

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ШАҲРИДАГИ ТУРИН ПОЛИТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

РЎЗИМОВ САНЖАРБЕК КОМИЛОВИЧ

**АВТОМОБИЛЬ ГИБРИД ЮРИТМАСИ ПАРАМЕТРЛАРИ ВА
БОШҚАРУВ РЕЖИМЛАРИНИ ТАНЛАШНИНГ ИЛМИЙ АСОСЛАРИ**

05.08.06 – Ғилдиракли ва гусеничали машиналар ва уларни ишлатиш

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Техника фанлари доктори (DSc) диссертацияси автореферати
мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора наук (DSc) по
техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of Doctor of Science (DSc)
on technical sciences**

Рўзимов Санжарбек Комилович

Автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув
режимларини танлашнинг илмий асослари..... 3

Рузимов Санжарбек Комилович

Научные основы выбора параметров и режимов управления
гибридного привода автомобиля 33

Ruzimov Sanjarbek Komilovich

Scientific methodologies for selection of vehicle hybrid powertrain sizing
and its control strategy..... 63

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 68

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ШАҲРИДАГИ ТУРИН ПОЛИТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

РЎЗИМОВ САНЖАРБЕК КОМИЛОВИЧ

**АВТОМОБИЛЬ ГИБРИД ЮРИТМАСИ ПАРАМЕТРЛАРИ ВА
БОШҚАРУВ РЕЖИМЛАРИНИ ТАНЛАШНИНГ ИЛМИЙ АСОСЛАРИ**

05.08.06 – Гилдиракли ва гусеничали машиналар ва уларни ишлатиш

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Техника фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.4.DSc/Т483 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкентдаги Турин политехника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (<https://tstu.uz/>) ва «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Мухитдинов Акмал Анварович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Базаров Бахтиёр Имамович
техника фанлари доктори, профессор

Абдазимов Анвар Дониёрович
техника фанлари доктори, профессор

Файзибоев Шерзод Собирович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Фарғона политехника институти

Диссертация химояси Тошкент давлат транспорт университети хузуридаги DSc.18/30.12.2019.Т.09.01 рақамли илмий кенгаши кенгашнинг 2022 йил "10" _____ соат 065 даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100167, Тошкент, Темирийўлчилар кўчаси, 1. Тел.: (99871) 299-00-01, факс: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashit@exat.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат транспорт университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (____ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100167, Тошкент, Темирийўлчилар кўчаси, 1. Тел.: (99871) 299-00-01, факс: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashit@exat.uz).

Диссертация автореферати 2022 йил «20» _____ 08 куни тарқатилди.
(2022 йил «15» _____ 18 даги _____ 06 рақамли реестр баённомаси).



А.А.Рискулов

Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

Р.М.Худайкулов

Илмий даражалар берувчи
Илмий кенгаш котиби, PhD, профессор

Ш.П. Алимухамедов

Илмий даражалар берувчи Илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, т.ф.д., профессор

КИРИШ (фан доктори (DSc) диссертациясига автореферат)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда автомобиль транспорти соҳасида энергия ресурслари ва эксплуатацион материалларидан самарали фойдаланиш иқтисодий ўсиш ва экологик хавфсизликнинг муҳим омили ҳисобланади. Автомобиль транспорти қазиб олинadиган ёқилғининг асосий истемолчиси ва ҳавони ифлослантирувчи асосий манбалардан бири ҳисобланиб, халқаро ташкилотлар маълумотларига кўра, мобил манбаларнинг CO₂ чиқинди миқдори шаҳарларда атмосферага чиқаётган ифлослантирувчи моддаларнинг умумий миқдорининг 70-90% ни ташкил қилади. Бу борада АҚШ, Япония, Хитой, Россия, Европа давлатлари каби ривожланган хорижий давлатларда ишлаб чиқариш соҳасида энергетик, экологик ва иқтисодий самарадорликни таъминлаш масалаларига алоҳида эътибор қаратиб, бугунги кунга келиб автомобилнинг турли тизим ва механизмларини электрон бошқарув тизимини жорий этиш бўйича илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш орқали энергетик, экологик ва иқтисодий самарадорликни таъминлашга катта эътибор қаратилмоқда¹.

Жаҳонда ҳозирги кунда ёнилғи сарфини ва чиқинди газлар миқдорини камайтириш мақсадида ишлаб чиқарувчилар автомобилларни лойиҳалашда гибрид юритмаларини қўллаш усулларини янада чуқурроқ тадқиқ этишга алоҳида аҳамият беришмоқда. Бу борада параллел схемага эга бўлган гибрид юритмали автомобилда қувват ички ёнув двигатели ва электр двигателидан алоҳида йўналишлар орқали етакчи ғилдиракларга берилиши энг самарали усуллардан эканлиги катта аҳамиятга эга. Шу жihatдан юқори ёнилғи самарадорликка эришиш учун автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини, маълум бир тоифадаги автомобиллар ва уларнинг ҳаракат режимларига қўйилadиган талабларга қараб танлаш усулларини ишлаб чиқиш, назарий ва амалий тадқиқотларнинг асосий зарур масалаларидан ҳисобланмоқда.

Республикамизда табиий хомашёдан фойдаланишда энергия самарадорлиги ошириш бўйича энергия тежамкор транспортлардан фойдаланишга қаратилган кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Жумладан, 2017 – 2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида “Иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини қисқартириш, ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг жорий этиш”² масалалари алоҳида белгилаб берилган. Шу муносабат билан, автомобиль гибрид юритмаси манбалари ўртасида ҳаракат учун зарурий моментни тақсимлаш орқали энг кам ёнилғи сарфини таъминлайдиган юритма бошқарув режимларини танлаш усулини ишлаб чиқиш ва ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини яхшилаш бўйича автомобилнинг гибрид юритмаси параметрларини танлаш, шунингдек,

¹ Robert Bosch GmbH, Bosch Automotive Handbook, 10th Edition, 2018. – 1750 pp, ISBN: 978-1-119-53081-7.

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 17 январдаги ПФ-5635-сон “2017 — 2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича ҳаракатлар стратегияси” Фармони.

гибрид юритмага эга автомобилнинг ёнилғи ва энергия сарфини ҳисоблашда имитацион моделлардан фойдаланиш усуллари такомиллаштириш масалалари муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012 сон “2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергия манбаларини янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари дастури тўғрисида”ги, 2018 йил 6 мартдаги ПҚ-3589 сон “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини янада ошириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги автомобиль транспортини бошқариш тизими”, 2019 йил 6 мартдаги ПҚ-4230 сон “Юк ва йўловчи ташиш тизимини тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 4 октябрдаги ПҚ-4477 сон “2019-2030-йилларда Ўзбекистон Республикасининг “яшил” иқтисодиётга ўтиш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида”ги Қарорлари ва бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергетика, энергия- ва ресурстежамкорлик, транспорт, машина ва асбобсозлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи³.

