

Научная статья

УДК 681.785.3-83-52

DOI 10.48012/1817-5457_2025_4_157-163

О РАЗРАБОТКЕ ПРИВОДА КООРДИНАТНОГО СТОЛА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯРИСКОПА

Дородов Павел Владимирович, Киселев Михаил Михайлович,
Гаврилов Роман Иванович[✉], Петров Виталий Анатольевич

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

romanfildef@gmail.com

Аннотация. Проектирование и изготовление современной сельхозтехники становится все более наукоемкой задачей. Необходимо разрабатывать новые методы и подходы к созданию конструкций с высокой эффективностью работы. Так, для проверки показателей надежности при разработке новых конструкций на этапе проектирования все чаще применяются методы физического моделирования. Они позволяют проводить ускоренные испытания отдельных узлов и технических систем не на прототипах, а на их моделях с применением методов теории подобия, что снижает стоимость проектирования изделий и временные затраты. Одним из методов моделирования является оптическое исследование напряженного состояния для обоснования прочностной надежности в сопряжениях деталей машин. Авторами рассматривается расчет и разработка элементов электропривода исполнительного механизма оптического модуля лазерного полярископа для исследования напряженного состояния на моделях сопряжений в различных деталях сельхозтехники. Основным узлом установки является оптико-механический прибор, который состоит из лазерного модуля, координатного стола, шаговых двигателей для поворота поляризатора и анализатора и фотоприемника. Расчет удерживающего момента, равного 0,054 Н·м, позволил подобрать шаговый двигатель NEMA 17 42НМ40-2004 для перемещения координатного стола лазерного модуля. Запас двигателя по динамической нагрузке превышает 5,9, что вполне достаточно для защиты от случайных торможений. Расчетная угловая скорость двигателя (30 рад/с) позволяет подобрать время, требуемое для перемещения на один шаг двигателя, частоту, подаваемую на двигатель, и количество импульсов для поворота на один оборот при разработке системы автоматического управления. Привод шагового двигателя может обеспечить высокую разрешающую способность прибора в местах различных концентраторов напряжений сложной формы моделей за счет дискретизации перемещения лазерного модуля величиной в 3 мкм.

Ключевые слова: автоматическое управление прибора, шаговый двигатель, лазерный полярископ, физическая модель, напряженное состояние.

Для цитирования: О разработке привода координатного стола для автоматического управления лазерного полярископа / П. В. Дородов, М. М. Киселев, Р. И. Гаврилов, В. А. Петров // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4(84). С. 157-163. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_157-163.

Актуальность. Проектирование и изготовление современной сельхозтехники становится все более наукоемкой задачей. Необходим поиск новых подходов к созданию конструкций с высокой эффективностью работы. В условиях роста спроса на отечественные сельхозмашины и оборудование необходимо найти новые пути их проектирования и конструирования. Эффективность производства новых образцов сельхозмашин характеризуется их: оптимизацией конструкции; быстрым созданием опытных образцов; сокращением рабочего времени при испытаниях; автоматизацией процессов контроля и управления. Эти показатели можно проверить и обосновать методами ускорен-

ных испытаний на физических моделях машин и отдельных элементов конструкций в лабораторных условиях. Нужно отметить, что разработка и применение современного лабораторного оборудования и приборов представляет собой сложную, наукоемкую техническую задачу. В настоящее время из-за санкционного давления зависимость от импорта научных приборов в Российской Федерации значительно выросла. Если в 2022 г. доля импортного научного оборудования на отечественном рынке составила 93 %, то сейчас зависимость возросла до неприемлемой величины.

Таким образом, обеспечение современными техническими средствами конструкторско-ис-

следовательских организаций является актуальной задачей.

