Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi, O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrida 17.11.2022 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan. Guvohnoma № DGU 19381.

Avtoreferat “Informatika va energetika muammolari” O‘zbekiston ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN’IY INTELLEKTNI RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M RAQAMLI ILMIY KENGASH

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN’IY INTELLEKTNI RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI

AZIMOV MAXMUDJON BAXTIYOROVICH

G‘ILDIRAKLI TRAKTORLARNI SINASH JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH VA OPTIMAL BOSHQARISH

05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PHD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent – 2026

UO‘K 62-5:681:5

Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori(PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) on Technical Sciences

Azimov Maxmudjon Baxtiyorovich
G‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini modellashtirish va optimal boshqarish……3

Азимов Махмуджон Бахтиёрович
Моделирование и оптимальное управление процессами испытаний колесных тракторов.....23

Azimov Makhmudjon Bakhtiyorovich
Modeling and optimal control of wheeled tractor test processes...…….43

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works……..46

10. Azimov M. B. To‘rt g‘ildirakli traktorni yuqoriga ko‘tarilishidagi vertikal harakatini modellashtirish va optimal boshqarish // “Informatika va energetika muammolari” O‘zbekiston jurnali. Toshkent, 2025. №4. 15-25 bet.

II bo‘lim (II часть; II Part)

1. Бабашев К.А., Азимов М.Б. Математическое моделирование и управление процессами испытания колесных машин // Материалы XVIII Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии». Том 5. –Воронеж, Издательство «Научно-исследовательские публикации», ООО «Вэлборн». 2018.–С.108-113.

2. Бабашев К.А., Шодиев Ж.Ғ., Азимов М.Б. Автомобил рессораларининг ишлаш жараёнини математик моделлаштириш ҳамда материал-энергетик ҳолатларини баҳолаш // Ўзбекистон журнали «Информатика ва энергетика муаммолари». – Ташкент, 2020. - №1. – С. 19-31.

3. Onorboev B.O., Sulyukova L.F., Azimov M.B. Modeling and research of the controllability of wheeled tractors / Сборник докладов республиканской научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы применения цифровых технологий и искусственного интеллекта в управлении. Ташкент, 6-7 сентября 2021г. С.172-181.

4. Shodiev J., Azimov M. Mathematical modeling of truck movement in rough road conditions of agricultural area // Earth and Environmental Science Earth and 1076 (2022) 012003. doi:10.1088/1755-1315/1076/1/012003.

5. Onorboev B.O., Azimov M.B. G‘ildirakli traktorlarni sinash stendining optimal boshqarish algoritmini ishlab chiqish / xalqaro ilmiy-texnik ma’ruzalar to'plami konferensiyalar, Buxoro, 2024 yil 27-28 sentyabr. 2-T.154-161bet.

6. Onorboyev B.O., Azimov B.M. To‘rt g‘ildirakli traktorni yuqoriga ko‘tarilishidagi gorizontal harakatini modellashtirish va optimal boshqarish / Respublika ilmiy-texnik konferensiyalari ma’ruzalari to‘plami. Toshkent shahri, 2025 yil 5-6 sentabr. 236-245 bet.

7. Azimov B.M., Ro‘ziqulov A.R., Akhmedov Sh. A., Azimov M. B. Turli xil harakat sharoitida 4 g‘ildirakli mashina va traktorlarni gorizontal va vertikal tebranishlarining optimal parametrlarini hisoblashning dasturlar majmuasi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi, O‘zR Dasturiy mahsulotlar davlat reyisterida 09.12.2019-yilda ro‘yxatdan o‘tgan. Guvohnoma № DGU 07307.

8. Shodiyev J.G‘., Ubaydullayev O‘., Babashev Q.A. Sherqobilov S.M., Azimov M.B. Avtomobillarning tebranish parametrlarini tadqiq qilish qurilmasining dasturiy ta’minoti // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi, O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reestrida 11.04.2022 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan. Guvohnoma № DGU 15495.]

9. Shodiyev J.G‘., Yuldashev E., Babashev Q.A., Sherqobilov S.M., Azimov M.B. va boshqalar. Sakkiz kanalli qurilma orqali g‘ildirakli mashinaning tebranish parametrlarini tadqiq qilishning dasturiy ta’minoti // O‘zbekiston

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS
I bo'lim (I часть; I Part)

1. Азимов Б.М., Равутов Ш.Т., Саидов С.А., Мирхаитов У.Т., Азимов М.Б. ТТЗ тракторларининг юритиш қисмини синаш стендининг имитация тизимини лойиҳалаш масаласини қўйилиши ва ечиш усуллари // «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон журнали. Тошкент, 2017. №2. 27-33 бет.

2. Азимов Б.М., Ахмедов Ш.А., Рузикулов А.Р., Азимов М.Б.. Моделирование и оптимальное управление движением четырехколесного универсально-пропашного трактора с бесступенчато регулируемым клиренсом // Журнал «Проблемы вычислительной и прикладной математики». Ташкент, 2018. №6. С.22-35.

3. Азимов Б.М., Онорбоев Б.О., Азимов М.Б. Разработка алгоритма оптимального управления испытательным стендом для испытаний колесных тракторов // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2019. №4. С.3-12.

4. Azimov B.M., Sulyukova L.F., Azimov M.B. Modeling and Research of the Controllability of Wheeled Tractors // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), Volume-9 Issue-1, November 2019. P.2344-2351. Scopus, CiteScore 2019=0.6.

5. Azimov B.M., Sulyukova L. F., Akhmedov Sh. A., Azimov M. B. Mathematical Modeling of Tractor Movement on the Slope // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD). Vol. 10, Issue 3, Jun 2020. P. 4953–4962. Scopus, CiteScore 2019=0.7. DOI: 10.24247/ijmperdjun2020469.

6. Азимов Б.М., Рузикулов А.Р., Азимов М.Б., Норкулов Ж.Ш. Моделирование, оптимальное управление движением и оценки энергетического состояния четырехколесного трактора // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2019. №3. С.3-16.

7. Рузикулов А.Р., Азимов М.Б., Абдуллаев Ж.Э., Идрисов Р.С. Программный комплекс расчета оптимальных параметров горизонтальных и вертикальных колебаний четырехколесного универсально-пропашного трактора при различных условиях движения // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2020. №4. С.86-98.

8. Azimov M.B. G'ildirakli traktorlarni sinash tizimini tadqiq qilish jarayonlarini IDEF0 uslubiyati asosida grafikaviy modellashtirish // "Informatika va energetika muammolari" O'zbekiston jurnali. Toshkent, 2023. №3.29-35 bet.

9. Onorboyev B.O., Azimov M. B. To'rt g'ildirakli traktorni pastlikga tushishidagi gorizontal harakatini modellashtirish va optimal boshqarish // "Informatika va energetika muammolari" O'zbekiston jurnali. Toshkent, 2025. №3. 13-24 бет.

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M RAQAMLI ILMIY KENGASH

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI

AZIMOV MAXMUDJON BAXTIYOROVICH

G'ILDIRAKLI TRAKTORLARNI SINASH JARAYONLARINI MODELLASHTIRISH VA OPTIMAL BOSHQARISH

05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash

TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PHD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent – 2026

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.4.PhD/T7100 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.airi.uz) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Onorboyev Boxodirjon Ochilboyevich** texnika fanlari doktori, professor
Rasmiy opponentlar:	**Gulyamov Shuxrat Manapovich** texnika fanlari doktori, professor
	Yakubjonova Dilfuza Kodirovna texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori, dotsent
Yetakchi tashkilot:	"Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universiteti

Dissertatsiya himoyasi Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil "04" dekabr soat 16⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Mirzo-Ulug'bek tumani, Bo'z-2 mavzesi, 17A-uy. Tel.: (+99871) 263-41-98, e-mail: info@airi.uz).

Dissertatsiya bilan Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (90-raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Mirzo-Ulug'bek tumani, Bo'z-2 mavzesi, 17A-uy. Tel.: (+99871) 263-41-98).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil "20" noyabr da tarqatildi.
(2026-yil "11" noyabr dagi 34 raqamli reestr bayonnomasi.)

N. Ravshanov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

F.M. Nuraliyev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi,
texnika fanlari doktori, professor

L.F. Sulyukova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

INTRODUCTION (abstract of Doctoral (PhD) Dissertation)

The aim of the research is to develop mathematical models of wheel tractor testing processes, algorithms for optimal control and assessment of their energy state.

The object of the research is the process of testing wheeled tractors.

The scientific novelty of the research is as follows:

developed mathematical models of movement and bench tests of wheeled tractors in uneven road conditions using the Lagrange equation of the 2nd type;

algorithms for optimal control of the movement of wheeled tractors in uneven road conditions and the process of testing on a bench based on the Pontryagin maximum principle were developed and transient processes were studied;

an algorithm for assessing the energy state of the wheel tractor testing process using the function and canonical Hamilton equations has been developed;

method of experimental study of wheel tractor horizontal oscillations in field conditions has been developed.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained as part of a dissertation study on the development of a multi-stage system for optimal control of the parameters of movement of wheeled tractors in uneven road conditions and the test process at the stand:

I. Test report "Development of structural and technological parameters of a four-wheeled universal row tractor with steplessly adjustable clearance" of vibrations of a four-wheeled universal row tractor with steplessly adjustable clearance in the field.

This report is based on the results of laboratory and field studies conducted in the experimental cotton fields of UZGTSITT on October 30, 2019. The experiments were carried out in accordance with the 2019 work program on the topic of the MA-Atex-2018-91 project "Development of structural and technological parameters of a universal row tractor with continuously adjustable ground clearance."

II. At Tashkent Tractor Plant LLC of the AgroTech cluster on the implementation of the scientific results of the dissertation on the topic "Modeling and optimal control of wheel tractor testing processes" (Certificate of Tashkent Tractor Plant LLC No237 December 16, 2025). The proposed methods of modeling and optimal control of wheel tractor testing processes make it possible to reduce the period of experimental and testing work on optimizing the running and design parameters of tractors in the field by 60-80% and optimize their design parameters.

Publication of research results. In total, 19 scientific papers were published on the topic of research, of which 11 articles were published in scientific publications recommended for publication as the main scientific results of dissertations by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 2 published in foreign and 9 in republican journals, and 3 certificates of official registration of computer programs were obtained.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of used literature and appendices. The volume of the dissertation is 114 pages.

The dissertation topic of the Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences is registered in the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2026.4.PhD/T7100

The dissertation has been prepared at the Digital technologies and artificial intelligence development research institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website www.airi.uz and website "Ziyonet" Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser:	Onorboev Bakhodirjon Ochilboevich doctor of technical sciences, professor
Official opponents:	**Gulyamov Shukhrat Manapovich** doctor of technical sciences, professor
	Yakubjanova Dilfuza Kodirovna doctor of philosophy in technical sciences, PhD, docent
Leading organization:	**"Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers" National research university**

The defense will take place on "04" january 2026 at 16⁰⁰ the meeting of Scientific council No. DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M at the Research Institute for the Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence. (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Center of the Research Institute for Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence (is registered under No. 90). (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

Abstract of dissertation sent out on "20" november 2026 y.
(mailing report No. 34 on "11" november 2026 y.)

N. Ravshanov
Chairman of the Scientific Council awarding degrees, doctor of technical sciences, professor

F.M. Nuraliev
Scientific Secretary of the Scientific Council awarding scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

L.F. Sulyukova
Chairman of an academic seminar under the Scientific Council awarding scientific degrees, doctor of technical sciences, senior researcher

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda hozirgi kunda mashina-traktorli agregatlar (MTA) holatini monitoring qilishning zamonaviy tizimlari Rossiyaning "Oltoy MST", "Vladimir MST", "Kirov MST", "Kuban MST", "Povoljsk MST", "Podolsk MST", "Sibir MST", AQShning "John-Deere" va "Case", Yevropada Fransiyaning "Claas" sinash markazi o'z korxonalarida ishlab chiqarilgan mashinalarni sinovdan o'tkazish vaqtida ekspluatatsiya sharoitlarini imitatsiya qiluvchi zamonaviy axborot texnologiyalari bilan jihozlangan kompleks sinash tizimlariga ega. Hako, Iseki, Kubota (Yaponiya), Goldoni (Italiya), Shibaura (Yaponiya) va Lovol (XXR) firmalari o'rta va kichik traktorlarga ixtisoslashgan. Ushbu firmalar mahsulotlarining jahon bozorida texnik darajasi va raqobatbardoshligini ta'minlash, uning samaradorligini oshirish, mashinalar, mexanizmlarning ishlashi va ekologik tozaligini kengaytirish, yoqilg'i-energetika va moddiy resurslarni tejash mahsulotlarining dinamik xususiyatlarini yaxshilash muammolarini hal qilishga qaratgan. Shu bilan birga, mashinalarda sodir bo'ladigan dinamik jarayonlarning fizik mohiyatiga asoslangan dinamik tahlil bilan bog'liq mexanizmlar va mashinalarning tebranish faolligini o'rganish muammosini hal qilishga alohida e'tibor berilgan.

Jahonda ushbu masalani yechish uchun mashinalarining funksional, konstruktiv-texnologik va energetik parametrlarini nazorat va diagnostika qilish maqsadida kompleks monitoring tizimini yaratish ishlari bo'yicha chora-tadbirlar ishlab chiqilmoqda. Bu tizimlar sun'iy ekspluatatsiya sharoitlarini yaratish asosida sun'iy, tabiiy va stendli sinashlar bazasida quriladi. Bunday tizimlar qishloq xo'jalik mashinalarini ishlab chiqaruvchi yetakchi firmalarda ishlab chiqilgan "John-Deere" va "CaseIH" (AQSh) o'z korxonalarida zamonaviy axborot texnologiyalar bilan jihozlangan kompleks sinov tizimlariga ega, ko'rsatilgan tizimlar chiqarilayotgan mashinalarni sinash jarayonida ekspluatasiya sharoitlarini yaratib beradi.

So'nggi yillarda dinamik jarayonlarni tadqiq qilish va boshqarishda eng yangi axborot texnologiyalaridan foydalanish, mashina-traktorlarning turli parametrlari va sodir bo'layotgan jarayonlarning xususiyatlari to'g'risida m'lumot olishning elektron va boshqa vositalari bilan tavsiflanadi. Shu sababli, sinov jarayonini takomillashtirishga, shuningdek, zamonaviy raqamli texnologiyalardan foydalangan holda real vaqt rejimida qishloq xo'jaligi traktorlarining funksional xususiyatlarini aniqlashning ishonchliligini oshirishga imkon beradigan zamonaviy usul va texnik vositalarni yaratish va joriy etishga qaratilgan tadqiqotlar dolzarb hisoblanadi.

Respublikamizda qishloq xo'jaligi mashinasozligida mashina-sinash tizimlarini rivojlantirish muhim ahamiyatga ega sohalardan biri bo'lib, mashina va ularning jihozlari sifati va ishonchliligini oshirish hozirgi kunning eng muhim va dolzarb muammolaridan biri hisoblanadi.

Mahalliy traktorlarni ishlab chiqarishni kengaytirish, qishloq xo'jalik mahsulotlarini ishlab chiqaruvchilarining zamonaviy yuqori ish unumdorligiga ega texnikaga bo'lgan ehtiyojlarini qondirish, shuningdek qishloq xo'jaligi mashinasozligi sohasining eksport potensialini ko'tarish maqsadida tadqiqotlar olib borishga katta ahamiyat qaratilmoqda. Ushbu yo'nalish dolzarbligi O'zbekiston

Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-iyuldagi PQ-3117 “Qishloq xo‘jaligida mashinasozlik sohasi ilmiy-texnikaviy bazasini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qaroriga asosan sanoat soha va korxonalarining raqobatbardoshligini ularni modernizasiyalash, ishlab chiqarishni texnik va texnologik yangilash asosida yanada oshirishga yo‘nalgan respublika sanoatini rivojlantirishdan, xususan sohadagi ilmiy-tadqiqot, innovasion va tajriba-konstruktorlik ishlarini qishloq xo‘jalik texnikalarining yangi namunalarini sinashni o‘zichiga olgan holda muvofiqlashtirish; qishloq xo‘jalik texnikasining amaliy masalalari bo‘yicha ilmiy-tadqiqot va innovasion ishlar olib borish; soha tashkilotlari va resrublikaning boshqa tashkilotlari orasida ilmiy-texnikaviy birlashishni rivojlantirishdan iboratdir.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yilda 12-dekabrdagi PQ-431-son “Qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash darajasini yanada oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorida qishloq xo‘jaligida zamonaviy agrotexnologiyalarni keng joriy etish, ekinlarni ekish, yetishtirish va hosilni yig‘ib olishni bosqichma-bosqich to‘liq mexanizatsiyalash, agrar sohada qishloq xo‘jaligi texnikalariga servis (texnik holatini ko‘rikdan o‘tkazish va ta'mirlash) xizmatlari ko‘rsatish darajasini oshirish va servis ustaxonalari texnologik bazasini rivojlantirishga alohida e'tibor qaratilgan.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. “Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalari rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. So‘nggi yillarda mashina-traktorlar agregatlarini tadqiq qilish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar olib borildi va muhim nazariy va amaliy natijalar olindi. Ular xorijiy olimlarning asarlarida, xususan Boltinskiy V.N., Svirshchevskiy B.S., Trepenenkov I.I., Baram X.G., Zavalishin F.S., Polkanov I.P., Vedenyapin G.V., Kirtbaya Yu.K., Sergeev M.N., Orlov N.M., Zangiev A.A., Ksenevich I.P., Guskov V.V., Parfenov A.P., Ageyev L.E., Krasovskiy V.S., Kutkov N.M., Skoybeda A.G., Lyasko M.I., Mazitov N.K., Saklakov V.D., Hafizov K.A., Sharov N.M., Volpato C.E.S. Jugovic M., Simikic M., Zoranovic M., Koprivica R., Moessmer A. va boshqa ko‘plab olimlar.