Автомобиль ёнилғи-тежамкорлик ва тортиш-тезлик хусусиятларини яхшилаш мақсадида автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш бўйича кенг қамровли назарий ва амалий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи университетлари ва илмий лабораторияларида, жумладан Техас қишлоқ хўжалик ва механика университети (АҚШ), Цюрихдаги Швейцария олий техника мактаби (Швейцария), Турин политехника университети (Италия), Стэнфорд университети (АҚШ), Мюнхен техника университети, Брауншвейг техника университети (Германия), Аргонн миллий лабораторияси, Айдахо миллий лабораторияси (АҚШ) ва бошқаларда амалга оширилмоқда.

Автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва иш режимларини танлаш бўйича дунё миқёсида жумладан, қуйидаги муҳим илмий натижалар олинган: автомобилларда гибрид юритмаларни қўллаш, уларнинг бошқарув режими сифатида мантиқий қоидаларга асосланган режимлардан фойдаланиб, автомобиль гибрид юритмаси параметрларини танлаш усуллари ишлаб чиқилган (Техас қишлоқ хўжалик ва механика университети, АҚШ); турли конфигурацияли гибрид юритмали автомобилларни ҳаракат моделларини ишлаб чиқиб, уларда динамик дастурлашга асосланган бошқарув режимларини қўллаш имкониятларини кўриб чиқилган

³www.tamu.edu, www.ethz.ch, www.polito.it, www.stanford.edu, www.tum.de, www.tu-braunschweig.de, www.anl.gov, avt.inl.gov, www.osu.edu, www.clemson.edu, www.polimi.it, www.kth.se, www.chalmers.se

(Цюрихдаги Швейцария олий техника мактаби, Швейцария); Понтрягин минимум принципидан фойдаланган бошқарув режимлари ишлаб чиқилган (Охайо ва Стэнфорд университетлари, АҚШ); гибрид юритмаси конфигурациясининг автомобиль энерго-экологик кўрсаткичларига таъсири ўрганилган ва автомобиль динамик ва ёнилғи-тежамкорлик хусусиятлари яхшиланишини таъминлайдиган, икки илишиш муфтали трансмиссиянинг конструктив ечими ишлаб чиқилган (Брауншвейг техника университети, Германия).

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Автомобиль гибрид юритмасини лойиҳалаш ва уларнинг иш режимлари такомиллаштиришда бир қатор таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан М. Ehsani, А. Emadi, Z. Rahman, L. Guzzella, G. Rizzoni, S. Onori, A. Tonoli, N. Amati, Т. Hofman, F. Kucukay, А. Sciarretta, O Sundström ва бошқалар.

Республикамизда двигатель ва автомобилнинг тортиш-тезлик ва ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларининг турли иш шароитлари, ёнилғи, трансмиссия ва мехатрон бошқарув блоклари тадқиқоқотлари билан таниқли олимлардан С.М. Қодиров, Ш.П. Алимухамедов, Б.И. Базаров, Ж.Р. Қулмухамедов, А.А. Мухитдинов, Ж.Ш. Иноятходжаев ва бошқалар шуғулланишган. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида иссиқ ва қуруқ иқлим шароитларида турли двигателларга эга автомобилларнинг эксплуатацион кўрсаткичларини яхшилаш, энг юқори тезланиш ва ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини таъминлаш мақсадида двигатель ва поғонасиз трансмиссияни мувофиқлаштирилган ҳолда бошқариш, двигатель мехатрон бошқарув тизимларида нейрон тармоқлардан фойдаланган ҳолда ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини яхшилашга эришилди.

Ушбу тадқиқотларда автомобилнинг юқоридаги хусусиятларини яхшилиш йўллари ва усулларини батафсил ўрганилган бўлса-да, автомобилларда гибрид юритманинг жорий қилиниши ёнилғи-тежамкорлик ва тортиш-тезлик хусусиятларини яхшилашнинг янги имкониятларини очади.

Бугунги кунда турли хил иш шароитларида автомобиль динамик кўрсаткичларни сақлаган ҳолда энг кам ёнилғи сарфига эришиш учун автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асослари етарлича даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти алоҳида қисмлари, диссертант масъул ижрочи вазифасини бажарган илмий-тадқиқот ишлари: 18.11 «Автомобилда гибрид юритмани қўллаш орқали энергияни тежаш ва атроф-муҳит муҳофозаси» (2003-2005), А-13-068 «Ёнилғи тежамкорлиги ва экологик хавфсизлиги бўйича автомобиль перспектив конструкциясининг параметр ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асослари» (2006–2008) мавзуларидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади динамик талабларни ҳисобга олган ҳолда турли ҳаракат шароитлари учун энг мақбул ёнилғи самарадорликка эришиш

имконини берувчи автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини илмий асосланган танлаш услубини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

манбалар таҳлили асосида автомобиль гибрид юритмаси истиқболли конфигурациясини танлашни асослаш;

автомобилнинг турли меъёрий ҳаракат циклларида гибрид юритмали автомобилнинг ёнилғи ва электр энергия сарфини ҳисоблаш математик моделини ишлаб чиқиш;

Matlab/Simulink дастурий таъминотида гибрид юритмали автомобиль турли меъёрий цикллардаги ҳаракатининг имитацион моделини яратиш;

автомобилнинг ёнилғи сарфини минималлаш учун гибрид юритмаси энергия манбалариаро бошқарув режимларини танлаш методини ишлаб чиқиш;

ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини яхшилашни танлаш мезони асосида автомобиль гибрид юритмаси параметрларини аниқлаш методини ишлаб чиқиш;

гибрид юритмали автомобиль имитацион моделининг ёнилғи ва энергия сарфлари ҳисоби ишончилигини экспериментал баҳолаш;

гибрид юритмали автомобилларда ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини янада яхшилашни чекловчи асосий омилларни аниқлаш.

энг юқори ёнилғи самарадорлигига эришиш учун автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш бўйича тавсиялар ишлаб чиқиш;

Тадқиқот объекти – параллел конфигурацияли (P2) гибрид юритмага эга енгил автомобиль.

Тадқиқот предметини гибрид юритмали автомобиль параметрлари ва бошқарув режимлари ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида автомобиль динамикаси ва ёнилғи тежамкорлиги ҳисоби, кўп ўзгарувчили оптимизацион, регрессион таҳлил, математик статистика ва имитацион моделлаштириш усуллари қўлланилган.