На современном этапе развития сельхозмашиностроения физическое моделирование является неотъемлемой частью разработки новой или модернизации существующей техники. Так, имитационное моделирование позволяет проводить ускоренные испытания отдельных узлов и технических систем не на прототипах, а на их моделях с применением методов теории подобия, что позволяет снизить стоимость проектирования изделий и временные затраты [1, 3]. Кроме того, эти методы позволяют применять вариационные подходы при оптимизации конструкций и деталей машин.

Одним из методов моделирования является оптическое исследование напряженного состояния для прочностной надежности в сопряжениях деталей машин [1, 6]. Особенно важно знать распределение контактных напряжений, так как их концентрация и большой градиент может привести к потере несущей способности в виде развития трещин усталости или возникновения пластичных зон в материале [1, 3, 12].

На кафедре теоретической механики и сопротивления материалов Удмуртского ГАУ разработаны оптические приборы высокой точности для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в прозрачных моделях деталей сельскохозяйственной техники [1, 3]. На рисунке 1 приведен внешний вид лазерного полярископа ЛП-1.

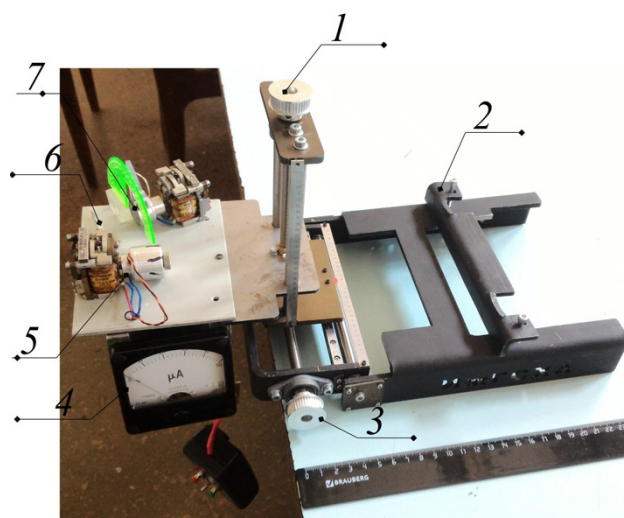


Рисунок 1 – Внешний вид лазерного полярископа ЛП-1:

- 1 – перемещение по вертикали; 2 – крепление к нагрузочному устройству;
- 3 – перемещение по горизонтали;
- 4 – микроамперметр; 5 – полупроводниковый лазер с поляризатором; 6 – зеркало;
- 7 – фотоприемник с анализатором

Основным недостатком данных приборов является трудоемкость проведения испытаний [3, 12]. Для того, чтобы ускорить процесс определения контактных напряжений, требуется автоматизировать установку, поэтому нужно осуществить подбор соответствующего оборудования [2, 14].

Целью исследования является расчет и подбор элементов автоматизированного привода исполнительных механизмов для перемещения установки по координатной плоскости.

Задачи: разработать принципиальную схему управления координатным столом лазерного полярископа ЛП-1, подобрать шаговые двигатели для координатного стола по их техническим характеристикам и эмпирическим данным.

Научной новизной работы является оптимизация конструкции лазерного полярископа, позволяющая обеспечить автоматический контроль и управление прибором с высокой точностью определения контактных напряжений при имитационных испытаниях проектируемых узлов и деталей сельхозмашин.

Практическая значимость исследований заключается в том, что разработанная система автоматического управления полярископа позволяет повысить производительность проектных работ более чем в 3 раза, при этом максимально исключаются системные ошибки при выполнении экспериментов.

Оборудование и методы исследования. При определении механических напряжений в прозрачных моделях деталей сельскохозяйственной техники используется лабораторный лазерный полярископ ЛП-1, для которого методика исследований представлена в [1, 3, 6].

Основным узлом лабораторной установки является оптико-механический прибор, который состоит из лазерного модуля, координатного стола, шаговых двигателей для поворота поляризатора и анализатора, фотоприемника, блока контроля и управления. Особенностью прибора является то, что фотоприемник регистрирует показания луча лазера, не проходящего через прозрачную модель, а отраженного от ее поверхности, который составляет лишь 8 % интенсивности излучения. Данное техническое решение позволяет расширить возможности установки по исследованию напряженного состояния в моделях сложной геометрической формы, однако требует разработки блока контроля регистрации входного сигнала и его оцифровки.