O‘zbekistonda X.X. Usmonxo‘jayev, A.D. Glushchenko, R.D. Matchanov, M.R. Daminov, Sh.M. Mirziyoyev, A.D. Abdazimov, A.A. Axmetov, Sh.A. Axmedov, E. Uljaev, A. Irgashev, J. Jo‘rayev, Gungor Sami, A.Urishev, B.M. Azimov va boshqa ko‘plab olimlar mashina-traktor agregatlarini konstrusiyalari, ekspluatasiyasi, sinash jarayonlari va matematik modellari, boshqarishning algoritmlarini ishlab chiqishga katta hissa qo‘shdilar.

Hozirgi vaqtda turli xil harakat sharoitlarida mashina-traktor agregatlarini harakatini modellashtirish va boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish muammolari yetarlicha o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim va ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasi bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi Raqamli texnologiyalar vazirligi huzuridagi Raqamli texnologiyalar va sun’iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot

SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M AT DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE DEVELOPMENT RESEARCH INSTITUTE

DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE DEVELOPMENT RESEARCH INSTITUTE

AZIMOV MAKHMUDJON BAKHTIYAROVICH

MODELING AND OPTIMAL CONTROL OF WHEELED TRACTOR TESTING PROCESSES

05.01.02–System analysis, management and information processing

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON TECHNICAL SCIENCES

Tashkent–2026

дорожные условия и генерирующих как горизонтальные, так и вертикальные колебания, является актуальной задачей.

2. Проведенные до настоящего времени исследования носили одноуровневой характер и были сосредоточены на анализе функционирования технических систем с целью определения влияния различных факторов на их прочность, эффективность и технологичность. Однако они не позволяют построить адекватные модели, отражающие связь объекта с внешней средой, его функции и этапы структуры, а также не дают точных значений регулирующих, демпфирующих и жесткостных параметров исследуемых объектов.

3. Разработана на основе методологии IDEF0 структура функциональных блоков, отражающей взаимосвязь динамических процессов в испытательной системе. Эта структура включает алгоритмы, позволяющие оптимизировать процессы испытания при различных параметрах системы и получать оптимальные решения.

4. Разработаны математические модели движения трактора в полевых условиях и стендовых испытаний с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Сопряженные функции были разработаны путем формирования функции Гамильтона-Понтрягина с применением принципа максимума Понтрягина. Эти сопряженные функции позволили получить решение для алгоритма управления $|u| \le 1$.

5. На основе разработанных математических моделей были сформулированы краевые задачи Понтрягина. При решении краевых задач в качестве заданного критерия оптимального управления была сформирована задача Лагранжа, решена задача быстродействия, исследованы необходимые условия оптимального управления, позволяющие перевести объект из начального состояния в заданное конечное состояние за кратчайшее время при ограничениях $u = +1$; $u = -1$, и определены значения движения объекта в переходном процессе.

6. В результате решения сопряженной системы и граничных задач были определены коэффициенты вязкости b_i, жесткости c_i, моменты инерции j_i, массы m_i, которые были подставлены в уравнения (2.6) и (3.1), что позволило получить характеристики движения трактора и испытательной системы.

7. Для оценки энергетического состояния испытательной системы были составлены уравнения, выражающие полную механическую энергию системы с использованием функции и канонических уравнений Гамильтона. Это позволило определить распределение мощности в механизмах испытательной системы и приводной части трактора.

Таким образом, испытательный стенд для тракторов обеспечивает возможность проведения оперативных испытаний в заводских условиях и имеет важное значение для повышения качества и надежности выпускаемых тракторов.

institutining MV-Atex-2018-91 «Klirensi pog‘onasiz o‘zgartiriladigan orqa ko‘prik bilan jihozlangan universal-chopiq traktorining konstruktiv va texnologik parametrlarini ishlab chiqish» (2018-2020 yy.), Б-2023-40 «Mashina-traktorli agregatlarni raqamli loyihalash uchun parametrlarini asoslashning modellari va algoritmlarining dasturiy majmualarini ishlab chiqish» (2023-2024 yy.) loyihalari bo‘yicha ilmiy ishlari doirasida bajarildi.

Tadqiqotning maqsadi g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarining matematik modellari, optimal boshqarish va energetik holatini baholash algoritmlarini ishlab chiqichdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

mashina-traktorlarning sinash tizimlarini tadqiq qilish va parametrlarni boshqarishning hozirgi holatini tahlil qilish;

g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatini va stendda sinash jarayonlarini tadqiq qilishning matematik modelini ishlab chiqish;

g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatini va stendda sinash jarayonini optimal boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish;

g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarining energetk holatini baholash modeli va algoritmini ishlab chiqish;

g‘ildirakli traktorlarni dala sharoitida gorizontal tebranma harakatini eksperimental tadqiq qilish.

Tadqiqotning obyekti g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayoni.

Tadqiqotning predmeti g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini tahlil qilish uchun matematik modellar, harakatini optimal boshqarish, energitik holatini baholash algoritmlari va hisoblash eksperimentlarinig dasturiy vositalaridan iborat.

Tadqiqotning usullari tizimli tahlil, variatsion hisoblash usullari, mashina va mexanizmlar va optimal tizimlar nazariyasi, zamonaviy axborot texnologiyalari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

Ikkinchi tur Lagranj tenglamasini qo‘llash orqali g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatining va stendda sinash jarayonlarining matematik modellari ishlab chiqilgan;

Pontryaginni maksimum prinsipi asosida g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatini va stendda sinash jarayonini optimal boshqarish algoritmlari ishlab chiqilgan va o‘tish jarayonlari tadqiq qilingan;

Gamilton funksiyasi va kanonik tenglamalarini qo‘llash orqali g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayoninining energetik holatini baholash algoritmi ishlab chiqilgan;

G‘ildirakli traktorlarni dala sharoitida gorizontal tebranma harakatini eksperimental tadqiq qilish uslubi ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

g‘ildirakli traktorlarning notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatini va stendda sinash jarayonlarini matematik modellashtirish usuli ishlab chiqilgan;

g‘ildirakli traktorlarning notekis yo‘l sharoitlaridagi harakatini va stendda sinash jarayonlarini optimal boshqarish va sinash jarayoninining energitik holatini baholash algoritmlari hamda loyihalash jarayonlari uchun turli rejimlardagi harakat parametrlarini optimallastirishning dasturiy vositalari joriy qilingan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonining dinamik ko‘rsatkichlarini baholash uchun matematik apparatda to‘g‘ri foydalanish bilan belgilanadi hamda hisoblash va dala sharoitida o‘tkazilgan eksperimentlar natijalari bilan tasdiqlangan.

Tadqiqotning ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati konstruktiv usullar, modellar, holatni baholash algoritmlari, axborotlarni tahlil qilish, qayta ishlash usullari va ularning o‘zaro bog‘liqlanishidagi g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlarida harakat parametrlarini va stendda sinash jarayoninini modellashtirish va optimal boshqarishning ko‘p bosqichli tizimining shajaraviy tuzilmasidan iborat.

Dissertatsiya natijalarining amaliy ahamiyati noto‘g‘ri yechimlarni istisno qiladigan ishonchli ma’lumotlarni olish orqali g‘ildirakli traktorlarni tadqiq qilish va loyihalash samaradorligini oshirish uchun funktsional, energetik, kostruktiv, texnologik parametrlarning eng yaxshi dinamik tavsiflarini, holatini baholashni aniqlaydigan modellashtirish usullari va optimal boshqarish algoritmlarini ishlab chiqishdan hamda parametrlarni dala sharoitida sinashga ko‘p mablag‘ talab qiladigan parametrlarini eksperimental maromiga yetkazish bosqichlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini yaratishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Dissertatsiya tadqiqotlari doirasida g‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitlarida harakat parametrlarini va stendda sinash jarayoninini optimal boshqarishning ko‘p bosqichli tizimini ishlab chiqish bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

I. To‘rt g‘ildirakli klirensi pog‘onasiz o‘zgartiriladigan universal-chopiq toraktorning tebranishlarini dala sharoitidagi «Klirensi pog‘onasiz o‘zgartiriladigan orqa ko‘prik bilan jihozlangan universal-chopiq traktorining konstruktiv va texnologik parametrlarini ishlab chiqish» sinovi dalolatnomasi.

Ushbu dalolatnoma 2019-yil 30-oktabrda UZGTSITTning eksperimental paxta dalalarida o‘tkazilgan laboratoriya-dala tadqiqotlari natijalari asosida tuzilgan. Tajribalar MA-Atex-2018-91 «Klirensi pog‘onasiz o‘zgartiriladigan orqa ko‘prik bilan jihozlangan universal-chopiq traktorining konstruktiv va texnologik parametrlarini ishlab chiqish» loyihasi mavzusida 2019 yilgi ish dasturiga muvofiq o‘tkazildi.

II. “G‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini modellashtirish va optimal boshqarish” mavzusidagi dissertatsiya ishining ilmiy natijalarini amaliyotga joriy qilish to‘g‘risida AgroTech klasterining “Toshkent traktor zavodi” MChJning 2025 yil 16 dekabrdagi №237-ma’lumotnomasi.

Taklif qilingan g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini modellashtirish va optimal boshqarish usullari dala sharoitida traktorlarni harakat, konstruktiv parametrlarini maromiga yetkazishning eksperimental-sinov ishlari davrini 60-80 % gacha qisqartirishga va konstruktiv parametrlarini optimallashtirishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 2 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Tadqiqot mavzusi bo‘yicha jami 19 ta ilmiy ish chop etilgan bo‘lib, shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish

$$Q_{д} = M_{д} = j_{д}\ddot{\varphi}_{д};\ Q_{п} = M_{п} = j_{п}\ddot{\varphi}_{п};\ Q_{с} = M_{с} = j_{с}\ddot{\varphi}_{с};\ Q_{тр} = F_{тр} = m_{тр}\ddot{x}_{тр};$$

$$Q_{плк} = F_{плк} = m_{плк}\ddot{x}_{плк};\ Q_{ппк} = F_{ппк} = m_{ппк}\ddot{x}_{ппк};\ Q_{злк} = F_{злк} = m_{злк}\ddot{x}_{злк};$$

$$Q_{зпк} = F_{зпк} = m_{зпк}\ddot{x}_{зпк}.\ P_{д} = \frac{M_{д}\dot{\varphi}_{д}}{1000}, кВт;\ P_{п} = \frac{M_{п}\dot{\varphi}_{п}}{1000}, кВт;\ P_{с} = \frac{M_{с}\dot{\varphi}_{с}}{1000}, кВт;$$

$$P_{тр} = \frac{F_{тр}\dot{x}_{тр}}{1000}, кВт;\ P_{плк} = \frac{F_{плк}\dot{x}_{плк}}{1000}, кВт;\ P_{ппк} = \frac{F_{плк}\dot{x}_{плк}}{1000}, кВт;$$

$$P_{злк} = \frac{F_{злк}\dot{x}_{злк}}{1000}, кВт;\ P_{зпк} = \frac{F_{зпк}\dot{x}_{зпк}}{1000}, кВт.$$

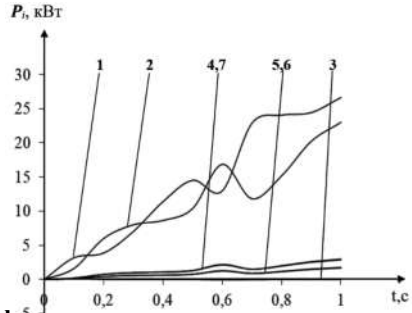


Рис.16. График изменения мощности при испытании колесного трактора: 1 – $P_{д}$ -мощность двигателя на стенде; 2 – $P_{п}$ мощность привода стенда; 3 – $P_{с}$ -мощность нагрузочного имитатора стенда; 4 – $P_{плк}$ - мощность переднего левого колеса; 5 – $P_{ппк}$ - мощность переднего правого колеса; 6 – $P_{злк}$ -мощность заднего левого колеса; 7 – $P_{зпк}$ - мощность заднего правого колеса.

Таким образом, анализ распределения мощности позволяет оценить различные механические процессы, происходящие в ходе испытаний. Канонические уравнения Гамильтона описывают полную механическую энергию и ее изменение под действием внешних сил, т.е. энергетическое состояние испытательной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, основанной на концепции системного подхода, многоуровневой системы управления и современных информационных технологий, результаты, полученные в рамках диссертационной работы, представлены в следующих основных выводах.

1. Системный анализ современных методов испытаний, исследований и управления машинами и тракторами, а также их агрегатами, проведенный в последние годы, показали, что существующие системы нагружения в современных испытательных системах основаны на вибраторах и генерируют только вертикальные колебания. Создание стендов, имитирующих неровные

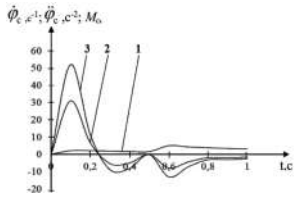


Рис.12. График изменения скорости 1, ускорения 2 и движущего момента 3 стенда-имитатора нагрузки трактора в процессе испытаний

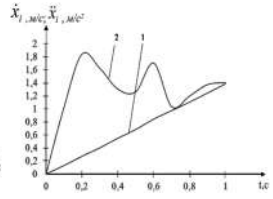


Рис. 13. График изменения скорости 1 и ускорения 2 колес в процессе испытания трактора

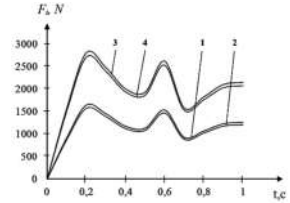


Рис. 14. График изменения тяговых усилий в процессе испытания трактора: 1 – переднее левое колесо, 2 – переднее правое колесо, 3 – заднее левое колесо, 4 – заднее правое колесо

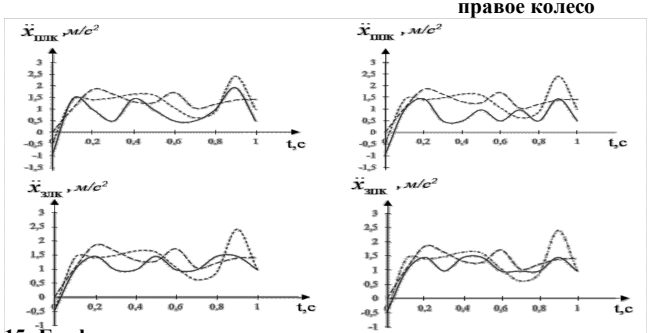


Рис.15. Графики сравнения теоретических и экспериментальных результатов горизонтальных колебаний TTZ-1033: полевые условия ---------- , стендовые испытания ------- и результаты экспериментов ———

Представляем алгоритм оценки энергетического состояния системы испытаний

$$\left|P_з - P_p\right| \le \varepsilon, \qquad (19)$$

здесь, $P_з$ – заданная мощность испытательного стенда, кВт; P_p – расчетное значение испытательного процесса; ($\forall\varepsilon\,(0<\varepsilon<1)$ — малое значение.

Составляем уравнение для оценки энергетического состояния испытательного стенда, используя полный дифференциал функции Гамильтона.

$$\frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\left(-\frac{\partial H}{\partial q_i} + Q_i\right)\dot{q}_i = \sum_{i=1}^{n} Q_i\,\dot{q}_i. \qquad (20)$$

Определим обобщенную силу Q_i ($q_i = \varphi_i,\ x_i$) и расход мощности (рис.17).

tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 11 ta maqola, jumladan 2 tasi xorijiy va 9 tasi respublika jurnallarida nashr qilingan hamda 3 ta EHM uchun dasturiy vositalarga rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi guvohnomalar olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 114 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilab olingan, tadqiqot obyekti va predmeti aniqlangan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ishning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etilganlik holati hamda nashr etilgan ishlar va dissertatsiya ishining tuzilishi bo‘yicha ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Mashina sinash jarayonlarini tadqiq qilish va boshqarishning zamonaviy usullarini tizimli tahlili”** deb nomlangan birinchi bobi uchta paragrafdan iborat. Unda yangi mashina-traktorlarni yaratishda uning sifati, samarali ishlashi va raqobatbardoshligi taminlash yechimini izlash zaruriy shartlardan hisoblanadi.