Тадқиқот илмий янгилиги қуйидаги ишланмаларда ўз аксини топган:

гибрид юритмали автомобиль ва компонентлари параметрларини ҳамда иш режимларини математик моделлаш асосида меъёрий ҳаракат циклларидаги ёнилғи ва энергия сарфини аниқлаш усули ҳисоб модели ва алгоритмларини ишлаб чиқиш орқали такомиллаштирилган;

юқори ёнилғи самарадорликка эришиш учун автомобиль гибрид юритмасини бошқарув режимларини танлашнинг эквивалент ёнилғи сарфини минималлаштиришга асосланган услуби ишлаб чиқилган;

юқори ёнилғи самарадорликка эришиш учун автомобиль гибрид юритмаси компонентлари қувват кўрсаткичларини танлаш орқали юритма параметрларини танлаш услуби ишлаб чиқилган;

автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини баҳолаш усуллари гибрид юритмали автомобиль ҳаракатининг имитацион

моделли ёрдамида такомиллаштирилган;

гибрид юритмали автомобиль имитацион моделининг ёнилғи ва энергия сарфлари ҳисоби ишончилигини экспериментал баҳолаш услуги динамометрик стенд натижалари билан қиёслаш орқали асосланган;

гибрид юритмали автомобилларда ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини янада яхшилашни чекловчи асосий омилларни аниқлаш усули ҳаракат циклида энергия захирасини ҳисоблаш орқали ишлаб чиқилган.

Тадқиқот амалий натижалари куйидагиларда иборат:

Ишлаб чиқилган услублар ва ҳисоб дастурлари асосида берилган шароит учун энг кам ёнилғи сарфига эришишни таъминлайдиган автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини лойиҳалаш босқичида танлаш услуги асосланган;

Ишлаб чиқилган услубларни автомобиль ёки уларнинг электрик компонентларини мавжуд ички ёнув двигатели билан мослаган ҳолда, муайян ҳаракат шароитлари учун танлашда ишлатиш имконияти кўрсатилган;

Меъёрий циклларда автомобиль ҳаракати учун зарур бўладиган энергияни аниқлаш билан гибрид юритма энергия манбаларини мутаносиб аниқлаш услуги яратилган;

Ёнилғи-тежамкорлик хусусиятлари яхшиланишини таъминловчи гибрид юритмали автомобиль параметрларини ва бошқарув режимларини танлаш услуги таклиф этилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончилиги уларни дунёнинг етакчи лабораториялари экспериментал маълумотларига ва соҳа бўйича етакчи илмий нашрларда чоп этилган натижаларига мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотнинг илмий аҳамияти автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг ишлаб чиқилган методи билан асосланади.

Олинган натижаларнинг амалий аҳамияти автомобилни лойиҳалаш жараёнида гибрид юритма параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш орқали ёқилғи-энергетик ресурсларни тежаш билан белгиланади. Бундан ташқари, автомобиль гибрид юритмаси параметрларини танлаш методи муайян ҳаракат шароитлари учун мос автомобиль моделларини танлаш имконини бериши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асосларини ишлаб чиқишда олинган натижаларга асосида:

«Ўзавтосаноат» АЖ ва унинг қошидаги “Research and Development Center” МСНҲ илмий-конструкторлик марказида турли меъёрий циклларда автомобиль ҳаракатланиш жараёнида энергия сарфини ҳисоблаш методи ва дастури; Ёнилғи-тежамкорлик хусусиятини яхшилаш бўйича гибрид юритмали автомобиль параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш методи (“Research and Development Center” МСНҲ 19 ноябр 2021й. №054-

2021 ва «Ўзавтосаноат» АЖ 22 ноябр 2021й. №19/04-25-2129 маълумотномалари) жорий этилди. Натижада, янги ишлаб чиқариладиган автомобиллар моделларини лойиҳалаш ёки танлашда уларнинг конструктив параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш, бу автомобиль прототипини ишлаб чиқишдан олдин унинг энергия самарадорлигини баҳолаш ва муайян ҳаракат шароитларида ёнилғи сарфини аниқлаш имконини берган;

Ўзбекистон Республикаси Транспорт вазирлиги қошидаги «Ўзавтотранстехника» илмий марказида гибрид юритмали автомобилларнинг эксплуатацион хусусиятларини аниқлаш бўйича ўтказиладиган синовларни, турли меъёрий циклларда эквивалент ёнилғи сарфини ҳисоблаш дастури билан алмаштириш жорий этилди («Ўзавтотранстехника» 19 ноябр 2021 й. №314 маълумотнома). Олинган натижаларни тадбиқ этиш орқали меҳнат сарфини 7 марта ва синов ўтказиш харажатларини 5 марта камайтиришга эришишни таъминлаш имконини берган;

Ўзбекистон Республикаси Транспорт вазирлигида гибрид юритмали автомобиль энергия сарфини ҳисоблаш методи жорий этилди (Транспорт вазирлигининг 23 ноябр 2021 й. №2/7365 маълумотномаси). Ушбу дастурдан фойдаланиш маҳаллий ҳаракат шароитларида энг кам ёнилғи сарфига эга автомобиль моделларини танлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 10 та ҳалқаро ва 4 та республика илмий-техник анжуманларида маъруза қилинган ва муҳоқамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича умумий 25 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фан доктори (DSc) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 13 та мақолалар, жумладан 5 та республика ва 8 та чет эл илмий журналларида нашр этилган. Шулардан 12 та мақола СКОПУС базасига кирувчи юқори импакт факторли журнал ва анжуманларда нашр этилган. Шу билан бирга, дастурий ҳисоблаш маҳсулотлари учун 2 та гувоҳнома олинди.

Диссертация тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан ташкил топган. Диссертация ҳажми 173 бетдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида гибрид юритманинг автомобилларда қўллаш бўйича илмий тадқиқот ишининг долзарблиги ва зарурати асосланган. Ишнинг асосий мақсад ва вазифалари, тадқиқот объект ва предмети, унинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Ишнинг илмий янгилиги ва гибрид юритмали автомобилларнинг параметр ва бошқарув режимларини танлаш бўйича тадқиқотнинг асосий натижалари, уларнинг илмий ва амалий аҳамияти асосланган. Шунингдек, диссертация иши натижаларининг амалиётга тадбиқи, мавзу бўйича нашр этилган ишлар ва унинг таркибий тузилиши бўйича умумий маълумотлар ёритилган.

Диссертация ишининг «**Гибрид юритмали автомобилнинг замонавий конструкциялари**» номли **биринчи боб**ида автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш орқали автомобиль ёнилғи сарфини камайтириш муоммосининг ҳозирги ҳолати ва мавжуд илмий ишлар шарҳи келтирилган.

Шундан келиб чиқиб, автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш бўйича мавжуд методлар ва бу муоммо ечими бўйича техника-технологияларнинг замонавий ютуқлари кўриб чиқилган.