Результаты исследования. Система автоматического управления включает в себя контроль перемещения координатного устройства

в плоскости модели детали. На рисунке 2 приведена принципиальная схема автоматического управления координатного стола лазерного полярископа ЛП-1.

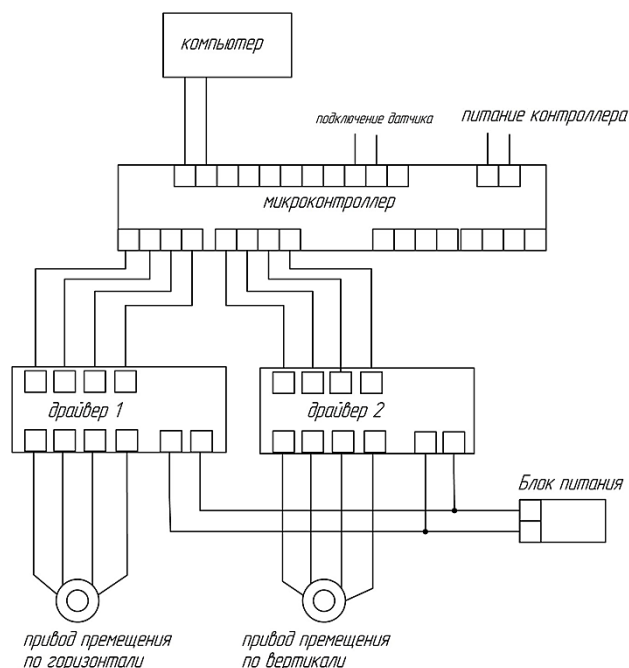


Рисунок 2 – Принципиальная схема автоматического управления приводами координатного стола установки ЛП-1

Для перемещения установки в координатной плоскости необходимо подобрать приводы исполнительных механизмов [4, 7]. В качестве приводов используются шаговые двигатели. Эти двигатели имеют ряд преимуществ: простота конструкции, малые габариты, точность перемещения при малых динамических нагрузках [9–11]. При выборе шаговых двигателей важно обратить внимание на их технические и геометрические параметры. Их рабочие характеристики определяются по следующим показателям: углу шага, фазе тока, крутящему моменту, сопротивлению обмотки [13, 15, 16].

Для перемещения координатного стола по горизонтали и вертикали понадобятся два шаговых двигателя, которые можно подобрать по крутящему моменту M_y (моменту удержания):

$$M_y = F \cdot l, \quad (1)$$

где F – усилие, необходимое на поворот вала двигателя, которое определяли цифровым динамометром на экспериментальной установке, показанной на рисунках 3 и 4; l – плечо (радиус шкива).

Измерения показали, что $F = 4,3$ Н, $l = 12,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда $M_y = 4,3 \cdot 0,0125 = 0,054$ Н · м.

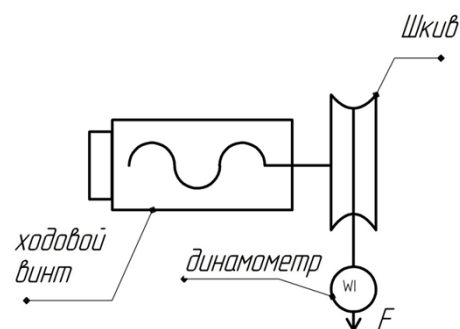


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки для определения момента удержания