So‘nngi yillarda tashxislash, sinash, boshqaruv va mashinalar va dastgohlarni nazorat qilish o‘rtasida o‘zaro bog‘lanishlar namoyon bo‘lmoqda. Avtomatlashtirilgan tashxislash, sinash, boshqaruv va nazorat tizimlari bo‘yicha yo‘l-yo‘riq vositalarini rivojlantirish yo‘nalishlari shakllantirila boshladi. Ushbu yo‘nalishning asosiy afzalligi vositalarni ishlatishning birinchi kunidanoq natijalarning ishonchliligini yuqoriligidadir.

Monitoring tizimini asosiy masalalaridan biri mashina-traktorlarning sifatini tekshirish va alohida qismlarini to‘g‘ri yig‘ilganligini, o‘rnatilgan texnik shartlarga mashina-traktorlarnining sinash natijalarini mos kelishini tekshirish uchun yuqori samarali sinash tizimlarni yaratish hisoblanadi.

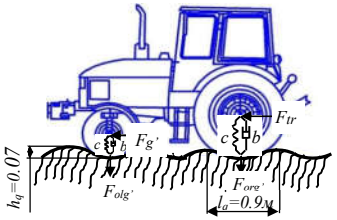
1.1-paragrafda mashina-traktorlarni sinash jarayonlarini tadqiq qilish va boshqarishning zamonaviy usullarini tizimli tahlili keltirilgan.

1.2-paragrafda zamonaviy mashina sinash tizimlarining tahlili keltirilgan. Yevropadagi qishloq xo‘jaligi mashinasozligi sohasidagi eng zamonaviy sinash markazlarida qo‘yiladigan qat’i talablar tahlil qiblib chiqilgan.

1.3-paragrafda g‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini modellashtirish va bosh-qarishning umumiy tuzilmasini qurish keltirilgan. Taklif qilinayotgan ko‘pbosqichli tizim tadqiq qilinadigan obyektni, axborotni olish va tahlil qilishni, optimallashtirish va sinash tizimida bo‘ladigan dinamik jarayonlarni matematik modellashtirish va sonli usullari asosida yechimning optimal variantlarini tanlashni tashkil qiadi. Shunday yondashuvlardan biri sinash jarayonlarini modellashtirish, tashxislashni algoritmlashtirish, holatni baholash, boshqaruv va axborotni uzatish usullarini takomillashtirish maqsadida IDEF (ICAM- Integrated Computer-Aided Manufacturing DEFinition - kompyuter va ishlab chiqarish texnologiyalarini integratsiya qilishni aniqlash) metodologiyasining grafikaviy va axborotli modellashtirish usullari qo‘llanilgan.

1.4-paragrafda tadqiqotning maqsadi va masalasini qo‘yilishi bayon qilingan. G‘ildirakli traktorlarni sinash jarayonlarini ko‘pbosqichli matematik modellashtirish, optimal boshqarish, energetik holatini baholash va sinovdan o‘tkazish vazifalari keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“G‘ildirakli traktorlarni notekis yo‘l sharoitidagi harakatini matematik modellashtirish va optimal boshqarish”** deb nomlangan ikkinchi bobida traktorning dala sharoitidagi harakatinining matematik modeli 2-tur Lagranj tenglamalaridan foydalanib ishlab chiqildi (1-rasm).



1-rasm. Traktorni dinamik modeli sxemasi

Hisoblash sxemasi asosida traktorning dala sharoitidagi harakatinining matematik model ikkinchi turdagi Lagranj tenglamasi (1) ko‘rinishida tuzilgan.

$$\left.\begin{aligned}
&m_{tr}\ddot{x}_{tr} = F_{tr} - b_{ochg'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{olchg'}) - c_{ochg'}(x_{tr} - x_{olchg'}) - b_{olo'g'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{olo'g'}) - c_{olo'g'}(x_{tr} - x_{olo'g'}) - \\
&\quad - b_{orchg'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{orchg'}) + c_{orchg'}(x_{tr} - x_{orchg'}) - b_{oro'g'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'g'}(x_{tr} - x_{oro'g'});\\
&m_{olchg'}\ddot{x}_{olchg'} = b_{olchg'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{olchg'}) + c_{olchg'}(x_{tr} - x_{olchg'}) + m_{olchg'}\frac{2\pi^2 V^2_{olchg'}}{l_q^2}h_q \sin\frac{2\pi V_{olchg'}}{l_q}t;\\
&m_{olo'g'}\ddot{x}_{olo'g'} = b_{olo'g'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{olo'g'}) + c_{olo'g'}(x_{tr} - x_{olo'g'}) + m_{olo'g'}\frac{2\pi^2 V^2_{olo'g'}}{l_q^2}h_q \sin\frac{2\pi V_{olo'g'}}{l_q}t;\\
&m_{orchg'}\ddot{x}_{orchg'} = b_{orchg'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{orchg'}) + c_{orchg'}(x_{tr} - x_{orchg'}) + m_{orchg'}\frac{2\pi^2 V^2_{orchg'}}{l_q^2}h_q \sin\frac{2\pi V_{orchg'}}{l_q}t;\\
&m_{oro'g'}\ddot{x}_{oro'g'} = b_{oro'g'}(\dot{x}_{tr} - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'g'}(x_{tr} - x_{oro'g'}) + m_{oro'g'}\frac{2\pi^2 V^2_{oro'g'}}{l_q^2}h_q \sin\frac{2\pi V_{oro'g'}}{l_q}t
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

bu yerda F_{tr}– traktorning tortish kuchi; $\dot{x}_i$ va $\ddot{x}_i$– traktorning old va orqa g‘ildiraklarning chiziqli tezligi va tezlashishi; $b_{olchg'}$, $b_{olo'g'}$, $b_{orchg'}$, $b_{oro'g'}$, $c_{olchg'}$, $c_{olo'g'}$, $c_{orchg'}$, $c_{oro'g'}$ –traktorning oldingi chap va o‘ng, orqa chap va o‘ng g‘ildiraklari shinalarining qovushqoqlik va bikrlik koeffitsiyentlari m_{tr}, $m_{olchg'}$, $m_{olo'g'}$, $m_{orchg'}$, $m_{oro'g'}$ - traktor va old chap va o‘ng, orqa chap va o‘ng g‘ildiraklari bo‘ylab massa taqsimlanishi; h_q – yo‘lning notekisligi balandligi; l_q – notekisliklar orasidagi masofalar.

To‘rt g‘ildirakli traktorning differensial tenglamasi asosida optimal boshqarish algoritmini ishlab chiqamiz.

Masalani yechishda optimal tizimlar nazariyasidan, Pontryaginning maksimum prinsipidan foydalanamiz. Bu yerda mezon sifatida tez harakat masalasi muhim rol o‘ynaydi.

$$u_k = sign\psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < 1 \end{cases}, \quad k=2,4,\ldots,2n, \qquad (30)$$

$$\left.\begin{aligned}
&\varphi_д = x_1, \dot{\varphi}_д = x_2, \dot{x}_2 = sign\psi_{2д} - j_д^{-1}[b_п(x_2 - x_4) - c_п(x_1 - x_3);\\
&\varphi_п = x_3, \dot{\varphi}_п = x_4, \dot{x}_4 = j_п^{-1}[b_п(x_2 - x_4) + c_п(x_1 - x_3)] - signi_2\psi_{2п};\\
&\varphi_с = x_5, \dot{\varphi}_с = x_6, \dot{x}_6 = signi_1\psi_{2п} - f_k signi_2\psi_{2тр};\\
&x_{плк} = x_7, \dot{x}_{плк} = x_8, \dot{x}_8 = m_{плк}^{-1}[b_{плк}(r_s x_6 - x_8) + c_{плк}(r_c x_5 - x_7)] - sign\psi_{2плк};\\
&x_{ппк} = x_9, \dot{x}_{ппк} = x_{10}, \dot{x}_{10} = m_{ппк}^{-1}[b_{ппк}(r_s x_6 - x_{10}) + c_{ппк}(r_s x_5 - x_9)] - sign\psi_{2ппк};\\
&x_{злк} = x_{11}, \dot{x}_{злк} = x_{12}, \dot{x}_{12} = m_{злк}^{-1}[b_{злк}(r_s x_6 - x_{12}) + c_{злк}(r_c x_5 - x_{11})] - sign\psi_{2злк};\\
&x_{зпк} = x_{13}, \dot{x}_{зпк} = x_{14}, \dot{x}_{14} = m_{зпк}^{-1}[b_{зпк}(r_s x_6 - x_{14}) + c_{зпк}(r_s x_5 - x_{13})] - sign\psi_{2ппк}.
\end{aligned}\right\} \quad (29)$$

т.е. управление $u_k(t)$ может иметь только одну точку переключения.

Для исследования движения испытательной системы был проведен вычислительный эксперимент с использованием численного метода Рунге-Кутты при начальном условии $t=0$, и результаты были получены в виде графиков.

Вычислительные эксперименты проводились при следующих параметрах, когда прогиб шин колес трактора составлял $h_ш$=*10 мм = 0,01 м*:

$M_д$=315.8 Нм; $c_п$=9450.07 Нм/рад; $b_п$ =7.7 Нмс/рад; $j_д$ =1.1 Нмс^2;$j_п$ =0.9 Нмс^2; $j_с$ =1.68 Нмс^2; $c_{плк}$=877995 Н/м; $b_{плк}$=64838.85 Нс/м; $c_{ппк}$=838755 Н/м; $b_{ппк}$=61940.7 Нс/м; $c_{злк}$=1496025 Н/м; $b_{злк}$=110480 Нс/м; $c_{зпк}$=1446975 Н/м; $b_{зпк}$=106856.8 Нс/м; $m_{плк}$=895 кг; $m_{ппк}$=855 кг; $m_{злк}$=1525 кг; $m_{зпк}$=1475 кг; $r_{пк}$=0.43 м; $r_{зк}$=0.785м; r_c=0.3 м; $h_п$=0.07м; $l_п$=0.9м; V_m=1.38 m/s; f_k=0.7475; i_1=22.28; i_2=0.045.

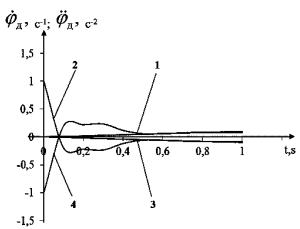


Рис.9. График переходного процесса двигателя на испытательном стенде: угловая скорость 1 - при u(t) = +1; 3 - при u(t) = -1; угловое ускорение 2 - при u(t) = +1;

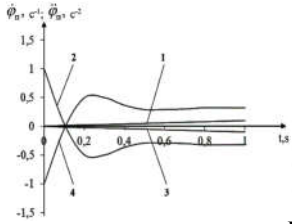


Рис.10. График переходного процесса привода испытательного стенда: угловая скорость 1 - при u(t) = +1; 3 - при u(t) = -1; угловое ускорение 2 - при u(t) = +1; 4 - при u(t) = -1;

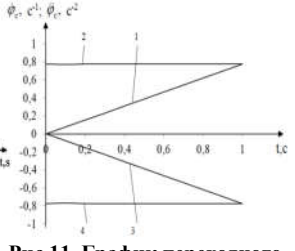


Рис.11. График переходного процесса имитатора нагрузки испытательного стенда: угловая скорость: 1 - при u(t) = +1; 3 - при u(t) = -1; угловое ускорение: 2 - при u(t) = +1;4 - при u(t) = -1

На основе полученного уравнения (21) разработаем алгоритм оптимального управления для процесса испытания. Алгоритм оптимального управления реализуется на основе последовательности, описанной в главе 2.

Пусть испытательная система представлена следующим образом в своем начальном состоянии в момент времени.

$$\varphi_i(0)=\varphi_0(0), \qquad \dot{\varphi}_i(0)=\dot{\varphi}_0(0), \quad V_i(0)=V_0(0) \ . \tag{22}$$

Необходимо найти такое управление *u(t)*, которое переводит стедовую систему из начального состояния в заданное состояние:

$$\varphi_i(t)=\varphi_0(t), \qquad \dot{\varphi}_i(t)=\dot{\varphi}_0(t), \ V_i(t)=V_0(t), \ \ 0\le t\le T \qquad (i=\overline{1,n}) \ . \tag{23}$$

В этом случае время переходного процесса должно быть наименьшим. В этом случае целью управления является минимизация функционала на основе условий (22) и (23).

$$J(\varphi_0,u(t),\varphi(t))=\int_{t_0}^{T} f^0(\varphi(t),u(t),t)dt. \tag{24}$$

При условиях (22), (23)

$$\dot{\varphi}_i(t)=f(\varphi_i(t),u(t),t), \tag{25}$$

$$u\in U, \qquad t_0\le t\le T, \tag{26}$$

где *f (...)* – непрерывно, дифференцируемая функция; *u(t)* – кусочно-непрерывная функция в отрезке [t_0, T].

Для формулировки принципа максимума введем функцию Гамильтона-Понтягина

$$H=(\varphi,u,t,\psi_i,\psi_0)=-f^0(\varphi,u,t)+\langle\psi,u\rangle \tag{27}$$

и сопряженную система

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{d\psi_{1д}}{dt}=-\frac{\partial H_д}{\partial x_1}=-j_д^{-1}\psi_{2д}, \quad \frac{d\psi_{2д}}{dt}=-\frac{\partial H_д}{\partial x_2}=-\psi_{1д}+j_д^{-1}\psi_2;\\
\frac{d\psi_{1п}}{dt}=-\frac{\partial H_п}{\partial x_3}=-j_п^{-1}c_п\psi_{2п}, \quad \frac{d\psi_{2п}}{dt}=-\frac{\partial H_п}{\partial x_4}=-\psi_{1п}+j_п^{-1}b_п\psi_{2п};\\
\frac{d\psi_{1c}}{dt}=-\frac{\partial H_c}{\partial x_5}=-j_c^{-1}\psi_{2c}, \quad \frac{d\psi_{2c}}{dt}=-\frac{\partial H_c}{\partial x_6}=-\psi_{1c}+j_c^{-1}\psi_{2c};\\
\frac{d\psi_{1плк}}{dt}=-\frac{\partial H_{плк}}{\partial x_7}=-m_{плк}^{-1}c_{плк}\psi_{2плк}, \quad \frac{d\psi_{плк}}{dt}=-\frac{\partial H_{плк}}{\partial x_8}=-\psi_{1плк}+m_{плк}^{-1}b_{плк}\psi_{2плк};\\
\frac{d\psi_{1пик}}{dt}=-\frac{\partial H_{пик}}{\partial x_9}=-m_{пик}^{-1}c_{пик}\psi_{2пик}, \quad \frac{d\psi_{пик}}{dt}=-\frac{\partial H_{пик}}{\partial x_{10}}=-\psi_{1пик}+m_{пик}^{-1}b_{пик}\psi_{2пик};\\
\frac{d\psi_{1злк}}{dt}=-\frac{\partial H_{злк}}{\partial x_{11}}=-m_{злк}^{-1}c_{злк}\psi_{2злк}, \quad \frac{d\psi_{плк}}{dt}=-\frac{\partial H_{плк}}{\partial x_{12}}=-\psi_{1злк}+m_{злк}^{-1}b_{злк}\psi_{2злк};\\
\frac{d\psi_{1зпк}}{dt}=-\frac{\partial H_{зпк}}{\partial x_{13}}=-m_{зпк}^{-1}c_{зпк}\psi_{2зпк}, \quad \frac{d\psi_{зпк}}{dt}=-\frac{\partial H_{зпк}}{\partial x_{14}}=-\psi_{1зпк}+m_{зпк}^{-1}b_{зпк}\psi_{2зпк}
\end{array}\right\} \tag{28}$$

с ограничением на управление $|u|\le 1$.

Из условий $\max\limits_{|u|<1} H$ следует $u=sign\,\psi_2$ при $\psi_2\neq 0$. Тогда краевая задача принципа максимума запишется в виде:

В этом случае управление состоит из следующего:

Optimal boshqarish masalasini keltiramiz. To‘rt g‘ildirakli traktor harakati vaqtnng boshlang‘ich holatidagi quyidagicha ko‘rinishda bo‘lsin

$$x_i(0)=x_0(0), \qquad \dot{x}_i(0)=\dot{x}_0(0) \ . \tag{2}$$

Shunday *u(t)* boshqarishni topish kerakki, To‘rt g‘ildirakli traktor harakatini boshlang‘ich holatdan berilgan holatga olib o‘tsin:

$$x_i(t)=x_0(t), \qquad \dot{x}_i(t)=\dot{x}_0(t) \ \ (i=1,n), \ 0\le t\le T. \tag{2}$$

Bunda o‘tish jarayoni vaqti qisqa bo‘lishi talab qilinadi. U holda boshqarishdan maqsad funksionalni (2) va (3) shartlar asosida minimumga keltiriladi

$$J(x_0,u(t),x(t))=\int_{t_0}^{T} f^0(x(t),u(t),t)dt \ . \tag{4}$$

(2), (3) shartlarda

$$\dot{x}(t)=f(x(t),u(t),t) \tag{5}$$

$$u\in U, \qquad t_0\le t\le T, \tag{6}$$

bu yerda *f(...)*−uzluksiz-differensiallanuvchi funksiya; *u(t)*−[t_0,T] oraliqdagi bo‘lakli-uzluksiz funksiya.

To‘rt g‘ildirakli traktor harakatini optimal boshqarishning zaruriy shartini tadqiq qilish uchun Pontryaginning maksimum prinsipidan foydalanamiz.