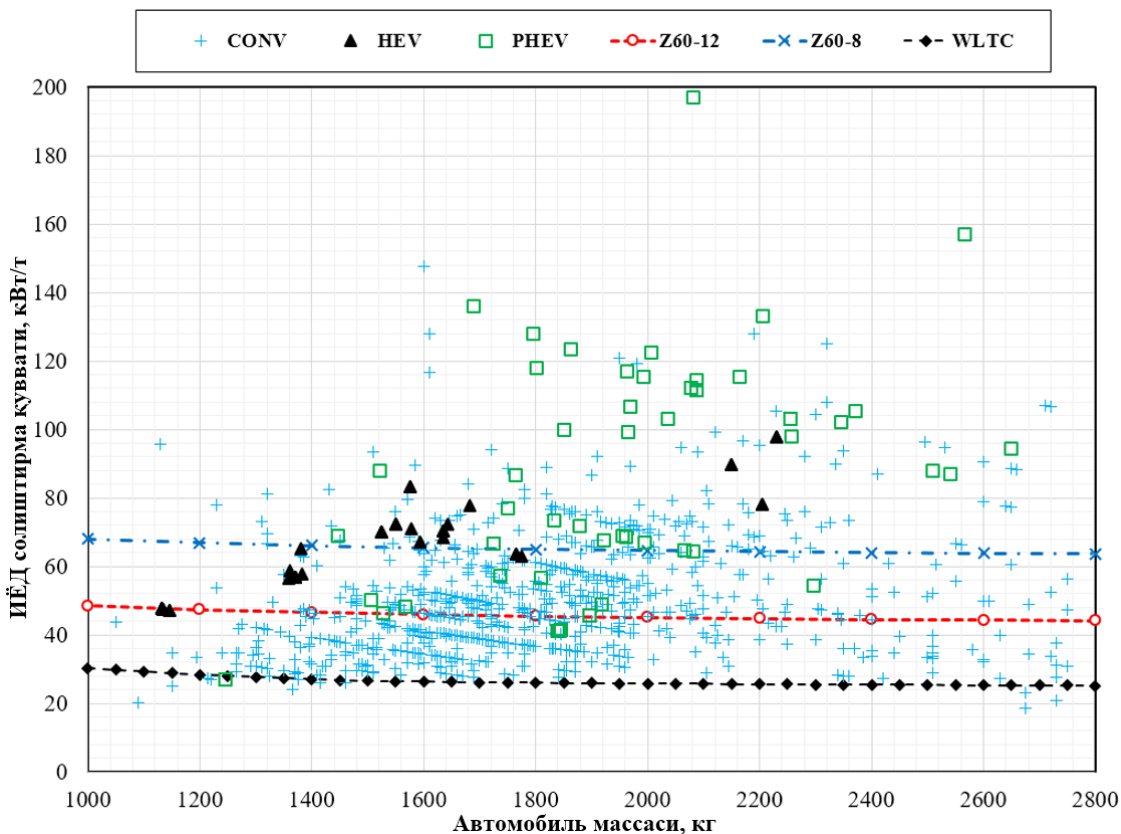
Автомобиль ёнилғи-тежамкорлик ва тортиш-тезлик хусусиятларини гибрид юритма параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш орқали яхшилаш билан хорижий илмий изланувчилардан А. Emadi, М. Ehsani, L. Guzzella, G. Rizzoni, S. Onori, A. Tonoli, N. Amati, T. Hoffman, F. Kucukay, A Sciarretta, O Sundstrom ва бошқалар шуғулланишган.

Автомобиль ва двигатель ёнилғи-тежамкорлик ва тортиш-тезлик хусусиятларини, турли эксплуатацион шароитлар, ёнилғи ва трансмиссия конструкциялари ва мехатрон бошқарув қурилмаларидан фойдаланган ҳолда яхшилашни юртимиз олимларидан, С.М. Қодиров, Ш.П. Алимухамедов, Ж.Р. Кулмухамедов, А.А. Мухитдинов, Б.И. Базаров, Ж.Ш. Иноятходжаев ва бошқалар тадқиқ қилишган.

Ушбу муаллифлар тадқиқотларида автомобиль хусусиятларини яхшилаш йўллари ва усуллари кенг ёритилган бўлса-да, автомобилларда гибрид юритмаларни қўллаш ёнилғи-тежамкорлик ва тортиш-тезлик хусусиятларини такомиллаштиришнинг янги имкониятларини тақдим этади.

Автомобиль гибрид юритмаларининг мавжуд схемалари таҳлили P2 конфигурация энг истиқболли конструкция эканлигини кўрсатди. Бу танлов асосан юритма параметрларини турли массали автомобилларга мослаштириш, мавжуд конструкцияга тадбиқ этиш ва барча режимларда ишлаш имкониятларига эга эканлиги ва нисбатан соддалиги билан изоҳланади. Булардан ташқари, гибрид юритманинг бу конфигурацияси гибридизация даражасини ўзгартиришнинг амалий соддалиги билан ажралиб туради. Бугунги кунда ишлаб чиқаришда мавжуд 110 та гибрид юритмали автомобиллар таҳлили асосида қуйидагилар аниқланди: улардаги ички ёнув

двигатели (ИЁД) максимал қуввати автомобилнинг минимал тезланиш талабларини қаноатлантиради (1-расм); одатий юритмали автомобилларда қўлланилган ИЁДдан кам бўлмаган ишчи ҳажмлардан фойдаланилган; бу автомобилларнинг 60% дан ортиқ қисмида 1-2 кВт·соат сиғимли батареядан фойдаланилган.



1-расм. Турли юритмали автомобиллар учун ИЁД солиштирма қуввати: механик (CONV), ташқаридан қувватланмайдиган гибрид юритмали (HEV) ва ташқаридан қувватланадиган гибрид юритмали (PHEV)

Мавжуд илмий тадқиқотлар ҳолати таҳлили бугунги кунда автомобиль динамик хусусиятларини сақлаган ҳолда энг кам ёнилғи сарфини таъминловчи гибрид юритма параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асослари йўқлигини кўрсатди. Шундан келиб чиқиб, турли талабларни ҳисобга олган ҳолда турли ҳаракат шароитлари учун энг мақбул ёнилғи самарадорликка эришиш имконини берувчи автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш зарур.

Диссертациянинг «Гибрид юритмали автомобиль параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг назарий асослари» номли иккинчи бобида гибрид юритмали автомобилнинг меъёрий циклларда ҳаракатини моделлаштиришнинг назарий асослари, юритма компонентлари моделлари ва имитацион моделни ишлаб чиқиш масалалари кўрилган. Шунингдек, гибрид юритмали автомобиль параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг мавжуд методлари таҳлил қилинган.

Гибрид юритмали автомобиль ҳаракатини моделлаштиришнинг тескари

принципига асосан, ҳаракатланишнинг меъёрий цикл бўйича тезлик профили киритилади. Бунда, автомобиль бу профилга оғишларсиз мукамал амал қилиши фараз қилинган.