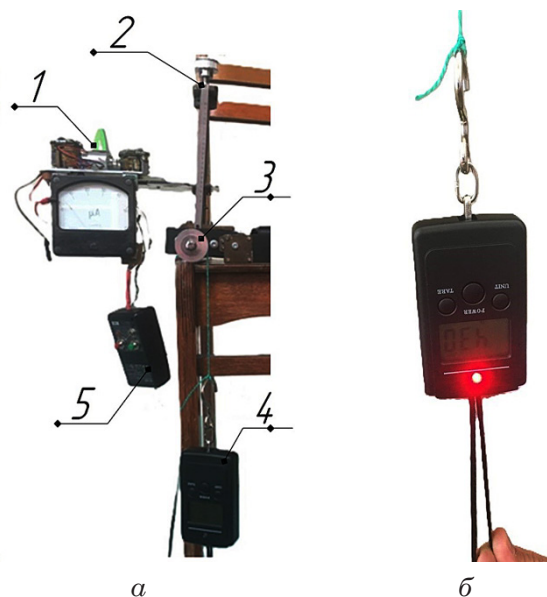


Рисунок 4 – Стенд для определения момента удержания:

- а) внешний вид экспериментального стенда;
б) показания динамометра;
1 – лазерный полярископ; 2 – координатный стол; 3 – шкив; 4 – динамометр;
5 – пульт управления

По расчетам выбираем шаговый двигатель NEMA 17 42NM40-2004 со следующими характеристиками [11]: число фаз – 2; угловой шаг – $0,9^\circ$; ток – 2 А; сопротивление фазы – 1,2 Ом; индуктивность фазы – 2,8 мГн; момент удержания – 0,32 Н · м.

На рисунке 5 показаны внешний вид и габаритные размеры шагового двигателя NEMA 17 42NM40-2004.

Динамический коэффициент запаса равен:

$$K_{дв} = \frac{M_{у.дв.}}{M_y} = \frac{0,32}{0,054} \approx 6.$$

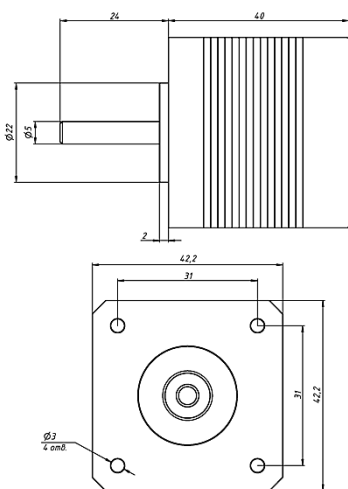
Такого запаса по динамической нагрузке вполне достаточно для защиты от случайных торможений двигателя.

Для работы шагового двигателя в необходимом режиме к нему подключают источник пита-

ния и устройство, подающее управляющий сигнал (драйвер).



а



б

Рисунок 5 – Шаговый двигатель NEMA 17 42NM40-2004:

а) внешний вид; б) монтажная схема с габаритными размерами

Оптимальное напряжение для работы шагового двигателя с высоким моментом рассчитывается по следующей эмпирической формуле [3, 7, 9]:

$$U = 32 \cdot \sqrt{L}, \quad (2)$$

где L – индуктивность обмотки, мГн. Для шагового двигателя NEMA 17 42NM40-2004 U составит 53,5 В.

Угловая скорость связана с моментом следующим выражением:

$$M_y = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega}, \quad (3)$$

где $P_{\text{дв}}$ – мощность двигателя, Вт.

Мощность одной фазы:

$$P_{\text{ф}} = I^2 \cdot R = 2^2 \cdot 1,2 = 4,8 \text{ Вт},$$

где I – ток, А; R – сопротивление одной фазы, Ом.

Так как данный шаговый двигатель является двухфазным, мощность увеличиваем в два раза. Тогда получаем угловую скорость:

$$\omega = \frac{2 \cdot P_{\text{дв}}}{M_y} = \frac{9,6}{0,32} = 30 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Линейное перемещение за один шаг двигателя составляет 3,1 мкм, что обеспечивает высокую разрешающую способность прибора в зонах с большим градиентом деформаций возле различных концентраторов напряжений модели (угловые элементы, вырезы, отверстия, переходные сечения с малыми радиусами кривизны и др.).