Maksimum prinsipini shakllantirish uchun Gamilton-Pontryagin funksiyasini

$$H=(x,u,t,\psi_i,\psi_0)=-f^0(x,u,t)+\langle\psi,u\rangle \tag{7}$$

va qo‘shma tizim

$$\left.\begin{array}{l}
\frac{d\psi_{1tr}}{dt}=-\frac{\partial H_{tr}}{\partial x_1}=-m_{tr}^{-1}(c_{olchg'}+c_{olo'g'}+c_{orchg'}+c_{oro'g'})\psi_{2tr};\\
\frac{d\psi_{2tr}}{dt}=-\frac{\partial H_{tr}}{\partial x_2}=-\psi_{1tr}+m_{tr}^{-1}(b_{olchg'}+b_{olo'g'}+b_{orchg'}+b_{oro'g'})\psi_{2tr};\\
\frac{d\psi_{1olchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olchg'}}{\partial x_3}-m_{olchg'}^{-1}c_{olchg'}\psi_{2olchg}, \quad \frac{d\psi_{2olchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olchg'}}{\partial x_4}=-\psi_{1olchg'}+m_{olchg'}^{-1}b_{olchg'}\psi_{2olchg'};\\
\frac{d\psi_{1olo'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olo'g'}}{\partial x_5}=-m_{olo'g'}^{-1}c_{olo'g'}\psi_{2olo'g'}, \quad \frac{d\psi_{2olo'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olo'g'}}{\partial x_6}=-\psi_{1olo'g'}+m_{olo'g'}^{-1}b_{olo'g'}\psi_{2olo'g'};\\
\frac{d\psi_{1orchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{orchg'}}{\partial x_7}-m_{orchg'}^{-1}c_{orchg'}\psi_{2orchg'}, \quad \frac{d\psi_{2orchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{orchg'}}{\partial x_8}=-\psi_{1orchg'}+m_{orchg'}^{-1}b_{orchg'}\psi_{2orchg'};\\
\frac{d\psi_{1oro'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{oro'g'}}{\partial x_9}=-m_{oro'g'}^{-1}c_{oro'g'}\psi_{2oro'g'}, \quad \frac{d\psi_{2oro'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{oro'g'}}{\partial x_{10}}=-\psi_{1oro'g'}+m_{oro'g'}^{-1}b_{oro'g'}\psi_{2oro'g'}
\end{array}\right\} \tag{8}$$

kiritamiz. Boshqarish chegarasi $|u|\le 1$.

Qaralayotgan masalani yechish uchun quyidagi zaruriy shart bajarilishi kerak:

$$H(x_i(t),u(t),t,\psi_i,\psi_0)=\max_{u\in U} H(x_i(t),u,t,\psi_i(t),\psi_0) \ . \tag{9}$$

(7) asosida optimal boshqarishni aniqlashga o‘tishdan oldin funksiyani shakllantiramiz.

To‘rt g‘ildirakli traktorni gorizontal harakati uchun

$$\left.\begin{aligned}
&x_{tr}=x_1,\dot{x}_{tr}=x_2,\ \dot{x}_2=u_{tr}-m_{tr}^{-1}[b_{ochg'}(x_2-x_4)-c_{ochg'}(x_1-x_3)-b_{olo'g'}(x_2-x_6)-\\
&\qquad -c_{olo'g'}(x_1-x_5)-b_{orchg'}(x_2-x_8)-c_{orchg'}(x_1-x_7)-\\
&\qquad -b_{oro'g'}(x_2-x_{10})-c_{oro'g'}(x_1-x_9)];\\
&x_{ochg'}=x_3,\dot{x}_{ochg'}=x_4,\ \dot{x}_4=m_{ochg'}^{-1}[b_{ochg'}(x_2-x_4)+c_{ochg'}(x_1-x_3)]+u_{ochg'};\\
&x_{olo'g'}=x_5,\dot{x}_{olo'g'}=x_6,\ \dot{x}_6=m_{olo'g'}^{-1}[b_{olo'g'}(x_2-x_6)+c_{olo'g'}(x_1-x_5)]+u_{olo'g'};\\
&x_{orchg'}=x_7,\dot{x}_{orchg'}=x_8,\ \dot{x}_8=m_{orchg'}^{-1}[b_{orchg'}(x_2-x_8)+c_{orchg'}(x_1-x_7)]+u_{orchg'};\\
&x_{oro'g'}=x_9,\dot{x}_{oro'g'}=x_{10},\ \dot{x}_{10}=m_{oro'g'}^{-1}[b_{oro'g'}(x_2-x_{10})+c_{oro'g'}(x_1-x_9)]+u_{oro'g'}.
\end{aligned}\right\},\quad (10)$$

Xuddi shunday, agar $f^0\equiv 1,\ g^0\equiv 0$, unda $J(q_0,u(t),q(t))=T-t_0$ — bu holda (4)-(6) masalalarni tez harakat masalasi deyiladi.

Qaralayotgan obyekt statsionar tizim hisoblanadi va (4) masala shuni ko‘rsatadiki, vaqtga bog‘liq emas, ya’ni

$$f(t,q,u)=f(q,u),\quad U(t)=U\ . \qquad (11)$$

Agar statsionar masala (4), (11) optimal boshqarish *u(t)* va optimal trayektoriya $x_0(t)$ ga ega bo‘lsa, u holda (7) shartni qoniqtiruvchi, trivial bo‘lmagan qo‘shma o‘zgaruvchilar $(\psi_1(t),\ \psi_2(t))$, $\psi(t)\in R^n$ nolga teng bo‘lmagan vektori mavjudki, ya’ni (9) maksimum sharti bajariladi:

$$\psi_0(t)=const\le 0\,. \qquad (12)$$

Xuddi shunday (10) qo‘shma tizim ψ_i ga nisbatan bir jinsli hisoblanadi, (12) tenglamadagi o‘zgarmasni ixtiyoriy tanlash mumkin, shunday qilib

$$\psi_0(t)=-1\qquad 0\le t\le T\ . \qquad (13)$$

$\psi_2\neq 0$ da $\max\limits_{|u|<1} H$ shartidan $u=sign\psi_2$ kelib chiqadi, agar $\psi_2\neq 0$ bo‘lsa, unda maksimum prinsipining chegaraviy masalasi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

To‘rt g‘ildirakli traktorni gorizontal harakati uchun

$$\left.\begin{aligned}
&x_{tr}=x_1,\dot{x}_{tr}=x_2,\ \dot{x}_2=sign\psi_{2tr}-m_{tr}^{-1}[b_{olchg'}(x_2-x_4)-c_{olchg'}(x_1-x_3)-b_{olo'}(x_2-x_6)-\\
&\qquad -c_{olo'g'}(x_1-x_5)-b_{orchg'}(x_2-x_8)-c_{orchg'}(x_1-x_7)-\\
&\qquad -b_{oro'g'}(x_2-x_{10})-c_{oro'g'}(x_1-x_9)];\\
&x_{olchg'}=x_3,\dot{x}_{olchg'}=x_4,\ \dot{x}_4=m_{olchg'}^{-1}[b_{olchg'}(x_2-x_4)+c_{olchg'}(x_1-x_3)]+sign\psi_{2olchg'};\\
&x_{olo'g'}=x_5,\dot{x}_{olo'g'}=x_6,\ \dot{x}_6=m_{olo'g'}^{-1}[b_{olo'}(x_2-x_6)+c_{olo'g'}(x_1-x_5)]+sign\psi_{2olo'g'};\\
&x_{orchg'}=x_7,\dot{x}_{orchg'}=x_8,\ \dot{x}_8=m_{orchg'}^{-1}[b_{orchg'}(x_2-x_8)+c_{orchg'}(x_1-x_7)]+sign\psi_{2orchg'};\\
&x_{oro'g'}=x_9,\dot{x}_{oro'g'}=x_{10},\ \dot{x}_{10}=m_{oro'g'}^{-1}[b_{oro'g'}(x_2-x_{10})+c_{oro'g'}(x_1-x_9)]+sign\psi_{2oro'g'}.
\end{aligned}\right\},\quad (14)$$

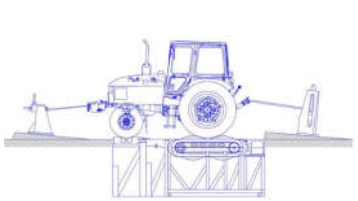


Рис. 6. Общий вид испыта тельного стенда

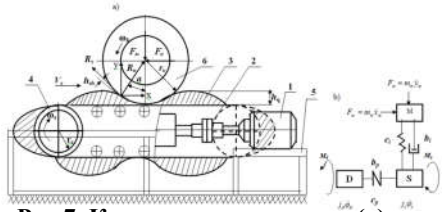


Рис.7. Кинематическая схема (а) и динамическая модель (б) основной платформы

Основная платформа состоит из двигателя-1, трансмиссии стенда-4, соединенной карданным механизмом через упругой муфты-2, и имитатора неровности дороги-3, который нагружает колеса трактора-6. Основная и передняя платформы установлены на общем каркасе (рис. 7).

На основе схемы динамической модели, представленной на рис. 7 составим математическую модель процесса испытаний, используя уравнение Лагранжа второго порядка,.

$$\left.\begin{aligned}
&j_д\ddot{\varphi}_д=M_д-b_п(\dot{\varphi}_д-\dot{\varphi}_п)-c_п(\varphi_д-\varphi_п);\\
&j_п\ddot{\varphi}_п=b_п(\dot{\varphi}_д-\dot{\varphi}_п)+c_п(\varphi_д-\varphi_п)-i_2j_c\ddot{\varphi}_c;\\
&j_c\ddot{\varphi}_c=i_1j_c\ddot{\varphi}_п-f_kr_c(m_{плк}\ddot{x}_{плк}+m_{ппк}\ddot{x}_{ппк}+m_{злк}\ddot{x}_{злк}+m_{зпк}\ddot{x}_{зпк});\\
&m_{плк}\ddot{x}_{плк}=b_{плк}(r_c\dot{\varphi}_c-\dot{x}_{плк})+c_{плк}(r_c\varphi_c-x_{плк})+m_{плк}\frac{2\pi^2r_c\dot{\varphi}_c^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi r_c\dot{\varphi}_c}{l_п}t;\\
&m_{ппк}\ddot{x}_{ппк}=b_{ппк}(r_c\dot{\varphi}_c-\dot{x}_{ппк})+c_{ппк}(r_c\varphi_c-x_{ппк})+m_{ппк}\frac{2\pi^2r_c\dot{\varphi}_c^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi r_c\dot{\varphi}_c}{l_п}t;\\
&m_{злк}\ddot{x}_{злк}=b_{злк}(r_c\dot{\varphi}_c-\dot{x}_{злк})+c_{злк}(r_c\varphi_c-x_{злк})+m_{злк}\frac{2\pi^2r_c\dot{\varphi}_c^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi r_c\dot{\varphi}_c}{l_п}t;\\
&m_{зпк}\ddot{x}_{зпк}=b_{зпк}(r_c\dot{\varphi}_c-\dot{x}_{зпк})+c_{зпк}(r_c\varphi_c-x_{зпк})+m_{зпк}\frac{2\pi^2r_c\dot{\varphi}_c^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi r_c\dot{\varphi}_c}{l_п}t
\end{aligned}\right\}\quad (21)$$

где $j_д$ $j_п$, j_c — моменты инерции вращающихся масс приводной системы; $\ddot{\varphi}_д,\ddot{\varphi}_п,\ddot{\varphi}_c$- угловые ускорения вращающихся масс приводной системы; $\dot{\varphi}_д,\dot{\varphi}_п,\dot{\varphi}_c$- угловые скорости вращающихся масс приводной системы; $\varphi_д,\varphi_п,\varphi_c$- угловое перемещение вращающихся масс приводной системы; $b_п$ — коэффициент вязкости упругой муфты; $c_п$ – коэффициент трения упругой муфты; $M_д$ - крутящий момент двигателя; i_1, i_2 - количество передач трансмиссии стенда; $\dot{x}_i,\ddot{x}_i$- линейная скорость и ускорение трактора, передних и задних колес; V_i — скорость стенда; b_i, c_i — коэффициенты вязкости и трения шин колес трактора; m_i - массы, распределенные по опорам колес трактора; $h_п$ - высота неровности дороги; $l_п$ - расстояние между неровностями дорожного полотна; f_k - коэффициент округления; r_c - радиус ведущего колеса имитатора стенда.



a *b*

Рис. 2.13- Расположение точки измерения:
а)-установка акселерометров на задний мост трактора ТТЗ-1033; b-установка акселерометров на передний мост трактора ТТЗ-1033

$\ddot{x}_i = (2\pi f)^2 \cdot A_i = (2 \cdot 3.14 \cdot 1.1)^2 \cdot A_i = 47.72 \cdot A_i$

здесь f - частота вынужденных колебаний, $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.9} = 1.1$, c^{-1}; A_i - амплитуда колебаний, м; Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 5.

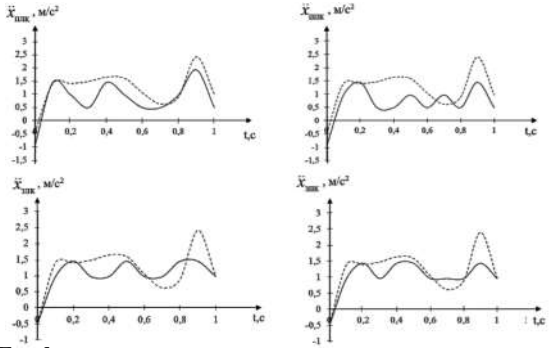


Рис. 5. Графики сравнения теоретических и экспериментальных результатов горизонтальных колебаний TTZ-1033: теоретические ------ и экспериментальные —— результаты

Горизонтальные вибрации трактора TTZ-1033, согласно результатам полевых испытаний, изменяются от 0 до 1.433 м/с².

Теоретические значения вибраций трактора TTZ-1033 удовлетворительно соответствуют экспериментальным значениям.

В третья глава диссертации «**Математическое моделирование и оптимальное управление процессом стендовых испытаний колесных тракторов»** посвящена разработке модели, алгоритма оптимального управления и оценки энергетического состояния колесных тракторов при стендовых испытаниях. По результатам полевых испытаний установлено, что система нагружения испытательного стенда обеспечивает имитацию воздействия дорожных неровностей путем создания внешних сил, действующих на испытываемый трактор при различных скоростях движения. (рис.6).

Ushbu holatlarda maksimal prinsipning chegaraviy masalasi (14) tizimdan, (9) dan kelib chiqadigan (2) va (3) chegara shartlaridan va (13) shartlardan iborat bo‘ladi.

Quyidagi shaklga ega bo‘lgan Gamilton-Pontryagin funksiyasini tuzamiz:

$$\left.\begin{aligned} H_{tr} &= \psi_0 + \psi_1 x_2 + \psi_2 \dot{x}_2; \\ H_{ochg'} &= \psi_0 + \psi_1 x_4 + \psi_2 \dot{x}_4; \\ H_{olo'g'} &= \psi_0 + \psi_1 x_6 + \psi_2 \dot{x}_6; \\ H_{orchg'} &= \psi_0 + \psi_1 x_8 + \psi_2 \dot{x}_8; \\ H_{oro'g'} &= \psi_0 + \psi_1 x_{10} + \psi_2 \dot{x}_{10}. \end{aligned}\right\}. \qquad (15)$$

Bundan kelib chiqadiki, (9) shart $u = sign\psi_2$, $\psi_2 \neq 0$ funksiyani ajratadi. Bu holda chegaraviy masala (14) quyidagilardan iborat

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u_м \ . \qquad (16)$$

u=+1, u= -1 oralig‘ida (8), (16) tadqiq qilishga o‘tamiz.

$\psi_2(t)$ funksiya $[t_0,t]$ kesimda birdan ortiq nolga ega bo‘lmasligini ko‘rsatamiz. Bunday, ya’ni $\psi_2(t) = 0$: $t \in [t_0, T]$ bo‘lmasin. Unda, agar $t \in [t_0, T]$ nuqtalarda funksiya $\psi_2(t) \neq 0$ bo‘lsa, u holda (8), doimiy $\psi_1 = -\dot{\psi}_2(t)$ bo‘lsa, bu mumkin emas. Endi t_i nuqtalaridan birida funksiya grafigi t o‘qiga tegsin. Unda $\psi_2(t) = 0$, ya’ni (9) doimiy $\psi_1 = 0$ kuchga ega. Bu yerdan

$$H \equiv 0, \qquad t_0 \le t \le T \qquad (17)$$

$\psi_0 = 0$ dan kelib chiqadi. Demak, (9), (13) ga zid bo‘lgan ayniyat mavjud

$$\psi_2(t) = 0, \quad t \in [t_0, T], \ \ \psi_1 = 0, \ \ \psi_0 = 0. \qquad (18)$$

(18) tenglik mumkin emas, chunki $\psi_2(t)$ yuqorida faqat bitta nolga ega bo‘lishi mumkinligi aniqlangan. Shunday qilib $\psi_0 \le 0$. Bunday holda, (18) dan quyidagilar kelib chiqadi

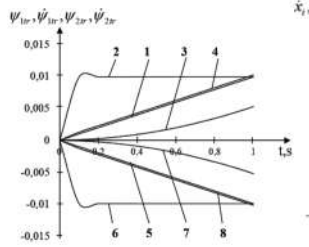
$$u_k = sign\, \psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < 1 \end{cases}, \quad k = 2,4,\ldots,2n \ . \qquad (19)$$

Ya’ni boshqarish $u_k(t)$ bitta nuqtada almashlab ulash imkoniyatiga ega.