Кейинги қадамда автомобиль зарурий динамикасини таъминловчи ғилдираклардаги тортиш кучи, буровчи момент ва бурчак тезликлари аниқланади. Кинематик ўзгаришлар орқали бу катталиқлар трансмиссия кирувчи валидаги талаб этилган қийматларга келтирилади. Талаб этилган буровчи моментнинг ИЁД ва электр машинаси (ЭМ) ўртасида тақсимланишидан келиб чиққан ҳолда ёнилғи ва энергия сарфлари ҳисобланади. Тескари модел гибрид юритманинг компонентларини ифодаловчи бир нечта қуйи тизимлардан (ҳаракат цикли, автомобиль динамикаси, трансмиссия, ИЁД, ЭМ ва батарея) ташкил топган:

Ҳаракат цикли. Бу қуйи тизим меъёрий ҳаракат цикли моделини ифодалаб, ҳаракат тезлиги ва вақти векторларидан ташкил топади. Автомобиль тезлигининг оний v_i ва олдинги v_{i-1} қийматлари фарқини вақт вектори қадамига Δt бўлиш орқали, автомобиль бўйлама тезланиш/секинланиш қийматини a_x қуйидагича аниқлаймиз:

$$a_x = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}.$$

Автомобиль бўйлама динамикаси модели. Бу қуйи тизимда автомобилга таъсир этувчи қаршилик кучлари (инерция, ғилдирашга қаршилик ва ҳаво қаршилик кучлари) ва бу кучларни енгиш учун талаб этиладиган ғилдиракдаги тортувчи куч F_x ҳисобланади. Бу тизимга кирувчи ўзгарувчилар автомобиль бўйлама тезланиши a_x ва тезлиги v_x , чиқувчилари эса, тортиш учун талаб этилган ғилдирак буровчи моменти T_{gb} , бурчак тезлиги ω_{gb} ва бурчак тезланишлари $\dot{\omega}_{gb}$. Автомобиль ҳаракатидаги куч балансини қуйидаги тенглама орқали ифодаланади:

$$F_x = M \cdot a_x + M \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_f \cdot v_x^2.$$

Қаршилик кучлари ва тўртта ғилдирак инерцияси J_w моментларини енгиб ўтиш учун зарур бўлган ғилдиракдаги буровчи момент ($\dot{\omega}_w$ ғилдирак бурчак тезланиши) T_{gb} , қуйидагича ҳисобланади:

$$T_{gb} = F_x \cdot R_w + 4 \cdot J_w \cdot \dot{\omega}_w.$$

Трансмиссия модели ўз ичига узатмалар қутиси ва асосий узатма вазифаларини олади. Бунда трансмиссия ИЁД ва ЭМлардан келувчи буровчи моментини ошириш ва бурчак тезликни камайтириш вазифаларини бажаради. Узатмалар қутисининг поғоналарини ўзгартириш вақти ва тезликлари ҳаракат цикли моделидан олинади. Трансмиссия бирламчи валидаги талаб этилган буровчи момент T_{req} ва ғилдиракдаги T_{gb}

қийматларни қуйидагича ифодалаш мумкин:

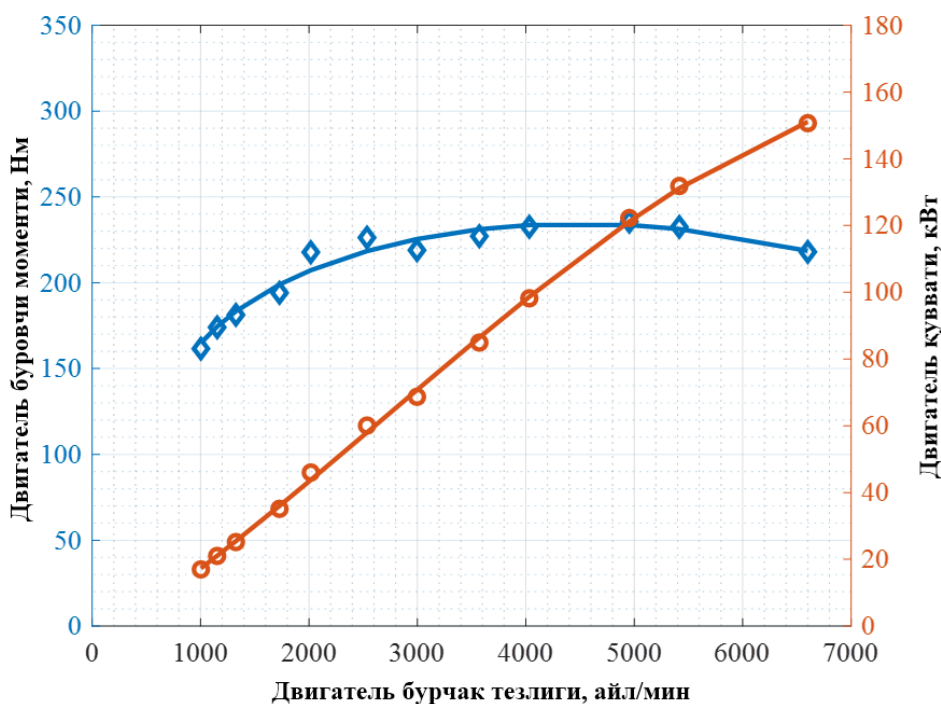
$$T_{req} = \begin{cases} \frac{T_{gb}}{i_{gb.i} \cdot i_f \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_f}, & \text{агар } T_{gb} \geq 0 \text{ (тортиш режими),} \\ \frac{T_w \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_f}{i_{gb.i} \cdot i_f}, & \text{агар } T_{gb} < 0 \text{ (тормоз режими),} \end{cases}$$

бу ерда мос равишда узатмалар қутиси ва асосий узатмаларнинг, i_{gb} ва i_f – узатишлар сони, η_{gb} ва η_f – фойдали иш коэффициентлари (ФИК).

Электрон бошқарув блоқи модели (ЭБУ) автомобиль гибриди юритмаси бошқарув режимини ифодалайди. Бунда кирувчи катталиклар қийматларидан келиб чиқиб ЭБУ талаб этилган буровчи моментни (T_{req}), ИЁД (T_{ice}) ва ЭМ (T_{em}) ўртасида тақсимлайди. ИЁД ва ЭМ битта валда жойлашганлиги сабабли уларнинг бурчак тезликлари мос равишда ω_{ice} ва ω_{em} тенг деб қабул қилинади. Бу жараён математик ифодаси қуйида келтирилган:

$$T_{req} = T_{ice} + T_{em},$$

$$\omega_{ice} = \omega_{em} = \omega_{req}.$$



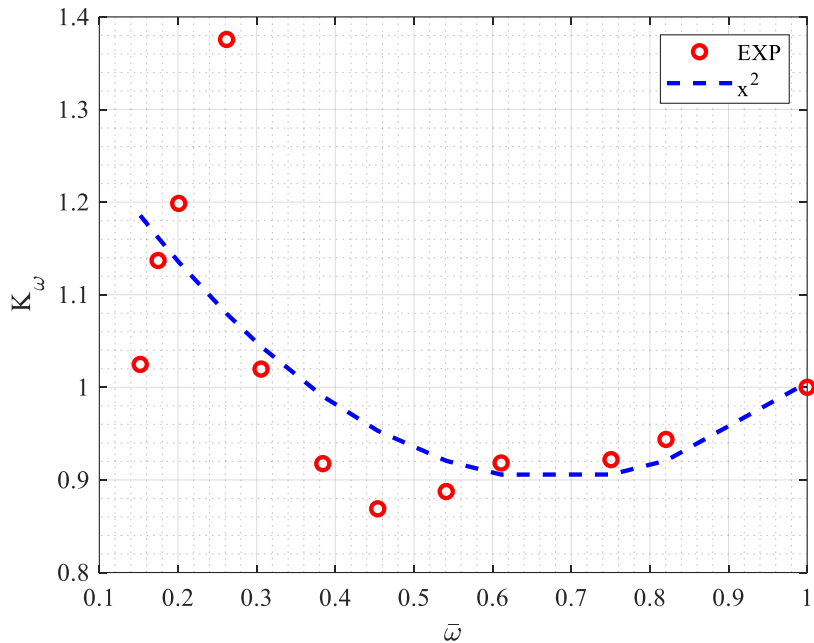
2-расм. Toyota Camry автомобили дивигателининг ташқи тезлик таснифи