Разработанная схема автоматического управления координатным устройством может быть использована при создании других лабораторных установок, требующих точного позиционирования: системы точечного полива растений и облучения биологических объектов, гравировальные станки с ЧПУ, станки лазерной резки с ЧПУ, 3D-принтеры, и др.

Выводы:

1. Разработанная схема автоматического управления координатным устройством позволяет повысить эффективность физического моделирования за счет получения надежных результатов регистрации экспериментальных данных при ускоренных испытаниях. Имитационное моделирование сокращается более чем в 3 раза.

2. Расчет удерживающего момента, равного 0,054 Н · м, позволил подобрать шаговый двигатель NEMA 17 42NM40-2004 для перемещения координатного стола лазерного модуля.

3. Запас двигателя по динамической нагрузке превышает 5,9, что вполне достаточно для защиты от случайных торможений.

4. Расчетная угловая скорость двигателя (30 рад/с) позволяет подобрать время, требуемое для перемещения на один шаг двигателя, частоту управляющих импульсов, подаваемых на двигатель, количество шагов для поворота на один оборот в предлагаемой системе автоматического управления, при этом дискретизация перемещения лазерного модуля составляет 3 мкм, что обеспечивает высокую разрешающую способность прибора в зонах модели с большим градиентом деформаций.

Список источников

1. Дородов П. В. Повышение надежности сельскохозяйственных машин путем оптимизации формы их деталей: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2015. 327 с. EDN ZGDAUP.

2. Душин С. Е., Красов А. В., Кузьмин Н. Н. Моделирование систем управления / Под ред. С. Е. Душина. Москва: Студент, 2012. 348 с.

3. Киселев М. М. Разработка установки для определения главных напряжений с повышенным пространственным разрешением в плоских прозрачных изделиях: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2010. 137 с. EDN QFBTOJ.

4. Клевакин В. В., Хомченко В. Г. К расчету параметров шагового привода // Динамика систем, механизмов и машин. 2009. № 2. С. 241-244. EDN VQARMD.

5. Климов Ю. М. Прикладная лазерная оптика. Москва: Машиностроение, 1985. 128 с.

6. Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений; Пер. с англ. под ред. проф. Н. М. Беляева, проф. А. П. Афанасьева с доп. статьей Д. К. Кнолля. Ленинград; Москва: Онти. Глав. ред. общетехн. лит-ры, 1936 (Л.: тип. им. Евг. Соколовой). Переплет, 634 с.

7. Кривохатко Е. А., Хомченко В. Г. Расчет параметров шагового двигателя исполнительного механизма цикловых машин-автоматов при обеспечении заданного оптимального по скорости закона движения рабочего органа // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: материалы VI Междунар. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых, Омск, 17 мая 2016 г. Омск: Омский ГАУ, 2016. С. 118-122. EDN WXNTHZ.

8. Лыкова Е. А. Выбор режима работы шагового двигателя в станках числового программного управления // Современные инновации, системы и технологии. 2024. Т. 4, № 3. С. 401-407. DOI 10.47813/2782-2818-2024-4-3-0401-0407. EDN ZTURQS.

9. Макаров Д. Е., Алексеев И. С. Система управления шаговым двигателем на базе Arduino UNO // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. Междунар. науч. конф., Томск, 29 апр. – 02 мая 2014 г. Том Часть 1. Томск: Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т, 2014. С. 56-58. EDN TJJPRP.

10. Математическая модель шагового двигателя для системы управления привода 3D-принтера / М. А. Анкуда [и др.] // НЕФТЕХИМИЯ-2018: материалы I Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и по нефтегазопереработке. В 2 ч., Минск, 27–30 нояб. 2018 г. Том Часть 1. Минск: Белорус. гос. технол. ун-т, 2018. С. 218-222. EDN YPKCUP.