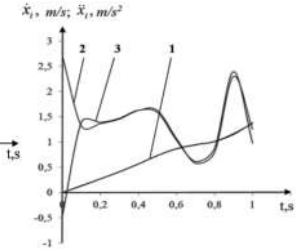
To‘rt g‘ildirakli traktorni gorizontal harakatini tadqiq qilish uchun Embarcadero Delphi XE3 dasturlash muhitida Runge-Kutta sonli usulini qo‘llab dastur vositasidan foydalanamiz. Boshlang‘ich shart *t=0* asosida hisoblash eksperimenti o‘tkazildi. 2,4- rasmlarda grafik ko‘rinishlari keltirilgan.

Hisoblash eksperimentlari traktor g‘ildiragi shinalarining bukilishlari $h_{sh}=10mm=0.01m$ bo‘lganda quyidagi parametrlarda o‘tkazilgan.

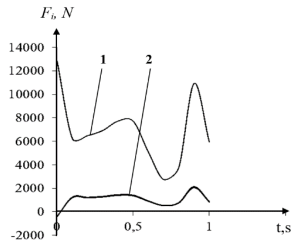
$c_{olch'g'}=877995$ *N/m;* $b_{olch'g'}=64838.85$ *Ns/m;* $c_{olo'g'}=838755$ *N/m;* $b_{olo'g'}=61940.7$ *Ns/m;* $c_{orchg'}=1496025$ *N/m;* $b_{orchg'}=110480$ *Ns/m;* $c_{oro'g'}=1446975$ *N/m;* $b_{oro'g'}=106856.8$ *Ns/m;* $m_{tr}=4750$ *kg;* $m_{olch'g'}=895$ *kg;* $m_{olo'g'}=855$ *kg;* $m_{orchg'}=1525$ *kg;* $m_{oro'g'}=1475$ *kg;* $r_{olg'}=0.43$ *m;* $r_{org'}=0.785m$; $h_q=0.07m$; $l_q=0.9м$; $V_m=1.38$ *m/s.*



2-rasm. Traktorning boshlan-g‘ich harakatining o‘tish jara-yoninidagi qo‘shma tizimni grafiklari: 1 - ψ_{1tr}, 2- $\dot{\psi}_{1tr}$; u(t)= +1 bo‘lganda; 3 - ψ_{2tr}, 4- $\dot{\psi}_{2tr}$: 5 - ψ_{1tr}, 6- $\dot{\psi}_{1tr}$; 7 - ψ_{2tr}, 8- $\dot{\psi}_{2tr}$; u(t)= -1 bo‘lganda



3-rasm. To‘rt g‘ildirakli traktorning h_{sh}=10 mm bo‘lgandagi sinash jara-yonidagi tezlik va tezla-nishlarining o‘zgarishi tavsifi: 1-tezliklar $\dot{x}_{tr}$, $\dot{x}_{olchg'}$, $\dot{x}_{olo'g'}$, $\dot{x}_{orchg'}$, $\dot{x}_{oro'g'}$; 2- traktorning tezla-nishi $\ddot{x}_{tr}$; 3- g‘ildiraklarni tezlanishi $\ddot{x}_{olchg'}$, $\ddot{x}_{olo'g'}$, $\ddot{x}_{orchg'}$, $\ddot{x}_{oro'g'}$



4-rasm. To‘rt g‘ildirakli traktorning h_{sh}=10 mm bo‘lgandagi sinash jarayonidagi kuchlarning o‘zgarishi tavsifi: 1-traktorning tortish kuchi F_{tr}; 2-g‘ildiraklardagi tortish kuchilari $F_{olchg'}$,$F_{olo'g'}$,$F_{orchg'}$,$F_{oro'g'}$

Shunday qilib, to‘rt g‘ildirakli traktorning tekis harakati boshqariladigan o‘qlarning massasi va parametrlariga bog‘liq bo‘lib, ularning qiymatlari (1) tizimning va qo‘shma tizimning (8) sonli yechimi yo‘lning berilgan notekisligida F_i, M_i va b_i, c_i, m_i, konstruktiv parametrlarining o‘zgarishi bilan aniqlanadi.

MB-Atex-2018-91 “Klirensi pog‘onasiz o‘zgartiriladigan orqa ko‘prik bilan jihozlangan universal-chopiq traktorining konstruktiv va texnologik parametrlarini ishlab chiqish” Davlat ilmiy-texnik dasturlari topshiriqlariga muvofiq to‘rt g‘ildirakli orqa ko‘prik bilan jihozlangan universal-qatorli traktorning tebranishlarini eksperimental tadqiq qilishning dala sinovlari “UzGTSITT” paxta dalalarida o‘tkazildi.

Sinov maqsadi:

- dala sharoitida TTZ-1033 traktorini tebranishlarini o‘lchash;

- TTZ-1033 traktorini tebranishlarini nazariy va eksperimental tadqiqotlar natijalarini qiyosiy tahlil qilish.

Sinovlar davomida akseleorametrlar TTZ-1033 traktorinining old va orqa ko‘priklariga o‘rnatildi.

TTZ-1033 traktorini traktorini tebranishlarini o‘lchash yuqori aniqlikdagi kuchli uch o‘qli mikro ADXL345 akselerometri bilan amalga oshirilgan (13 bit). Pozitsiyani o‘lchash diapazoni ±16 g gacha. O‘lchov natijalari qo‘shimcha kodda va SPI / I2C raqamli interfeyslari orqali 16 bitli raqamlar sifatida beriladi. Sinov natijalari 3-jadvalda keltirilgan.

O‘lchovlar quyidagi sxema bo‘yicha amalga oshirildi.

$m_{тр}$=4750 кг; $m_{плк}$=895 кг; $m_{ппк}$=855 кг; $m_{злк}$=1525 кг; $m_{зпк}$=1475 кг; $r_{пк}$=0.43 м; $r_{зк}$=0.785м; $h_{п}$=0.07м; $l_{п}$=0.9м; V_m=1.38 m/s.

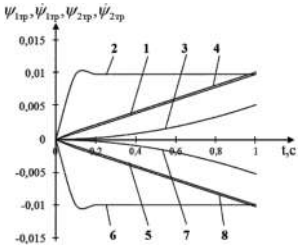


Рис.2. Графики сопряженной системы переходного процесса начального движения трактора: 1 - $\psi_{1тр}$, 2- $\dot{\psi}_{1тр}$ при u(t)= +1; 3 - $\psi_{2тр}$, 4- $\dot{\psi}_{2тр}$, 5 - $\psi_{1тр}$, 6- $\dot{\psi}_{1тр}$, 7 - $\psi_{2тр}$, 8- $\dot{\psi}_{2тр}$ при u(t)= -1

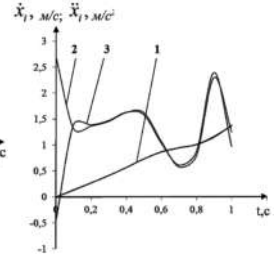


Рис. 3. Характеристика изменения скорости и ускорений четырехколесного трактора при $h_{ш}$=10 мм в процессе испытаний: 1 - скорости $\dot{x}_{тр}$, $\dot{x}_{пдк}$, $\dot{x}_{ппк}$, $\dot{x}_{злк}$, $\dot{x}_{зпк}$; 2 - ускорение трактора $\ddot{x}_{тр}$; 3 - ускорение колес $\ddot{x}_{плк}$, $\ddot{x}_{ппк}$, $\ddot{x}_{злк}$, $\ddot{x}_{зпк}$

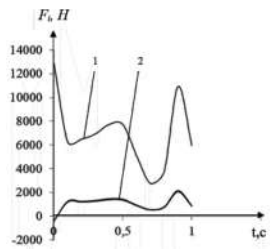


Рис.4. Описание изменения сил в процессе испытания четырехколесного трактора при $h_{ш}$=10 мм: 1-тяговая сила трактора $F_{тр}$; 2-тяговые силы на колесах $F_{плк}$, $F_{ппк}$, $F_{злк}$, $F_{зпк}$

Таким образом, прямолинейное движение четырехколесного трактора зависит от массы и параметров управляемых осей, значения которых определяются численным решением системы (1) и составной системы (8) при изменении конструктивных параметров F_i, M_i и b_i, c_i, m_i на заданном неровном пути.

В соответствии с заданиями государственной научно-технической программы MB-Atex-2018-91 «Разработка конструктивных и технологических параметров универсально-пропашного трактора с бесступенчато регулируемым задним мостом» были проведены полевые испытания для экспериментального исследования вибраций универсально-пропашного трактора с четырехколесным задним мостом на хлопковых полях “UzGTSITT”.

Цель испытания измерение вибраций трактора ТТЗ-1033 в полевых условиях и сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований вибраций трактора ТТЗ-1033.

В ходе испытаний акселерометры были установлены на передний и задний мосты трактора ТТЗ-1033. Измерение вибраций трактора ТТЗ-1033 проводилось с помощью высокоточного мощного трёхосевого микромодуля ADXL345 (13 бит) акселерометром. Диапазон измерения положения составляет до ±16 g. Результаты измерений передаются в дополнительном коде и в виде 16-битных чисел через цифровые интерфейсы SPI / I2C. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Измерения проводились согласно следующей схеме.

Обработка результатов измерения вибрации. На основе данных, приведенных в таблице 2.9, рассчитали горизонтальные вибрации по следующей формуле.

Краевая задача принципа максимума в этих случаях будет состоять из системы (14), граничных условий (2) и (3), вытекающих из (9), и условия (13).

Составим функцию Гамильтона-Понтрягина которая имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} H_{\text{тр}} &= \psi_0 + \psi_1 x_2 + \psi_2 \dot{x}_2; \\ H_{\text{плк}} &= \psi_0 + \psi_1 x_4 + \psi_2 \dot{x}_4; \\ H_{\text{ппк}} &= \psi_0 + \psi_1 x_6 + \psi_2 \dot{x}_6; \\ H_{\text{злк}} &= \psi_0 + \psi_1 x_8 + \psi_2 \dot{x}_8; \\ H_{\text{зпк}} &= \psi_0 + \psi_1 x_{10} + \psi_2 \dot{x}_{10}. \end{aligned}\right\} \quad (15)$$

Отсюда ясно, что условие (9) выделит функцию $u = sign\,\psi_2,\ \psi_2 \neq 0.$ Краевая задача (14) в этом случае состоит из

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u_{\text{м}}. \quad (16)$$

Переходим к исследованию (8), (16) в пределах *u=+1, u= -1.*

Покажем, что функция $\psi_2(t)$ не может иметь более одного нуля на отрезке [t_0,t]. Пусть это не так, т.е. $\psi_2(t) = 0:\ t \in [t_0, T]$. Тогда, если в точках $t \in [t_0, T]$ функция $\psi_2(t) \neq 0$, то в силу (8) постоянная $\psi_1 = -\dot{\psi}_2(t)$, это невозможно. Пусть теперь в одной из точек t_i график функции касается оси *t*. Тогда $\psi_2(t) = 0$, т.е. в силу (9) постоянная $\psi_1 = 0$. Отсюда

$$H \equiv 0, \qquad t_0 \le t \le T \quad (17)$$

следует, что $\psi_0 = 0$. Значит, должно иметь место тождество

$$\psi_2(t) = 0, \quad t \in [t_0, T], \quad \psi_1 = 0, \quad \psi_0 = 0. \quad (18)$$

что противоречит (9), (13).

Равенства (18) невозможны, поскольку выше установлено, что $\psi_2(t)$ может иметь лишь один ноль. Таким образом $\psi_0 \le 0$. В этом случае из (18) следует что

$$u_k = sign\,\psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < 1 \end{cases}, \quad k=2,4,\ldots,2n, \quad (19)$$

т.е. управление $u_k(t)$ может иметь только одну точку переключения.

Для исследования горизонтального движения четырехколесного трактора проведем вычислительный эксперимент с использованием программного средства, реализующий численное решение методом Рунге-Кутты в среде программирования Embarcadero Delphi XE3. Расчетный эксперимент проводился при начальных условиях *t=0.* Графические представления представлены на рисунках 2 и 4.

Вычислительные эксперименты проводились при следующих параметрах, когда прогиб шин колес трактора составил $h_{\text{ш}}$=*10 мм = 0,01 м*: $c_{\text{плк}}$=*877995 Н/м;* $b_{\text{плк}}$=*64838.85 Нс/м;* $c_{\text{ппк}}$=*838755 Н/м;* $b_{\text{ппк}}$=*61940.7 Нс/м;* $c_{\text{злк}}$=*1496025 Н/м;* $b_{\text{злк}}$=*110480 Нс/м;* $c_{\text{зпк}}$=*1446975 Н/м;* $b_{\text{зпк}}$=*106856.8 Нс/м;*



a *b*

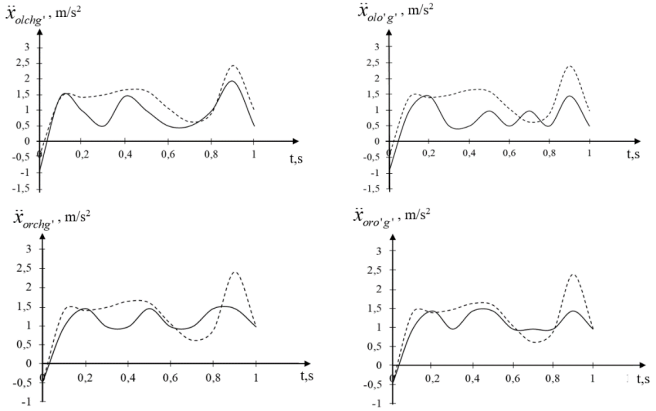
2.13-rasm. O‘lchov nuqtasining joylashuvi:
a-TTZ-1033 traktorini orqa ko‘prikgiga akselerometrlarni o‘rnatish; b-TTZ-1033 traktorini oldingi ko‘prikgiga akselerometrlarni o‘rnatish

Tebranishni o‘lchash natijalarini qayta ishlash. 2.9- jadvalda berilgan ma’lumotlar asosida quyidagi formula bo‘yicha gorizontal tebranishlarini hisoblab chiqamiz.

$$\ddot{x}_i = (2\pi f)^2 \cdot A_i = (2 \cdot 3.14 \cdot 1.1)^2 \cdot A_i = 47.72 \cdot A_i$$

bu yerda *f*- majburiy tebranishlar chastotasi, $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.9} = 1.1$, s^{-1}; A_i-tebranishlar amplitudasi, *m*;

Hisoblash natijalari 5-rasmda grafik ko‘rinishlari keltirilgan.



5- rasm TTZ-1033 gorizontal tebranishlarini nazariy va eksperimental natijalarni solishtirish grafikalari:

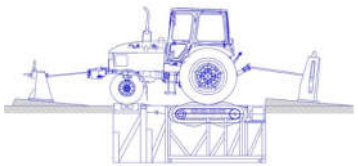
nazariy ---------va eksperiment——— natijalar

TTZ-1033 traktorining gorizontal tebranishlarini dala sinovlari natijalariga ko‘ra 0 dan 1.433 m/s² gacha o‘zgaradi.

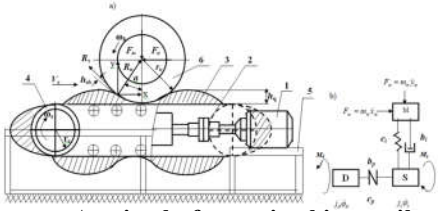
TTZ-1033 tebranishlarining nazariy qiymatlari eksperimental qiymatlarga qoniqarli darajada mos keladi.

Dissertatsiyaning **“G‘ildirakli traktorlarni stendda sinash jarayonini matematik modellashtirish va optimal boshqarish”** deb nomlangan uchinchi bobida g‘ilidirakli traktorlarni stendda sinash jarayonini modellashtirish, optimal

boshqarish va energetik holatini baholash algoritmlarini ishlab chiqilgan. Dala sharoitida o‘tkazilgan sinash natijalari bo‘yicha sinash stendida yuklantirish tizimi traktorning turli harakat tezliklarida va sinalayotgan traktorga ta’sir qiluvchi tashqi kuchlarni hosil qilish uchun notekis yo‘l sharoitini imitatsiya qilishga mo‘ljallangan (6-rasm).



6-rasm. Sinash stendining umumiy ko‘rinishi



7-rasm. Asosiy platformaning kinematik sxemasi (a) va dinamik modeli (b)

Asosiy platforma dvigatel-1, bikr mufta-2 orqali kardanli mexanizm bilan ulangan stendning transmissiyasi -4 va traktor g‘ildiraklarini -6 yuklantiruvchi notekis yo‘l sharoiti imitatori-3 dan tashkil topgan. Asosiy va oldingi platformalar umumiy karkasga qotirilgan (7-rasm).