Ички ёнув дивигатели ва унинг ёнилғи сарфи модели. Текис ҳаракатда автомобиль ИЁД статик режимда ишлайди. Бу режим (T_{ice}, ω_{ice}) иш нуқтаси (2-расм) билан ифодаланади. ИЁД қуввати P_{ice} трансмиссия фойдали иш коэффициентларни инобатга олган ҳолда ҳаракатга қаршилик кучлари қувватига тенг. Маълумки, ИЁД оний ёнилғи сарфини \dot{m}_{ice} (г/с) бурчак

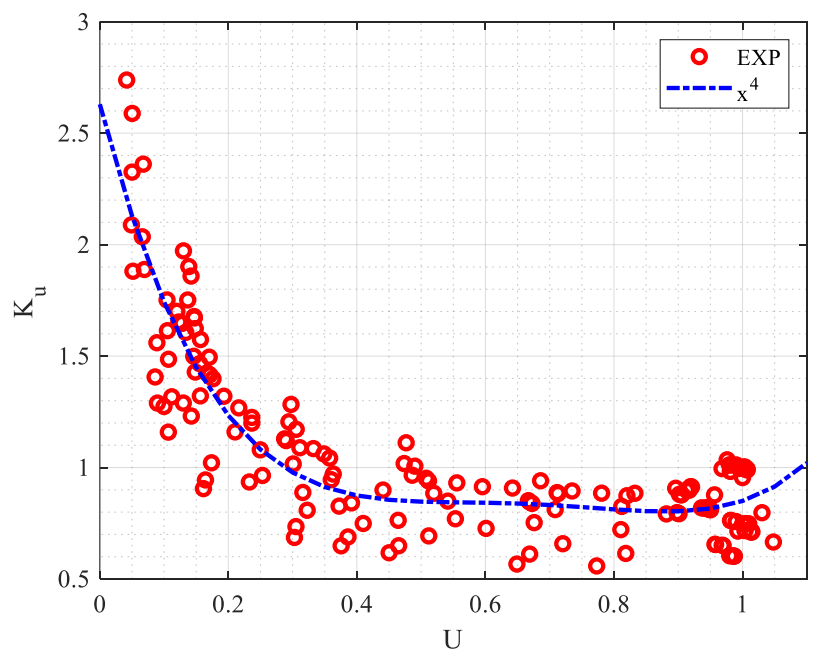
тезлик ва қувватдан фойдаланиш коэффициентлари орқали ифодалаш мумкин:

$$\dot{m}_{ice} = g_e \cdot P_{ice} = g_{eN} \cdot K_u \cdot K_\omega \cdot T_{ice} \cdot \omega_{ice},$$

бу ерда K_u , K_ω – мос равишда g_e солиштирма ёнилғи сарфининг қувватдан фойдаланиш ва бурчак тезликка боғлиқ ўзгариши коэффициентлари; g_{eN} – двигатель максимал қувватига тўғри келувчи солиштирма ёнилғи сарфи (г/кВт·соат).



3-расм. Toyota Camry автомобили двигателя учун K_ω коэффициентининг нисбий бурчак тезликка $\bar{\omega}$ боғлиқлик графиги



4-расм. Toyota Camry автомобили двигателя учун K_u коэффициентининг қувватдан фойдаланиш даражасига U боғлиқлик графиги

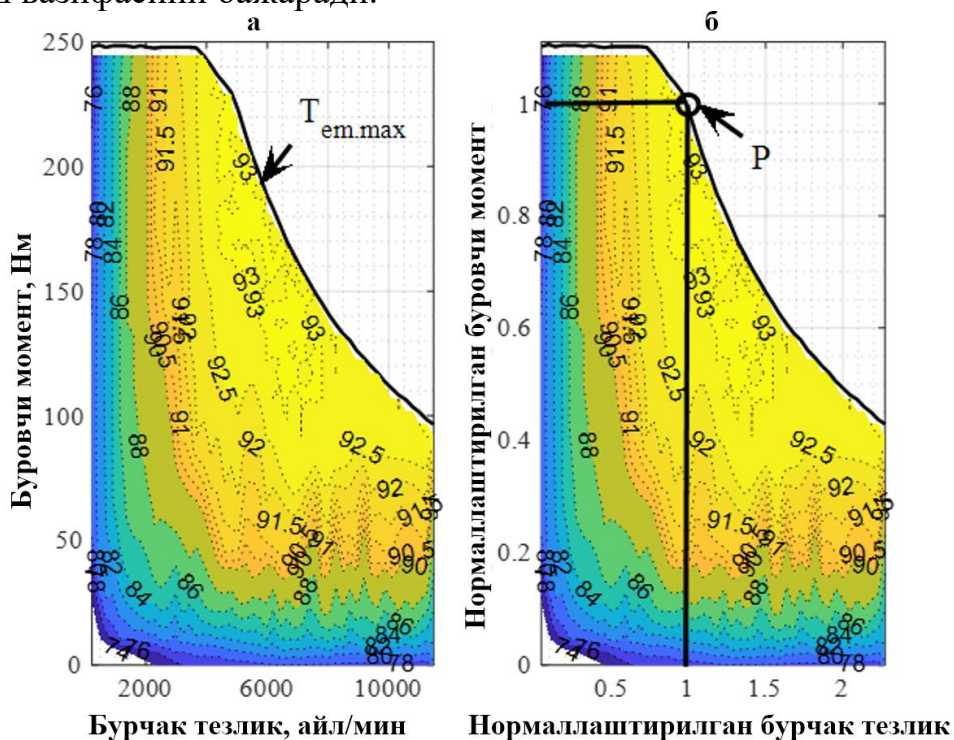
Эксперимент натижалари таҳлилидан кейин K_ω коэффициентининг двигатель нисбий бурчак тезлигига $\bar{\omega}$ боғлиқлик гарфиги 3-расмда келтирилган кўринишга эга. Демак, иккинчи даражали полином орқали (3-расмда штрих чизиқлар) K_ω коэффициенти аппроксимация тенгламаси қуйидагича бўлади:

$$K_\omega = 1.02 \cdot \bar{\omega}^2 - 1.388 \cdot \bar{\omega} + 1.373.$$

K_u коэффициенти учун эмпирик тенглама қувватдан фойдаланиш даражаси U орқали тўртинчи даражали полином (4-расм) билан қуйидагича ифодаланади:

$$K_u = 10.11 \cdot U^4 - 26.96 \cdot U^3 + 26.32 \cdot U^2 - 11.25 \cdot U + 2.63.$$

Электр машинаси модели. Гибрид юритмали автомобилларда электр машинаси тортиш (двигатель) ва тормоз (генератор) режимларида ишлайди. Генератор режимда электр машинаси электр энергияси ишлаб чиқаради ва батареяни қувватлантириши мумкин. Шундай қилиб, электр машинаси модели батареядан уни зарядлаш ёки разрядлаш жараёнида зарур бўлган қувватни (моделдан чиқувчи катталиқ), электр машинасидан талаб этилган буровчи момент ва бурчак тезлик (моделга кирувчи катталиқлар) орқали ҳисоблаш вазифасини бажаради.