11. Мельниченко В. О. Контроль шагового двигателя с помощью драйвера шагового двигателя и платы Arduino // Теоретические и прикладные аспекты естественно-научного образования в эпоху цифровизации: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 11–12 апр. 2024 г. Брянск: Брянск. гос. ун-т им. акад. И. Г. Петровского, 2024. С. 83-88. EDN ZQPKZR.

12. Об оптических методах исследования напряженно-деформированного состояния / П. В. Дородов [и др.] // Современные тенденции технологического развития АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посв. Десятилетию науки и технологий

и 300-летию РАН, Ижевск, 24–26 февр. 2025 г. Ижевск: УдГАУ, 2025. С. 316-321. EDN HRMPHU.

13. Со Л. М. Исследование и разработка моделей и алгоритмов старт-стопных режимов автоматических устройств управления шаговыми электроприводами: дис. ... канд. техн. наук / Со Лин Маунг. Москва, 2015. 170 с. EDN VCYAGW.

14. Умнов В. П. Автоматизированный многолучевой лазерный комплекс с управляемым телескопом // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 4. С. 82-89. DOI 10.17513/snt.40369. EDN XJSUPA.

15. Управление шаговым двигателем при помощи акселерометра / О. Е. Новикова [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 2-й Междунар. науч.-практ. конф., Донецк, 25–26 мая 2016 г. Донецк: Донецк. нац. техн. ун-т, 2016. Т. 2. С. 154-159. EDN JOLUXY.

16. Черкасова В. А., Брикова О. И. Разработка автоматической системы управления линейным приводом для задач микропозиционирования лазерного оборудования // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах им. А. А. Бавилова. 2018. Т. 1. С. 30-33. EDN LUFYHL.

References

1. Dorodov P. V. Povy'shenie nadezhnosti sel'skoxozyajstvenny'x mashin putem optimizacii formy' ix detalej: dis. ... d-ra texn. nauk. Moskva, 2015. 327 s. EDN ZGDAUP.

2. Dushin S. E., Krasov A. V., Kuz'min N. N. Modelirovanie sistem upravleniya / Pod red. S. E. Dushina. Moskva: Student, 2012. 348 s.

3. Kiselev M. M. Razrabotka ustanovki dlya opredeleniya glavny'x napryazhenij s povыshenny'm prostranstvenny'm razresheniem v ploskix prozrachny'x izdeliyax: dis. ... kand. texn. nauk. Izhevsk, 2010. 137 s. EDN QFBTOJ.

4. Klevakin V. V., Xomchenko V. G. K raschetu parametrov shagovogo privoda // Dinamika sistem, mexanizmov i mashin. 2009. № 2. S. 241-244. EDN VQARMD.

5. Klimkov Yu. M. Prikladnaya lazernaya optika. Moskva: Mashinostroenie, 1985. 128 s.

6. Koker E., Fajlon L. Opticheskij metod issledovaniya napryazhenij; Per. s angl. pod red. prof. N. M. Belyaeva, prof. A. P. Afanas'eva s dop. stat'ej D. K. Knollya. Leningrad; Moskva: Onti. Glav. red. obshhetexn. lit-ry', 1936 (L.: tip. im. Evg. Sokolovoj). Pereplet, 634 s.

7. Krivoxat'ko E. A., Xomchenko V. G. Raschet parametrov shagovogo dvigatelya ispolnitel'nogo mexanizma ciklov'x mashin-avtomatov pri obespechenii zadannogo optimal'nogo po skorosti zakona dvizheniya rabochego organa // Avtomatizaciya, mexatronika, informacionny'e tehnologii: materialy VI Mezhdunar. nauch.-texn. internet-konf. molody'x ucheny'x, Omsk, 17 maya 2016 g. Omsk: Omskij GAU, 2016. S. 118-122. EDN WXNTHZ.