Sinash jarayonlarini matematik modelini 7-rasmda keltirilgan dinamik modellar sxemasi asosida ikkinchi tur Lagranj tenglamasidan foydalanib sinash jarayonini matematik modelini tuzamiz

$$\left.\begin{aligned}
&j_d\ddot{\varphi}_d = M_d - b_m(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_m) - c_p(\varphi_d - \varphi_m);\\
&j_p\ddot{\varphi}_p = b_m(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_m) + c_p(\varphi_d - \varphi_m) - i_2 j_s\ddot{\varphi}_s;\\
&j_s\ddot{\varphi}_s = i_1 j_s\ddot{\varphi}_p - f_k r_s(m_{olchg'}\ddot{x}_{olchg'} + m_{olo'g'}\ddot{x}_{olo'g'} + m_{orchg'}\ddot{x}_{ochg'} + m_{oro'g'}\ddot{x}_{oro'g'});\\
&m_{olchg'}\ddot{x}_{olchg'} = b_{olchg'}(r_s\dot{\varphi}_s - \dot{x}_{olchg'}) + c_{olchg'}(r_s\varphi_s - x_{olchg'}) + m_{olchg'}\frac{2\pi^2 r_s\dot{\varphi}_s^2}{l_q^2}h_q\sin\frac{2\pi r_s\dot{\varphi}_s}{l_q}t;\\
&m_{olo'g'}\ddot{x}_{olo'g'} = b_{olo'g'}(r_s\dot{\varphi}_s - \dot{x}_{olo'g'}) + c_{olo'g'}(r_s\varphi_s - x_{olo'g'}) + m_{olo'g'}\frac{2\pi^2 r_s\dot{\varphi}_s^2}{l_q^2}h_q\sin\frac{2\pi r_s\dot{\varphi}_s}{l_q}t;\\
&m_{orchg'}\ddot{x}_{orchg'} = b_{orchg'}(r_s\dot{\varphi}_s - \dot{x}_{orchg'}) + c_{orchg'}(r_s\varphi_s - x_{orchg'}) + m_{orchg'}\frac{2\pi^2 r_s\dot{\varphi}_s^2}{l_q^2}h_q\sin\frac{2\pi r_s\dot{\varphi}_s}{l_q}t;\\
&m_{oro'g'}\ddot{x}_{oro'g'} = b_{oro'g'}(r_s\dot{\varphi}_s - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'g'}(r_s\varphi_s - x_{oro'g'}) + m_{oro'g'}\frac{2\pi^2 r_s\dot{\varphi}_s^2}{l_q^2}h_q\sin\frac{2\pi r_s\dot{\varphi}_s}{l_q}t
\end{aligned}\right\} \quad (21)$$

bu yerda j_d, j_p, j_s – yuritish tizimi aylanma harakat qiluvchi massalarining inersiya momentlari; $\ddot{\varphi}_d, \ddot{\varphi}_p, \ddot{\varphi}_s$ – yuritish tizimi aylanma harakat qiluvchi massalarining burchak tezlanishlari; $\dot{\varphi}_d, \dot{\varphi}_p, \dot{\varphi}_s$ – yuritish tizimi aylanma harakat qiluvchi massalarining burchak tezliklari; $\varphi_d, \varphi_p, \varphi_s$ – yuritish tizimi aylanma harakat qiluvchi massalarining burchakli ko‘chishi; b_p – elastik muftaning qovushqoqlik

$$\left.\begin{aligned}
&x_{\text{тр}} = x_1, \dot{x}_{\text{тр}} = x_2,\ \dot{x}_2 = u_{\text{тр}} - m_{\text{тр}}^{-1}[b_{\text{плк}}(x_2 - x_4) - c_{\text{плк}}(x_1 - x_3) - b_{\text{ппк}}(x_2 - x_6) -\\
&\qquad - c_{\text{ппк}}(x_1 - x_5) - b_{\text{злк}}(x_2 - x_8) - c_{\text{злк}}(x_1 - x_7) -\\
&\qquad - b_{\text{зпк}}(x_2 - x_{10}) - c_{\text{зпк}}(x_1 - x_9)];\\
&x_{\text{плк}} = x_3, \dot{x}_{\text{плк}} = x_4,\ \dot{x}_4 = m_{\text{плк}}^{-1}[b_{\text{плк}}(x_2 - x_4) + c_{\text{плк}}(x_1 - x_3)] + u_{\text{плк}};\\
&x_{\text{ппк}} = x_5, \dot{x}_{\text{ппк}} = x_6,\ \dot{x}_6 = m_{\text{ппк}}^{-1}[b_{\text{ппк}}(x_2 - x_6) + c_{\text{ппк}}(x_1 - x_5)] + u_{\text{ппк}};\\
&x_{\text{злк}} = x_7, \dot{x}_{\text{злк}} = x_8,\ \dot{x}_8 = m_{\text{злк}}^{-1}[b_{\text{злк}}(x_2 - x_8) + c_{\text{злк}}(x_1 - x_7)] + u_{\text{злк}};\\
&x_{\text{зпк}} = x_9, \dot{x}_{\text{зпк}} = x_{10},\ \dot{x}_{10} = m_{\text{зпк}}^{-1}[b_{\text{зпк}}(x_2 - x_{10}) + c_{\text{зпк}}(x_1 - x_9)] + u_{\text{зпк}}.
\end{aligned}\right\}, \quad (10)$$

Так как, если $f^0 \equiv 1$, $g^0 \equiv 0$, то $J(q_0, u(t), q(t)) = T - t_0$ - в этом случае задачу (4)-(6) называют задачей быстродействия.

Рассматриваемый объект является стационарной системой и задача (4) означает, что f и U не зависят явно от времени, т.е.

$$f(t,q,u) = f(q,u), \quad U(t) = U. \quad (11)$$

Если стационарные задачи (4), (11) имеет оптимальное управление $u(t)$ и оптимальную траекторию $q_0(t)$, то существует ненулевой вектор сопряженных переменных $(\psi_1(t), \psi_2(t))$, $\psi(t) \in R^n$ удовлетворяющий условиям (7), т.е. выполнено условие максимума (9)

$$\psi_0(t) = const \le 0. \quad (12)$$

Так как сопряженная система (10) является однородной относительно ψ_i, и можно произвольным образом выбрать константу в уравнении (12) так, что

$$\psi_0(t) = -1 \qquad 0 \le t \le T. \quad (13)$$

Из условий $\max\limits_{|u|\prec 1} H$ следует $u = sign\,\psi_2$ при $\psi_2 \neq 0$. Тогда краевая задача принципа максимума запишется в виде для горизонтального движения четырехколесного трактора:

$$\left.\begin{aligned}
&x_{\text{тр}} = x_1, \dot{x}_{\text{тр}} = x_2,\ \dot{x}_2 = sign\psi_{2\text{тр}} - m_{\text{тр}}^{-1}[b_{\text{плк}}(x_2 - x_4) - c_{\text{плк}}(x_1 - x_3) - b_{\text{ппк}}(x_2 - x_6) -\\
&\qquad - c_{\text{ппк}}(x_1 - x_5) - b_{\text{злк}}(x_2 - x_8) - c_{\text{злк}}(x_1 - x_7) -\\
&\qquad - b_{\text{зпк}}(x_2 - x_{10}) - c_{\text{зпк}}(x_1 - x_9)];\\
&x_{\text{плк}} = x_3, \dot{x}_{\text{плк}} = x_4,\ \dot{x}_4 = m_{\text{плк}}^{-1}[b_{\text{плк}}(x_2 - x_4) + c_{\text{плк}}(x_1 - x_3)] + sign\psi_{2\text{плк}};\\
&x_{\text{ппк}} = x_5, \dot{x}_{\text{ппк}} = x_6,\ \dot{x}_6 = m_{\text{ппк}}^{-1}[b_{\text{ппк}}(x_2 - x_6) + c_{\text{ппк}}(x_1 - x_5)] + sign\psi_{2\text{ппк}};\\
&x_{\text{злк}} = x_7, \dot{x}_{\text{злк}} = x_8,\ \dot{x}_8 = m_{\text{злк}}^{-1}[b_{\text{злк}}(x_2 - x_8) + c_{\text{злк}}(x_1 - x_7)] + sign\psi_{2\text{злк}};\\
&x_{\text{зпк}} = x_9, \dot{x}_{\text{зпк}} = x_{10},\ \dot{x}_{10} = m_{\text{зпк}}^{-1}[b_{\text{зпк}}(x_2 - x_{10}) + c_{\text{зпк}}(x_1 - x_9)] + sign\psi_{2\text{зпк}}.
\end{aligned}\right\}, \quad (14)$$

$$x_i(t) = x_0(t), \qquad \dot{x}_i(t) = \dot{x}_0(t) \ \ (i = \overline{1,n}), \ 0 \le t \le T. \tag{3}$$

В этом случае требуется, чтобы время переходного процесса было минимальным. При этом управление направлено на минимизацию функционала на основе условий (2) и (3).

$$J(x_0, u(t), x(t)) = \int_{t_0}^{T} f^0(x(t), u(t), t)dt \,. \tag{4}$$

В условиях (2), (3)

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \tag{5}$$

$$u \in U, \qquad t_0 \le t \le T, \tag{6}$$

где *f (...)* – непрерывно, дифференцируемая функция; *u(t)* – кусочно-непрерывная функция в отрезке [t_0, T].

При исследовании необходимых условий оптимального управления движением четырехколесного трактора воспользуемся принципом максимума Понтрягина.

Для формулировки принципа максимума введем функцию Гамильтона-Понтягина

$$H = (x, u, t, \psi_i, \psi_0) = -f^0(x, u, t) + \langle \psi, u \rangle \tag{7}$$

и сопряжённую система

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d\psi_{1\text{тр}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{тр}}}{\partial x_1} = -m_{\text{тр}}^{-1}(c_{\text{плк}} + c_{\text{ппк}} + c_{\text{злк}} + c_{\text{зпк}})\psi_2;\\
&\frac{d\psi_{2\text{тр}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{тр}}}{\partial x_2} = -\psi_{1\text{тр}} + m_{\text{тр}}^{-1}(b_{\text{плк}} + b_{\text{ппк}} + b_{\text{злк}} + b_{\text{зпк}})\psi_{2\text{тр}};\\
&\frac{d\psi_{1\text{плк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{плк}}}{\partial x_3} - m_{\text{плк}}^{-1}c_{\text{плк}}\psi_{2\text{плк}}, \ \frac{d\psi_{2\text{плк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{плк}}}{\partial x_4} = -\psi_{1\text{плк}} + m_{\text{плк}}^{-1}b_{\text{плк}}\psi_{2\text{плк}};\\
&\frac{d\psi_{1\text{ппк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{ппк}}}{\partial x_5} = -m_{\text{ппк}}^{-1}c_{\text{ппк}}\psi_{2\text{ппк}}, \ \frac{d\psi_{2\text{ппк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{ппк}}}{\partial x_6} = -\psi_{1\text{ппк}} + m_{\text{ппк}}^{-1}b_{\text{ппк}}\psi_{2\text{ппк}};\\
&\frac{d\psi_{1\text{злк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{злк}}}{\partial x_3} - m_{\text{злк}}^{-1}c_{\text{злк}}\psi_{2\text{злк}}, \ \frac{d\psi_{2\text{злк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{злк}}}{\partial x_4} = -\psi_{1\text{злк}} + m_{\text{злк}}^{-1}b_{\text{злк}}\psi_{2\text{злк}};\\
&\frac{d\psi_{1\text{зпк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{зпк}}}{\partial x_5} = -m_{\text{зпк}}^{-1}c_{\text{зпк}}\psi_{2\text{зпк}}, \ \frac{d\psi_{2\text{зпк}}}{dt} = -\frac{\partial H_{\text{зпк}}}{\partial x_6} = -\psi_{1\text{зпк}} + m_{\text{зпк}}^{-1}b_{\text{зпк}}\psi_{2\text{зпк}}
\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

с ограничением на управление $|u| \le 1$.

Для решения рассматриваемой задачи должно выполняться следующие необходимое условие:

$$H(x_i(t), u(t), t, \psi_i, \psi_0) = \max_{u \in U} H(x_i(t), u, t, \psi_i(t), \psi_0). \tag{9}$$

определению оптимального управления на основе (7), мы сформируем функцию для горизонтального движения четырехколесного трактора:

koeffitsiyenti; c_p – elastik muftaning bikrlik koeffitsiyenti; M_d - dvigatelni harakatlantiruvchi momenti; i_1, i_2 - stend transmissiyasining uzatishlar soni; $\dot{x}_i, \ddot{x}_i$ – traktorning, yetakchi va yetaklanuvchi g‘ildiraklarining chiziqli tezligi va tezlanishi; V_i – stendning tezligi; b_i, c_i – traktor g‘ildiraklari shinalarining qovushqoqlik va bikrlik koeffitsiyentlari; m_i – traktor g‘ildirak tayanchlari bo‘yicha taqsimlangan massalar; h_q – notekis yo‘l balandligi; l_q – notekis yo‘l balandliklari orasidagi masofa; f_k – yumalash koeffitsiyenti; r_s – stend imitatorining yetakchi g‘ildiragining radiusi.

Olingan (21) tenglama asosida sinash jarayonini optimal boshqarish algoritmini ishlab chiqamiz. Optimal boshqarish algoritmi 2-bobdagi ketma-ketlik asosida amalga oshirilgan. Shining uchun to‘liq keltirmaymiz.

Sinash tizimini vaqtning boshlang‘ich holatidagi ko‘rinishda quyidagicha bo‘lsin

$$\varphi_i(0) = \varphi_0(0), \qquad \dot{\varphi}_i(0) = \dot{\varphi}_0(0), \qquad V_i(0) = V_0(0) \ . \tag{22}$$

Shunday *u(t)* boshqarishni topish kerakki, sinash tizimi harakatini boshlang‘ich holatdan berilgan holatga olib o‘tsin:

$$\varphi_i(t) = \varphi_0(t), \qquad \dot{\varphi}_i(t) = \dot{\varphi}_0(t), \ \ V_i(t) = V_0(t), \ \ 0 \le t \le T \qquad (i = \overline{1,n}) \ . \tag{23}$$

Bunda o‘tish jarayoni vaqti qisqa bo‘lishi talab qilinadi. U holda boshqarishdan maqsad funksionalni (22) va (23) shartlar asosida minimumga keltiriladi

$$J(\varphi_0, u(t), \varphi(t)) = \int_{t_0}^{T} f^0(\varphi(t), u(t), t)dt. \tag{24}$$

(22), (23) shartlarda

$$\dot{\varphi}_i(t) = f(\varphi_i(t), u(t), t), \tag{25}$$

$$u \in U, \qquad t_0 \le t \le T \ , \tag{26}$$

bu yerda *f(...)*–uzluksiz, differensiallanuvchi funksiya; u(t)–[t0,T] oraliqdagi bo‘lakli-uzluksiz funksiya.

Maksimum prinsipini shakllantirish uchun Gamilton-Pontryagin funksiyasini

$$H = (\varphi, u, t, \psi_i, \psi_0) = -f^0(\varphi, u, t) + \langle \psi, u \rangle \tag{27}$$

va qo‘shma tizim

$$
\left.\begin{aligned}
&\frac{d\psi_{1d}}{dt}=-\frac{\partial H_d}{\partial x_1}=-j_d^{-1}\psi_{2d},\quad \frac{d\psi_{2d}}{dt}=-\frac{\partial H_d}{\partial x_2}=-\psi_{1d}+j_d^{-1}\psi_2;\\
&\frac{d\psi_{1p}}{dt}=-\frac{\partial H_p}{\partial x_3}=-j_p{}^{-1}c_p\psi_{2p},\quad \frac{d\psi_{2p}}{dt}=-\frac{\partial H_p}{\partial x_4}=-\psi_{1p}+j_p{}^{-1}b_p\psi_{2p};\\
&\frac{d\psi_{1s}}{dt}=-\frac{\partial H_s}{\partial x_5}=-j_s^{-1}\psi_{2s},\quad \frac{d\psi_{2s}}{dt}=-\frac{\partial H_s}{\partial x_6}=-\psi_{1s}+j_s^{-1}\psi_{2s};\\
&\frac{d\psi_{1olchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olchg'}}{\partial x_7}=-m_{olchg'}{}^{-1}c_{olchg}\psi_{2olchg'},\quad \frac{d\psi_{2olchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olchg'}}{\partial x_8}=-\psi_{1olchg'}+m_{olchg'}{}^{-1}b_{olchg}\psi_{2olchg'};\\
&\frac{d\psi_{1olo'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olo'g'}}{\partial x_9}=-m_{olo'g'}{}^{-1}c_{olo'g}\psi_{2olo'g'},\quad \frac{d\psi_{2olo'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{olo'g'}}{\partial x_{10}}=-\psi_{1olo'g'}+m_{olo'g'}{}^{-1}b_{olo'g}\psi_{2olo'g'};\\
&\frac{d\psi_{1orchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{orchg'}}{\partial x_{11}}=-m_{orchg'}{}^{-1}c_{orchg}\psi_{2orchg'},\quad \frac{d\psi_{2orchg'}}{dt}=-\frac{\partial H_{orchg'}}{\partial x_{12}}=-\psi_{1orchg'}+m_{orchg'}{}^{-1}b_{orchg}\psi_{2orchg'};\\
&\frac{d\psi_{1oro'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{oro'g'}}{\partial x_{13}}=-m_{oro'g'}{}^{-1}c_{oro'g}\psi_{2oro'g'},\quad \frac{d\psi_{2ro'g'}}{dt}=-\frac{\partial H_{oro'g'}}{\partial x_{14}}=-\psi_{1oro'g'}+m_{oro'g'}{}^{-1}b_{oro'g}\psi_{2oro'g'}
\end{aligned}\right\}\quad (28)
$$

boshqaruvga $|u|\le 1$ chegara qo‘yib kiritamiz.