5-расм. Электр машинасининг тортиш режимдаги икки ўзгарувчили хусусияти

Бу моделга кирувчи ва чиқувчи катталиқлар электр машинасининг двигатель (η_{mot}) ёки генератор (η_{gen}) режимларидаги фойдали иш коэффициент қийматлари буровчи момент ва бурчак тезлик орқали қуйидагича боғланган:

$$\begin{cases} \eta_{mot} = f(T_{em}, \omega_{em}), \\ \eta_{gen} = f(T_{gen}, \omega_{gen}). \end{cases}$$

5-расмда экспериментал йўл билан олинган электр машинасининг тортиш режимидаги икки ўзгарувчилик характеристикаси келтирилган. Генератор режимида бу характеристика симметрик пастга акслантирилади, яъни буровчи момент манфий қиймат чорагида бўлади. Расмдаги изо-чизиқлар электр машинасининг ФИК ўзгаришини кўрсатади. P нуктаси ЭМ максимал қувват нуктасига тўғри келади. Бу нуктадаги буровчи момент ва бурчак тезлик қийматлари мос равишда $T_{em, Pmax}$ и $\omega_{em, Pmax}$ билан белгиланган. 5,6-расмда ЭМ характеристикасининг нормаллаштирилган кўриниши келтирилган. Бунда бурчак тезлик ($\omega_{n,em}$) $\omega_{em, Pmax}$ га нисбатан ва буровчи момент ($T_{n,em}$) $T_{em, Pmax}$ га нисбатан нормаллаштирилган.

Тортиш (P_{em}) ва генератор (P_{gen}) режимларида зарур электрик қувват механик қувват орқали ФИК ва иш режимини инобатга олган ҳолда қуйидагича ҳисобланади:

$$\begin{cases} P_{em} = T_{em} \cdot \omega_{em} / \eta_{mot}, \\ P_{gen} = T_{gen} \cdot \omega_{gen} \cdot \eta_{gen}. \end{cases}$$

Электр машинаси ФИК. изо-чизиқларини икки ўзгарувчилик ($\omega_{n,em}$, $T_{n,em}$) полином функция билан қуйидагича ифодаланади:

$$\begin{aligned} \eta_{mot} = & p_{00} + p_{10} \cdot \omega_{n,em} + p_{01} \cdot T_{n,em} + p_{20} \cdot \omega_{n,em}^2 + p_{11} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em} + p_{02} \\ & \cdot T_{n,em}^2 + p_{30} \cdot \omega_{n,em}^3 + p_{21} \cdot \omega_{n,em}^2 \cdot T_{n,em} + p_{12} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^2 \\ & + p_{03} \cdot T_{n,em}^3 + p_{31} \cdot \omega_{n,em}^3 \cdot T_{n,em} + p_{22} \cdot \omega_{n,em}^2 \cdot T_{n,em}^2 + p_{13} \\ & \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^3 + p_{04} \cdot T_{n,em}^4 + p_{32} \cdot \omega_{n,em}^3 \cdot T_{n,em}^2 + p_{23} \cdot \omega_{n,em}^2 \\ & \cdot T_{n,em}^3 + p_{14} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^4 + p_{05} \cdot T_{n,em}^5. \end{aligned}$$

Бу ерда, p_{ij} аппроксимация коэффицентлари қуйидаги қийматларга эга:

$$\begin{aligned} p_{00} &= 67.52; p_{10} = 20.91; p_{01} = 115.9; p_{20} = -13.45; p_{11} = -19.17; \\ p_{02} &= -418.3; p_{30} = 2.814; p_{21} = 35.69; p_{12} = 145.7; p_{03} = 690.7; \\ p_{31} &= -12.11; p_{22} = -165.5; p_{13} = -100.4; p_{04} = -551.2; \\ p_{32} &= 43.49; p_{23} = 60.73; p_{14} = 20.56; p_{05} = 169.1. \end{aligned}$$

Электр машинаси максимал буровчи моментини унинг ротори нормаллаштирилган бурчак тезлигига боғлиқлигини, 6-даражали полином функцияси кўринишида ифодалаш мумкин:

$$T_{em,max} = T_{em,Pmax} \cdot (0.0735 \cdot \omega_{n,em}^6 - 0.7729 \cdot \omega_{n,em}^5 + 2.8935 \cdot \omega_{n,em}^4 - 4.7297 \cdot \omega_{n,em}^3 + 3.1108 \cdot \omega_{n,em}^2 - 0.7504 \cdot \omega_{n,em} + 1.1281)$$

Электр машинаси максимал буровчи моменти $T_{em,max}$ эгри чизиғи билан чегараланади (5-расм).

Электр батарея модели. Гибрид юритмали автомобилнинг тортиш-тезлик ва ёнилғи-тежаморлик хусусиятларини комплекс баҳолашда электр батарея модели қуйидаги имкониятларни ўз ичига олиши етарли: чиқувчи қувват, энергия сифими, энергия алмашинув ФИК ва заряд/разряд жараёнларидаги чекловларни. Шу сабабдан, батарея моделига кирувчи катталиқ унинг клеммаларидаги талаб этилган қувват бўлса, чиқувчи катталиқлар – ток кучи, кучланиш ва унинг зарядланганлик даражасидир.

Тевенин теоремасидан батареянинг эквивалент моделини унинг ЭЮК (E) ва ички қаршилиқлари (разрядда R_{dchg} ва зарядда R_{chg}). Бу катталиқлар батареянинг зарядланганлик даражаси SOC (State of Charge) функцияси ($E = f(SOC), R_{dchg} = f(SOC)$ ва $R_{chg} = f(SOC)$) кўринишида экспериментал тарзда аниқланади. Бу катталиқлар орқали батарея клеммасидаги кучланишни U_t аниқлаш мумкин.