8. Ly'kova E. A. Vy'bor rezhima raboty shagovogo dvigatelya v stankax chislovogo programmno upravleniya // Sovremennyye innovacii, sistemy i tehnologii. 2024. Т. 4,

№ 3. S. 401-407. DOI 10.47813/2782-2818-2024-4-3-0401-0407. EDN ZTURQS.

9. Makarov D. E., Alekseev I. S. Sistema upravleniya shagovym dvigatelem na baze Arduino UNO // Informacionny'e tekhnologii v nauke, upravlenii, social'noj sfere i medicine: sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch. konf., Tomsk, 29 apr. – 02 maya 2014 g. Tom Chast' 1. Tomsk: Nacz. issled. Tomsk. politexn. un-t, 2014. S. 56-58. EDN TJJPRP.

10. Matematicheskaya model' shagovogo dvigatelya dlya sistemy upravleniya privoda 3D-printera / M. A. Ankuda [i dr.] // NEFTEXIMIYa-2018: materialy I Mezhdunar. nauch.-texn. foruma po xim. tekhnologiyam i po neftegazopererabotke. V 2 ch., Minsk, 27–30 noyab. 2018 g. Tom Chast' 1. Minsk: Belorus. gos. texnol. un-t, 2018. S. 218-222. EDN YPKCUP.

11. Mel'nichenko V. O. Kontrol' shagovogo dvigatelya s pomoshh'yu drajvera shagovogo dvigatelya i platy Arduino // Teoreticheskie i prikladny'e aspekty estestvenno-nauchnogo obrazovaniya v epoxu cifrovizacii: materialy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Bryansk, 11–12 apr. 2024 g. Bryansk: Bryansk. gos. un-t im. akad. I. G. Petrovskogo, 2024. S. 83-88. EDN ZQPKZR.

12. Ob opticheskix metodax issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya / P. V. Dorodov [i dr.] // Sovremennye tendencii tekhnologicheskogo razvitiya

APK: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. Desyatiletiju nauki i tekhnologii i 300-letiju RAN, Izhevsk, 24–26 fevr. 2025 g. Izhevsk: UdGAU, 2025. S. 316-321. EDN HRMPHU.

13. So L. M. Issledovanie i razrabotka modelej i algoritmov start-stopnyx rezhimov avtomaticheskix ustroystv upravleniya shagovymi elektroprivodami: dis. ... kand. texn. nauk / So Lin Maung. Moskva, 2015. 170 s. EDN VCYAGW.

14. Umnov V. P. Avtomatizirovannyj mnogoluchevoj lazernyj kompleks s upravlyaemy'm teleskopom // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2025. № 4. S. 82-89. DOI 10.17513/snt.40369. EDN XJSUPA.

15. Upravlenie shagovym dvigatelem pri pomoshhi akselerometra / O. E. Novikova [i dr.] // Innovacionnye perspektivy Donbassa: materialy 2-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Doneczk, 25–26 maya 2016 g. Doneczk: Doneczk. nacz. texn. un-t, 2016. T. 2. S. 154-159. EDN JOLUXY.

16. Cherkasova V. A., Brikova O. I. Razrabotka avtomaticheskoy sistemy upravleniya linejnym privodom dlya zadach mikropozicionirovaniya lazernogo oborudovaniya // Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskix sistemax im. A. A. Vavilova. 2018. T. 1. S. 30-33. EDN LUFYHL.

Сведения об авторах:

П. В. Дородов, доктор технических наук, доцент, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>;

М. М. Киселев, кандидат технических наук, доцент;

Р. И. Гаврилов✉, старший преподаватель;

В. А. Петров, кандидат технических наук, доцент

Удмуртский ГАУ, 426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 9
romanfildef@gmail.com

