так и экспериментальных исследований. Для дальнейшего

исследования целостности резьбовых соединений была создана его схема с зазором и разработана математическая модель. Исследовано влияние параметров вибрации на динамические свойства резьбовых соединений сеялки.

Ключевые слова: *резьбовые соединения, вибрация, диссипативные характеристики*

LOADING OF THREADED JOINTS OF AGRICULTURAL MACHINES WITH BACKLASH

V. G. Opalko

Abstract. *Continuously growing requirements for the technical level of agricultural machines are associated with the need to ensure their reliability, high productivity, which are determined by such operational parameters of their parts and components as wear resistance, contact stiffness, tightness of joints.*

When assessing the threaded connections of agricultural machinery, it is determined that they are able to provide the tightness or tightness of joints for the longest possible time. The opening of the joint of the parts is determined both by the quality of the threaded elements themselves (processing of the joint surfaces, number of joints, thread accuracy), and the features of the operation of the seeding equipment (corrosion, contamination, deterioration of factory coatings, etc.). In most cases, the above effects can occur in one connection. Therefore, understanding the causes and mechanisms of the phenomenon of weakening threaded connections is important.

Simple discrete models are used to model threaded connections, which allow us to evaluate the state of threaded joints on the basis of both theoretical and experimental studies. To further investigate the integrity of the threaded joints, a scheme with a gap was created and a mathematical model was developed. The effect of the vibration parameters on the dynamic properties of the threaded joints of the seeder is investigated.

Key words: *threaded connections, vibration, dissipative characteristics*