$\psi_2\neq 0$ da $\max\limits_{|u|\le 1} H$ shartidan $u=sign\psi_2$ kelib chiqadi, agar $\psi_2\neq 0$ bo‘lsa, unda maksimum prinsipining chegaraviy masalasi quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$
\left.\begin{aligned}
&\varphi_d=x_1,\dot\varphi_d=x_2,\dot x_2=sign\psi_{2d}-j_d^{-1}[b_p(x_2-x_4)-c_p(x_1-x_3);\\
&\varphi_p=x_3,\dot\varphi_p=x_4,\dot x_4=j_p^{-1}[b_p(x_2-x_4)+c_p(x_1-x_3)]-signi_2\psi_{2p};\\
&\varphi_s=x_5,\dot\varphi_s=x_6,\dot x_6=signi_1\psi_{2p}-f_k signi_2\psi_{2s};\\
&x_{olchg'}=x_7,\dot x_{olchg'}=x_8,\dot x_8=m_{olchg'}{}^{-1}[b_{olchg'}(r_s x_6-x_8)+c_{olchg'}(r_c x_5-x_7)]-sign\psi_{2olchg'};\\
&x_{olo'g'}=x_9,\dot x_{olo'g'}=x_{10},\dot x_{10}=m_{olo'g'}{}^{-1}[b_{olo'g'}(r_s x_6-x_{10})+c_{olo'g'}(r_s x_5-x_9)]-sign\psi_{2olo'g'};\\
&x_{orchg'}=x_{11},\dot x_{orchg'}=x_{12},\dot x_{12}=m_{orchg'}{}^{-1}[b_{orchg'}(r_s x_6-x_{12})+c_{orchg'}(r_s x_5-x_{11})]-sign\psi_{2orchg'};\\
&x_{oro'g'}=x_{13},\dot x_{oro'g'}=x_{14},\dot x_{14}=m_{oro'g'}{}^{-1}[b_{oro'g'}(r_s x_6-x_{14})+c_{oro'g'}(r_s x_5-x_{13})]-sign\psi_{2oro'g'}.
\end{aligned}\right\}\quad (29)
$$

Bu holda boshqarish quyidagilardan iborat

$$
u_k=sign\psi_2(t)=\begin{cases}1, & \psi_2(t)>1\\ -1, & \psi_2(t)<1\end{cases},\quad k=2,4,\ldots,2n \qquad (30)
$$

o‘rinli, ya’ni boshqarish $u_k(t)$ bitta nuqtada almashlab ulash imkoniyatiga ega.

Sinash tizimi harakatini tadqiq qilish uchun Runge-Kutta sonli usulini qo‘llab $t=0$ boshlang‘ich shart asosida hisoblash eksperimenti o‘tkazildi va grafiklar ko‘rinishida olindi.

Hisoblash eksperimentlari $h_{sh}=10mm=0.01m$ da parametrlarning quyidagi qiymatlarida o‘tkazilgan: $M_d=315.8$ Nm; $c_p=9450.07$ Nm/rad; $b_p=7.7$ Nms/rad; $j_d=1.1$ Nms^2; $j_p=0.9$ Nms^2; $j_s=1.68$ Nms^2; $c_{olch'g'}=877995$ Nm/rad; $b_{olch'g'}=64838.85$ Ns/m; $c_{olo'g'}=838755$ Nm/rad; $b_{olo'g'}=61940.7$ Ns/m; $c_{orchg'}=1496025$ N/m; $b_{orchg'}=110480$ Ns/m; $c_{oro'g'}=1446975$ N/m; $b_{oro'g'}=106856.8$ Ns/m;

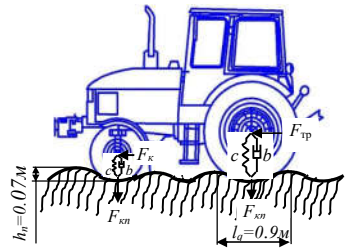


Рис.1. Схема динамической модели трактора

В соответствии с расчетной схемой составлена обобщенная математическая модель движения трактора в полевых условиях с использованием уравнений Лагранжа второго рода:

$$
\left.\begin{aligned}
&m_{тр}\ddot x_{тр}=F_{тр}-b_{плк}(\dot x_{тр}-\dot x_{плк})-c_{плк}(x_{тр}-x_{плк})-b_{ппк}(\dot x_{тр}-\dot x_{ппк})-c_{ппк}(x_{тр}-x_{ппк})-\\
&\quad -b_{злк}(\dot x_{тр}-\dot x_{злк})+c_{злк}(x_{тр}-x_{злк})-b_{зпк}(\dot x_{тр}-\dot x_{зпк})+c_{зпк}(x_{тр}-x_{зпк});\\
&m_{плк}\ddot x_{плк}=b_{плк}(\dot x_{тр}-\dot x_{плк})+c_{плк}(x_{тр}-x_{плк})+m_{плк}\frac{2\pi^2V_{плк}^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi V_{плк}}{l_п}t;\\
&m_{ппк}\ddot x_{ппк}=b_{ппк}(\dot x_{тр}-\dot x_{ппк})+c_{ппк}(x_{тр}-x_{ппк})+m_{ппк}\frac{2\pi^2V_{ппк}^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi V_{ппк}}{l_п}t;\\
&m_{злк}\ddot x_{злк}=b_{злк}(\dot x_{тр}-\dot x_{злк})+c_{злк}(x_{тр}-x_{злк})+m_{злк}\frac{2\pi^2V_{злк}^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi V_{злк}}{l_п}t;\\
&m_{зпк}\ddot x_{зпк}=b_{зпк}(\dot x_{тр}-\dot x_{зпк})+c_{зпк}(x_{тр}-x_{зпк})+m_{зпк}\frac{2\pi^2V_{зпк}^2}{l_п^2}h_п\sin\frac{2\pi V_{зпк}}{l_п}t;
\end{aligned}\right\}\quad (1)
$$

где $F_{тр}$ – тяговое усилие трактора; $\dot x_i$ и $\ddot x_i$ – линейная скорость и ускорение передних и задних колес трактора; $b_{плк}$, $b_{ппк}$, $b_{злк}$, $b_{зпк}$, $c_{плк}$, $c_{ппк}$, $c_{злк}$, $c_{зпк}$ – коэффициенты вязкости и жесткости шин передних левых и правых, задних левых и правых колес трактора; $m_{тр}$, $m_{плк}$, $m_{ппк}$, $m_{злк}$, $m_{зпк}$ – распределение массы по трактору и переднему левому и правому, заднему левому и правому колесам; $h_п$ – высота неровностей дороги; $l_п$ – расстояния между неровностями.

Сформируем алгоритм оптимального управления на основе дифференциального уравнения четырехколесного трактора. Для решения задачи используем теорию оптимальных систем и принцип максимума Понтрягина.

Здесь задача быстродействия играет важную роль в качестве критерия. Сформируем задачу оптимального управления. Пусть в начальный момент четырехколесный трактор находится в состоянии:

$$
x_i(0)=x_0(0),\qquad \dot x_i(0)=\dot x_0(0)\,. \qquad (2)
$$

Необходимо найти такое управление $u(t)$, чтобы движение четырехколесного трактора перешло из начального состояния в заданное состояние.

практику, сведения об опубликованных работах и структура диссертации.

Первая глава диссертации **«Системный анализ современных методов исследования и управления процессами испытаний машин»** состоит из трёх параграфов. В ней представлены, что поиск решений для обеспечения качества, эффективной работы и конкурентоспособности новых машин и тракторов является одним из необходимых условий их создания.

В последние годы наметилась взаимосвязь между диагностикой, испытаниями, управлением и контролем машин и оборудования. Начали формироваться направления развития методических указаний по автоматизированным системам диагностики, испытаний, управления и контроля. Основным преимуществом этого направления является высокая надежность результатов с первого дня эксплуатации средств.

Одной из основных задач системы мониторинга является создание высокоэффективных систем испытаний для проверки качества машин и тракторов, правильности сборки их отдельных узлов, а также соответствия результатов испытаний машин и тракторов установленными техническими условиями.

В 1.1-параграфе представлен системный анализ современных методов исследования и управления процессами испытаний машин и тракторов.

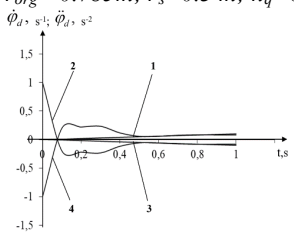
В 1.2-параграфе приведен анализ современных систем испытаний машин. Проанализированы строгие требования, предъявляемые к самым современным испытательным центрам в области сельскохозяйственного машиностроения в Европе.

В 1.3-параграфе представлена общая структура моделирования и управления процессами испытаний колесных тракторов. Предлагаемая многоуровневая система включает математическое моделирование и выбор оптимальных вариантов решения на основе численных методов для исследуемого объекта, получения и анализа информации, а также динамических процессов, происходящих в системе оптимизации и испытаний. Одним из таких подходов является применение графических и информационных методов моделирования методологии IDEF (Integrated Computer-Aided Manufacturing Definition - определение интегрированных компьютерных технологий производства) с целью совершенствования моделирования процессов испытаний, алгоритмизации диагностики, оценки состояния, управления и методов передачи информации.

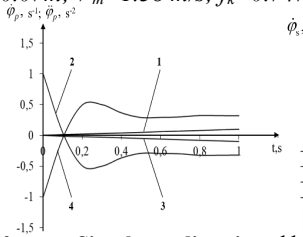
В 1.4-параграфе изложены цель и задачи исследования. Представлены задачи многоэтапного математического моделирования, оптимального управления, оценки энергетического состояния и испытаний колесных тракторов.

Вторая глава диссертации «**Математическое моделирование и оптимальное управление движением колесных тракторов в условиях неровной дороги**» посвящена разработке математической модели движения трактора в полевых условиях с использованием уравнений Лагранжа второго рода (рис. 1).

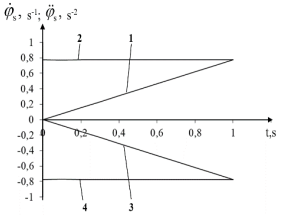
$m_{olch'g'}$=895 kg; $m_{olo'g'}$=855 kg; $m_{orchg'}$=1525 kg; $m_{oro'g'}$=1475 kg; $r_{olg'}$=0.43 m; $r_{org'}$=0.785m; r_s=0.3 m; h_q=0.07m; V_m=1.38 m/s; f_k=0.7475; i_1=22.28; i_2=0.045.



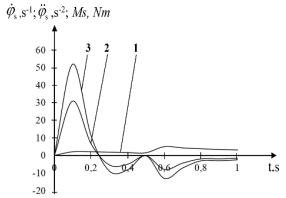
9-rasm. Sinash stendi dvigatelining o‘tish jarayonidagi grafigi: burchak tezligi 1- u(t)= + 1 bo‘lganda; 3 - u(t)= - 1 bo‘lganda; burchak tezlanishishi 2- u(t)= + 1 bo‘lganda; 4 - u(t)= - 1 bo‘lganda



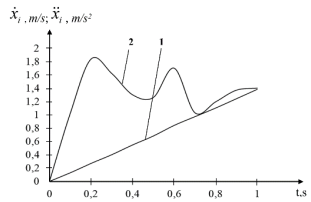
10-rasm. Sinash stendi yuritmasining o‘tish jarayonidagi grafigi: burchak tezligi 1- u(t)= + 1 bo‘lganda; 3 - u(t)= - 1 bo‘lganda; burchak tezlanishishi 2- u(t)= + 1 bo‘lganda; 4 - u(t)= - 1 bo‘lganda



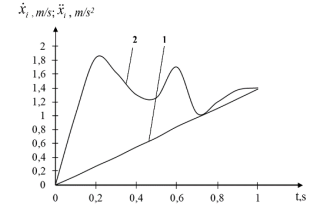
11-rasm. Sinash stendini yuklantirish imitatorining o‘tish jarayonidagi grafigi: burchak tezligi 1- u(t)= + 1 bo‘l-ganda; 3 - u(t)= - 1 bo‘l-ganda; burchak tezlashishi 2- u(t)= + 1 bo‘lganda; 4 - u(t)= - 1 bo‘lganda



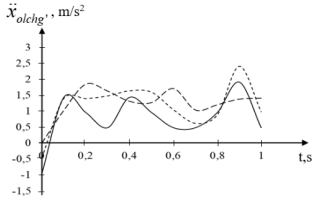
12-rasm. Traktorni sinash jarayonida stendning yuklantiruvchi imitatirini 1- burchak tezligi, 2- burchak tezlanishi va 3-harakatlantiruvchi momenning o‘zgarishi grafigi

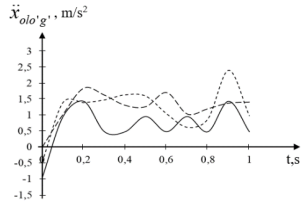


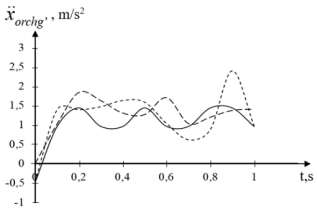
13-rasm. Traktorni sinash jarayonidagi g‘ildiraklarini 1- tezlik va 2- tezlanishning o‘zgarishi grafigi

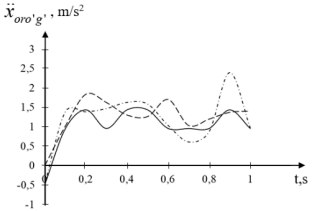


14-rasm. Traktorni sinash jarayonidagi tortish kuch-larining o‘zgarishi grafigi: 1- oldi chap g‘il-dirak, 2- oldi o‘ng g‘ildirak, 3-orqa chap g‘ildirak, 4- or-qa o‘ng g‘ildirak









15-rasm. TTZ-1033 gorizontal tebranishlarini nazariy va eksperimental natijalarni solishtirish grafikalari:dala ---------- sharoitidagi, stendda sinash jarayonlar -------va eksperiment ————natijalari

Sinash tizimining energetik holatini baholovchi algoritmni keltiramiz.

$$|P_b - P_h| \le \varepsilon, \tag{19}$$

bu yerda, P_b – sinash stendining berilgan quvvati, kVt; P_h – sinash jarayonining hisoblangan qiymati; ($\forall \varepsilon\,(0<\varepsilon<1)$ – kichik qiymat.

Gamilton funksiyasining to‘liq differensialidan foydalanib sinash stendining energetik holatni baholash tenglamalamasini tuzamiz

$$\frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\left(-\frac{\partial H}{\partial q_i} + Q_i\right)\dot{q}_i = \sum_{i=1}^{n} Q_i\,\dot{q}_i. \tag{20}$$

Umumlashgan kuch Q_i ni ($q_i = \varphi_i, x_i$)va quvvat sarfini aniqlaymiz (16-rasm).

$$Q_d = M_d = j_d\ddot{\varphi}_d;\ \ Q_p = M_p = j_p\ddot{\varphi}_p;\ \ Q_s = M_s = j_s\ddot{\varphi}_s;$$

$$Q_{tr} = F_{tr} = m_{tr}\ddot{x}_{tr};\ Q_{olchg'} = F_{olchg'} = m_{olchg'}\ddot{x}_{olchg'};$$

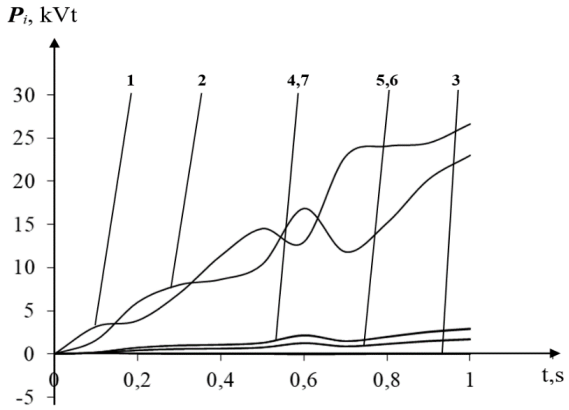
$$Q_{olo'g'} = F_{olo'g} = m_{olo'g'}\ddot{x}_{olo'g'};\ Q_{orchg'} = F_{orchg'} = m_{orchg'}\ddot{x}_{orchg'};$$

$$Q_{oro'g'} = F_{oro'g} = m_{oro'g'}\ddot{x}_{oro'g'}.$$

$$P_d = \frac{M_d\dot{\varphi}_d}{1000}, kVT;\ P_p = \frac{M_p\dot{\varphi}_p}{1000}, kVT; P_s = \frac{M_s\dot{\varphi}_s}{1000}, kVT;$$

$$P_{tr} = \frac{F_{tr}\dot{x}_{tr}}{1000}, kVT;\ P_{olchg'} = \frac{F_{olchg'}\dot{x}_{olchg'}}{1000}, kVT; P_{olo'g'} = \frac{F_{olo'g'}\dot{x}_{olo'g'}}{1000}, kVT;$$

$$P_{orchg'} = \frac{F_{orchg'}\dot{x}_{orchg'}}{1000}, kVT; P_{oro'g'} = \frac{F_{oro'g'}\dot{x}_{oro'g'}}{1000}, kVT.$$



16-rasm. G‘ildirakli traktorni sinash jarayonidagi quvvat o‘zgarishi

многоуровневой системы оптимального управления параметрами движения колесных тракторов в неровных дорожных условиях и процесса стендовых испытаний:

I. Протокол испытаний «Разработка конструктивно-технологических параметров четырехколесного универсально-пропашного трактора с бесступенчато регулируемым клиренсом» вибраций четырехколесного универсально-пропашного трактора с бесступенчато регулируемым клиренсом в полевых условиях.