Original article

ON THE DEVELOPMENT OF A COORDINATE TABLE DRIVE FOR AUTOMATIC CONTROL OF A LASER POLARISCOPE

Pavel V. Dorodov, Mikhail M. Kiselyov, Roman I. Gavrilov✉, Vitaliy A. Petrov

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

romanfildef@gmail.com

Abstract. The design and manufacture of modern agricultural machinery is becoming an increasingly science-intensive task. It is necessary to develop new methods and approaches to the creating structures with exceptional operational efficiency. For example, physical modeling techniques are becoming more widely employed to validate reliability indicators during the design phase of new structures. These methods allow for accelerated testing of individual components and technical systems using models based on principles of the similarity theory, which reduces the cost and time required for product design. One of the modeling methods is the optical study of the stress state to substantiate the strength reliability in the joints of machine parts. The article considers the calculation and development of the electric drive elements of the optical module actuator of the laser polariscope for studying the stress state on the models of joints in various parts of agricultural machinery. The main unit of the installation is the optical-mechanical device, which consists of a laser module, a coordinate table, stepper motors for rotating the polarizer, the analyzer, and a photodetector. The calculation of the holding torque, which is equal to 0.054 N·m, allowed us to select a NEMA 17 42 NM 40-2004 stepper motor for moving the coordinate table of the laser module. The dynamic load capacity of the motor exceeds 5.9, which is sufficient to protect it from accidental braking. The calculated angular velocity of the motor (30 rad/s) makes it possible to select the time required for one step of the motor, the frequency applied to the motor, and the number of pulses required for one rotation when developing an automatic control system.

The stepper motor drive can provide high resolution in areas with complex stress concentrations due to the 3 μm discretization of the laser module's movement.

Key words: automatic control of the device, stepper motor, laser polariscope, physical model, stress state.

For citation: Dorodov P. V., Kiselyov M. M., Gavrilov R. I., Petrov V. A. On the development of a coordinate table drive for automatic control of a laser polariscope. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 4 (84): 157-163. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_157-163.

Authors:

P. V. Dorodov, Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>;

M. M. Kiselyov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

R. I. Gavrilov[✉], Senior Lecturer;

V. A. Petrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

romanfildef@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 03.09.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025;

принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 03.09.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.

Научная статья

УДК 621.791.92:621.373.8

DOI 10.48012/1817-5457_2025_4_163-168

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Ипатов Алексей Геннадьевич[✉], Шмыков Сергей Николаевич

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

Ipatow.al@yandex.ru

Аннотация. У 48 % деталей машин предельный износ наступает при величине износа менее 0,1 мм. Традиционные технологические процессы восстановления обеспечивают толщину покрытия более 0,5 мм, что сказывается на его себестоимости за счет необходимости дорогостоящей механической обработки. Свойства восстановительных покрытий ограничены по причине использования в качестве присадочных материалов стандартных металлических сплавов. Целью исследований является реализация комбинированной технологии наращивания восстановительного покрытия с использованием технологии традиционной лазерной наплавки, с последующим упрочнением восстановительного покрытия керамическим слоем. Комбинированная технология на первом этапе предполагает нанесение на изношенную поверхность восстановительного слоя методом традиционной лазерной наплавки присадочной проволоки Нп-55. Второй этап подразумевает упрочнение восстановительного слоя высокоскоростной лазерной наплавкой керамической композиции на основе карбонитрида бора. Для формирования восстановительного слоя применяется импульсное лазерное излучение, генерируемое лазерной установкой BULAT LRS-300. Наплавка производится в среде защитного газа аргона. Оценку качества покрытия произвели методом оптического анализа с использованием инвертированного микроскопа Олутрис GX53. Анализ восстановительного покрытия выявил, что толщина восстановительного покрытия составляет 150 мкм, толщина упрочненного слоя – 8 мкм. Восстановительное покрытие обладает высокой плотностью и удовлетворительной адгезией с поверхностью детали и керамическим слоем.

Ключевые слова: восстановительное покрытие, высокоскоростная лазерная наплавка, керамическая композиция, комбинированная технология.

Для цитирования: Ипатов А. Г., Шмыков С. Н. Технология нанесения тонких восстановительных покрытий методом лазерной наплавки // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4 (84). С. 163-168. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_163-168.