Данный акт составлен на основе результатов лабораторных и полевых исследований, проведенных на экспериментальных хлопковых полях УЗГТСИТТ 30 октября 2019 года. Эксперименты проводились в соответствии с программой работ 2019 года по теме проекта МА-Atex-2018-91 «Разработка конструктивно-технологических параметров универсально-пропашного трактора с бесступенчато регулируемым клиренсом».

II. На ООО «Ташкентский тракторный завод» кластера «АгроТех» о реализации научных результатов диссертационной работы по теме «Моделирование и оптимальное управление процессами испытаний колесных тракторов» (Справка ООО «Ташкентский тракторный завод» No237 от 16 декабря 2025 года). Предложенные методы моделирования и оптимального управления процессами испытаний колесных тракторов позволяют сократить период экспериментальных и испытательных работ по оптимизации ходовых и конструктивных параметров тракторов в полевых условиях на 60-80% и оптимизировать их конструктивные параметры.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждались на 2 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Всего по теме исследования опубликовано 19 научных работ, из которых 11 статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных к публикации в качестве основных научных результатов диссертаций Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе 2 опубликованы в зарубежных и 9 в республиканских журналах, а также получены 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, перечня использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 114 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений результатов исследования в

разработаны математические модели движения и стендовых испытаний колесных тракторов в неравномерных дорожных условиях с применением уравнения Лагранжа 2-го типа;

разработаны алгоритмы оптимального управления движением колесных тракторов в неравномерных дорожных условиях и процесса испытаний на стенде на основе принципа максимума Понтрягина и изучены переходные процессы;

разработан алгоритм оценки энергетического состояния процесса испытаний колесных тракторов с применением функции и канонических уравнений Гамильтона;

разработана методика экспериментального исследования движения горизонтальных колебаний колесных тракторов в полевых условиях.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана методика математического моделирования движения колесных тракторов в неровных дорожных условиях и процессов испытаний на стенде;

внедрены алгоритмы оптимального управления движением колесных тракторов в неровных дорожных условиях и процессами испытаний на стенде и оценки энергетического состояния процесса испытаний, а также программные средства оптимизации параметров движения в различных режимах для процессов проектирования.

Достоверность результатов исследования определяется корректным применением математического аппарата для оценки динамических показателей процесса испытаний колесных тракторов и подтверждена результатами вычислительных экспериментов, а также экспериментальных исследований проведенных в полевых условиях.

Научная и практическая значимость исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке иерархической структуры многоэтапной системы моделирования и оптимального управления параметрами движения колесных тракторов в неровных дорожных условиях и процессом стендовых испытаний основанной на конструктивных методах, моделях, алгоритмах оценки состояния, методах анализа и обработки информации и их взаимосвязей.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в разработке методов моделирования и алгоритмов оптимального управления, определяющих наилучшие динамические характеристики и оценку состояния функциональных, энергетических, структурных и технологических параметров, что позволяет повысить эффективность исследований и разработок колесных тракторов за счет получения достоверных данных, исключающих некорректные решения, а также значительно сократить этапы экспериментальной оптимизации параметров, требующие значительных финансовых затрат для проверки в полевых условиях.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных в рамках диссертационного исследования по разработке

grafigi: 1-P_d , snend dvigateli; 2- P_p, stend yuritmasi; 3- P_s, stendning yuklantiruvchi imitatirini; 4-$P_{olchg'}$, oldi chap g‘ildirak, 5- $P_{olo'g'}$ oldi o‘ng g‘ildirak; 6- $P_{orchg'}$, orqa chap g‘ildirak, 7- $P_{oro'g'}$ orqa o‘ng g‘ildirak

Shunday qilib, quvvat taqsimlanishini tahlili sinash jarayonlarida bo‘ladigan turli mexanik jarayonlarni baholash imkonini beradi. Gamiltonning kanonik tenglamalari to‘liq mexanik energiyani va uning tashqi kuchlar ta’sirida o‘zgarishini, ya’ni sinash tizimini energetik holatini tavsiflab beradi.

XULOSA

Dissertatsiya ishida tizimli yondashuv konsepsiyasi, ko‘pbosqichli boshqarish tizimi va zamonaviy axborot texnologiyalari asosida, dissertatsiya ishi doirasida olingan natijalar quyidagi asosiy xulosalarda keltirilgan.

1. Oxirgi yillarda o‘tkazilgan mashina-traktorlarni va ularning agregatlarini sinash, tadqiq qilish va boshqarishning zamonaviy usullarini tizimli tahlili shuni ko‘rsatdiki, hozirgi kundagi zamonaviy sinash tizimlarining yuklantirish tizimi tebratgichlarga asoslangan bo‘lib faqat vertikal tebranishlarni hosil qilib beradi. Notekis yo‘l sharoitini imitatsiya qilish, gorizontal va vertikal tebranishlarni hosil qilish stendlarini yaratish dolzarb muammolardan hisoblanadi.

2. Hozirgi davrgacha olib borilgan tadqiqotlar bir bosqichli bo‘lib, asosan turli omillarni mustahkamlikka, samaradorlikka, texnologiyabopligiga ta’sirini aniqlash uchun, texnik tizimlar faoliyatini tahlil qilishga e’tibor qaratilgan. Bular obyektni tashqi muhit bilan bog‘lanishini, ularing funksiyasini hamda tuzilma bosqichlarini akslantiruvchi adekvat modellar modellar tuzish imkonini hamda sinash obyektlaridagi rostlovchi, dempfirlovchi, bikrlik parametrlarini aniq qiymatlarini bermaydi.

3. Sinash tizimida dinamik jarayonlarning o‘zaro bog‘liqligini aks ettiruvchi IDEF0-metodologiyasi asosida funksional modellarning, sinash tizimi parametrlarini turli holatlaridagi sinov jarayonlarda optimllashtirish va optimal yechimlar olish imkonini beruvchi algoritmlarni o‘z ichiga olgan funksional bloklarning tuzilmasi ishlab chiqildi

4. Traktorning dala sharoitidagi harakati va stendda sinash jarayonining matematik modellari 2-tur Lagranj tenglamalaridan foydalanib ishlab chiqildi. Pontryaginning maksismum prinsipini qo‘llash orqali Gamilton-Pontryagin funksiyasini shakllantirish orqali qo‘shma funksiyalari ishlab chiqildi. Ushbu qo‘shma funksiyalar boshqaruv algoritmi $|u| \le 1$ yechimini olish imkonini berdi.

5. Ishlab chiqilgan matematik modellar asosida Pontryaginning chegaraviy masalalari shakllantirildi. Chegaraviy masalalarni yechishda berilgan optimal boshqarish mezoni sifatida Lagranj masalasi qo‘yildi va tez harakat masalasi yechildi hamda optimal boshqarishning $u= +1;\ u= -1$ oraliqda obyektni boshlang‘ich holatdan berilgan oxirgi holatga eng qisqa vaqt ichida o‘tkazish imkonini beruvchi zarur sharoitlari tadqiq qilindi va obyekt harakatini o‘tish jarayonidagi qiymatlarini aniqlash imkonini berdi.

6. Qo‘shma tizimni va chegaraviy masalalarni yechish natijasida aniqlangan kovushqoqlik b_i, bikrlik c_i koeffitsiyentlari, inersiya momentlari j_i, massalar m_i aosiy harakat (2.6), (3.1) tenglamalariga qo‘yilib traktor va sinash tizimi haraktining tavsiflovchi natijalar olish imkonini berdi.

7. Sinash tizimining energetik holatini baholash uchun Gamiltonning funksiyasi va kanonik tenglamalaridan foydalanilgan holda tizimning to‘liq mexanik energiyasini ifodalovich tenglamalar tuzildi va sinash tizimi mexanizmlari va traktorni yuritish qismdagi quvvat taqsimlanishini aniqlash imkonini berdi.

8. Shunday qilib traktorlarni sinash stendini zavod sharoitida tezkor sinovlar o‘tkazish imkonini beradi va ishlab chiqarilayotgan traktorlarni sifati va ishonchliligini oshirishda muhim ahamiyatga ega.

В Узбекистане Х.Х. Усманходжаев, А.Д. Глущенко, Р.Д. Матчанов, М.Р. Даминов, Ш.М. Мирзиёев, А.Д. Абдазимов, А.А. Ахметов, Ш.А. Ахмедов, Э.Ульджаев, А.Иргашев, Ж.Джураев, Гунгор Сами, А.Уришев, Б.М. Азимов и многие другие ученые внесли значительный вклад в разработку конструкций, эксплуатации, испытаний и математических моделей машинно-тракторных агрегатов, а также алгоритмов управления. В настоящее время недостаточно изучены проблемы моделирования и разработки алгоритмов управления движением машинно-тракторных агрегатов в различных условиях эксплуатации.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения и научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта при Министерстве цифровых технологий Республики Узбекистан по проектам: МВ-Атекс-2018-91 «Разработка конструктивных и технологических параметров универсально-пропашного трактора, оснащенного задним мостом с бесступенчато регулируемым клиренсом» (2018-2020 гг.), Б-2023-40 «Разработка программных комплексов моделей и алгоритмов обоснования параметров для цифрового проектирования машинотракторных агрегатов» (2023-2024 гг.).

Целью исследования является разработка математических моделей процессов испытаний колесных тракторов, алгоритмов оптимального управления их движением и оценки их энергетического состояния.

Задачи исследования:

исследовать системы испытаний машинно-тракторной техники и проанализировать текущее состояние управления параметрами;

разработать математическую модель движения колесных тракторов в условиях неровной дороги и процессов их испытаний на стенде;

разработать алгоритмы оптимального управления движением колесных тракторов в условиях неровной дороги и процессом их испытаний на стенде;

разработать модель и алгоритм оценки энергетического состояния процессов испытаний колесных тракторов;

экспериментально исследовать горизонтальные колебательные движения колесных тракторов в полевых условиях.

Объект исследования - процесс испытания колесных тракторов.

Предметом исследования являются математические модели для анализа процессов испытаний колесных тракторов, алгоритмы оптимального управления их движением и оценки энергетического состояния, а также программные средства для проведения вычислительных экспериментов.

Методы исследования системный анализ, вариационные методы расчета, теория машин и механизмов и оптимальных систем, современные информационные технологии.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Развитие систем испытаний машин в сельском хозяйстве Узбекистана является одной из важнейших отраслей, а повышение качества и надежности машин и их оборудования- одной из наиболее актуальных и насущных проблем современности. Большое внимание уделяется проведению исследований, направленных на расширение производства отечественных тракторов, удовлетворение потребностей производителей сельскохозяйственной продукции в современной высокопроизводительной технике, а также на повышение экспортного потенциала машиностроения для сельского хозяйства. Актуальность данного направления обусловлена Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-3117 от 07.07.2017 года «О мерах по дальнейшему развитию научно-технической базы в сфере сельскохозяйственного машиностроения», которое направлено на повышение конкурентоспособности промышленных отраслей и предприятий путем их модернизации, технического и технологического обновления производства. В частности, это включает в себя координацию научно-исследовательских, инновационных и опытно-конструкторских работ в данной сфере, включая испытания новых образцов сельскохозяйственной техники, проведение научно-исследовательских и инновационных работ по практическим вопросам сельскохозяйственной техники, развитие научно-технического сотрудничества между организациями отрасли и другими организациями республики. В постановлении Президента Республики Узбекистан от 12 декабря 2024 года № ПП-431 «О мерах по дальнейшему повышению уровня механизации сельского хозяйства» особое внимание уделяется широкому внедрению современных агротехнологий в сельском хозяйстве, поэтапной полной механизации посева, выращивания и сбора урожая, повышению уровня сервисного обслуживания (осмотр и ремонт технического состояния) сельскохозяйственной техники в аграрном секторе и развитию технологической базы сервисных мастерских.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий» развития науки и технологий Республики Узбекистан.

Степень изученности проблемы. В последние годы были проведены научные исследования по изучению машинно-тракторных агрегатов, в результате которых были получены важные теоретические и практические результаты. Они отражены в трудах зарубежных ученых, в частности, таких как В. Н. Болтинский, Б. С. Свирщевский, И. И. Трепененков, Х. Г. Барам, Ф. С. Завалишин, И. П. Полканов, Г. В. Веденяпин, Ю. К. Киртбая, М. Н. Сергеев, Н. М. Орлов, А. А. Зангиев, И. П. Ксеневич, В. В. Гуськов, А. П. Парфенов, Л. Е. Агеев, В. С. Красовский, Н. М. Кутков, А. Г. Скобейда, М. И. Ляско, Н. К. Мазитов, В. Д. Саклаков, К. А. Хафизов, Н. М. Шаров, C. E. Volpato, M. Jugovic, M. Simikic, M. Zoranovic, R. Koprivica, A. Moessmer и многих других.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

АЗИМОВ МАХМУДЖОН БАХТИЁРОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ИСПЫТАНИЙ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ

05.01.02 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2026.4.PhD/T7100

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице научного совета (www.airi.uz) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Онорбоев Боходиржон Очилбоевич** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Гулямов Шухрат Манапович** доктор технических наук, профессор
	Якубжанова Дилфуза Кодировна доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Ведущая организация:	**«Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» национальный исследовательский университет**

Защита диссертации состоится «04» декабря 2026 г. в 16⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский р-н, м-в Буз-2, 17А; Тел.: (+99871) 263-41-98; E-mail: info@airi.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 90). (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский р-н, м-в Буз-2, 17А; Тел.: (+99871) 263-41-98; E-mail: info@airi.uz).

Автореферат диссертации разослан «20» ноября 2026 г.
(реестр протокола рассылки № 34 от «11» ноября 2026 г.).

Н. Равшанов
Председатель научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор

Ф.М. Нуралиев
Учёный секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор

Л.Ф. Сулюкова
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире настоящее время современные системы мониторинга состояния машинно-тракторных агрегатов (МТА) используюся в испытательных центрах России – Алтайская МСТ, Владимирская МСТ, Кировская МСТ, Кубанская МСТ, Поволжская МСТ, Подольская МСТ и Сибирская МСТ, а также компаниями John Deere и Case в США. В Европе испытательный центр французской компании Class располагает комплексными системами испытаний, оснащенными современными информационными технологиями, позволяющие имитировать эксплуатационные условия при проведении испытаний техники собственного производства. Компании Hako, Iseki, Kubota (Япония), Goldoni (Италия), Shibaura (Япония) и Lovol (КНР) специализируются на производстве тракторов среднего и малого класса.Деятельность этих компаний направлена на решение задач, связанных с обеспечением технического уровня и конкурентоспособности продукции на мировом рынке, повышением ее эффективности, расширением эксплуатации машин и механизмов, улучшением их экологических характеристик, экономией топливно-энергетических и материальных ресурсов, а также улучшением динамических свойств продукции. Особое внимание уделяется решению проблем по изучению вибрационной активности механизмов и машин, основанных на физической сущности динамических процессов, происходящих в машинах.

В мире настоящее время с целью решения данной проблемы разрабатываются меры по созданию комплексных систем мониторинга для контроля и диагностики функциональных, конструктивно-технологических и энергетических параметров машин. Эти системы будут строиться на основе искусственных, естественных и стендовых испытаний путем создания искусственных условий эксплуатации. Подобные системы разработаны ведущими производителями сельскохозяйственной техники, такими как «John-Deere» и «CaseIH» (США), которые имеют на своих предприятиях комплексные испытательные системы, оснащенные современными информационными технологиями. Перечисленные системы создают условия эксплуатации в процессе испытаний выпускаемой техники.

В последние годы исследования и управление динамическими процессами характеризуются использованием новейших информационных технологий, а также электронных и других средств получения информации о параметрах различных машинно-тракторных агрегатов и особенностях протекающих процессов. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на совершенствование процесса испытаний, а также на создание и внедрение современных методов и технических средств, позволяющих повысить достоверность определения функциональных характеристик сельскохозяйственных тракторов в режиме реального времени с использованием современных цифровых технологий.