Батарея ток кучи I_{bat} разряд ва заряд режимларида мос равишда I_{dchg} ва I_{chg} , кўринишида белгилаб олиниб, қийматларини қуйидаги формулалар орқали ҳисоблаш мумкин:

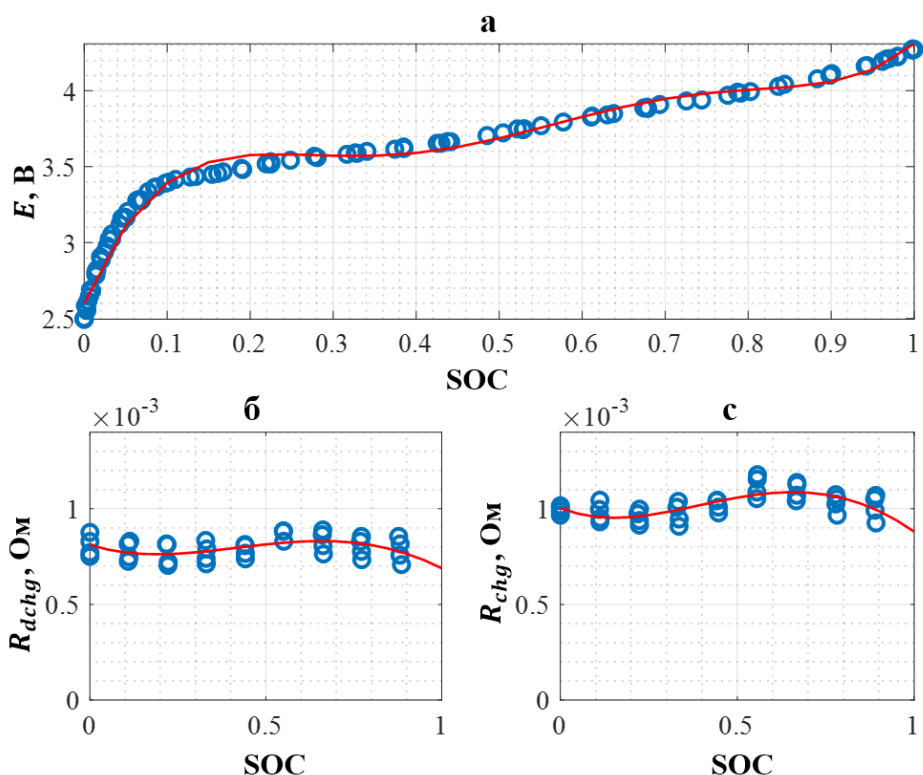
$$I_{dchg} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot R_{dchg} \cdot (P_t)}}{2 \cdot R_{dchg}},$$

$$I_{chg} = \frac{\sqrt{E^2 + 4 \cdot R_{chg} \cdot P_t} - E}{2 \cdot R_{chg}}.$$

Разряд ва заряд режимларида батарея зарядланганлик даражаси ўзгариш динамикаси қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^T I_{dchg} dt}{Q_{nom.Ah}} + \frac{\int_0^T I_{chg} dt}{Q_{nom.Ah}}$$

бу ерда SOC_0 – зарядланганлик даражасининг бошланғич қиймати, T – заряд ёки разряд жараёнинг охири вақти (с) ва $Q_{nom.Ah}$ – батареянинг номинал сифими (А·с). Юқоридаги тенгламада батарея сифимининг разряд ток кучи қийматига боғлиқ ўзгаришини ифодоловчи Пойкерт эффекти инобатга олинмаган. Чунки литий-ион батареялар учун Пойкерт даража кўрсаткичи қиймати бирга яқин бўлади.



6-расм. Литий-ион полимер батареясининг битта ячейкаси учун ЭЮК ва ички қаршиликларининг унинг зарядланганлик даражасига боғлиқ ҳолда ўзгариш графиклари. Тажрибада олинган қийматлар «о» нуқталар ва аппроксимация қийматлари қизил эгри чизиқлар орқали ифодаланган.

Маълумки, батарея ЭЮК унинг зарядланганлик даражасига боғлиқ ва зарядланганлик даражаси ошиши билан ЭЮК қиймати ҳам ортади. Литий-ион полимер батарея ЭЮКси ва унинг ички қаршиликлар ўзгариш характерлари, мос равишда ба,б,с - расмларда келтирилган.

6-расмда «о» билан белгиланган нуқталар юқоридаги параметрларнинг экспериментал йўл билан стенда Айдахо миллий лабораторияси (Idaho National Laboratory) томонидан олинган. Қизил узлуксиз чизиқлар билан қуйидаги тенгламалар билан ифодаланувчи аппроксимация эгри чизиқлари келтирилган:

$$E(SOC) = 50.621 \cdot SOC^5 - 139.61 \cdot SOC^4 + 141.66 \cdot SOC^3 \dots \\ - 64.015 \cdot SOC^2 + 13.052 \cdot SOC + 2.6013;$$

$$R_{chg}(SOC) = 0.00032 \cdot SOC^4 - 0.00191 \cdot SOC^3 + 0.00205 \cdot SOC^2 \dots \\ - 0.00058 \cdot SOC + 0.00081;$$

$$R_{dchg}(SOC) = 0.00076 \cdot SOC^4 - 0.00332 \cdot SOC^3 + 0.0032 \cdot SOC^2 \dots \\ - 0.00075 \cdot SOC + 0.001.$$

Регрессион таҳлилларда тенгламаларни танлашда асосий меъзонлар сифатида детерминация коэффициенти ва регрессия қолдиқлари квадрати олинди.

Бошқарув режимининг асосий вазифаси талаб этилган буровчи момент қийматини T_{req} мавжуд куч тизимлари (ИЁД T_{ice} ва ЭМ T_{em}) орасида оптимал тақсимлашдир.

Эквивалент ёнилғи сарфини минималлаштириш (ЭЁСМ) бошқарув режимида электр энергиясининг ёнилғи сарфига эквивалент қиймати белгиланади. Бу эквивалент қиймат электр энергиясининг келажакда қандай шароитларда ишлатилишига боғлиқ. Аммо, автомобилнинг келажакдаги иш шароити номаълум ва натижада куч узатишнинг фақат ўртача ФИК қийматлари эквивалент ёнилғи сарфини ҳисоблашда ишлатилиши мумкин. Шундай қилиб, бир сонияда сарфланадиган эквивалент ёнилғи миқдори \dot{m}_{eqv} (г/с) ИЁД томонидан сарфланадиган ёнилғи миқдори \dot{m}_{ice} ва батарея томонидан сарфланадиган виртуал (мавҳум) ёнилғи миқдори \dot{m}_{bat} йиғиндиси орқали оний вақт t учун қуйидагидек ифодалаш мумкин:

$$\dot{m}_{eqv}(t) = \dot{m}_{ice}(t) + \dot{m}_{bat}(t).$$

ИЁДнинг бир сониядаги ёнилғи сарфи қуйидагича ҳисобланади:

$$\dot{m}_{ice}(t) = \frac{P_{ice}(t)}{LHV \cdot \eta_{ice}(t)} = \frac{T_{ice}(t) \cdot \omega_{ice}(t)}{LHV \cdot \eta_{ice}(t)} = \frac{T_{ice}(t) \cdot \omega_{ice}(t) \cdot g_e(t)}{3600},$$

бу ерда LHV – ёнилғининг солиштирма энергия сифими, МЖ/кг, η_{ice} – ИЁДнинг оний ФИК қиймати, g_e – солиштирма ёнилғи сарфи, г/кВт·соат.

Шубҳасиз, батареянинг зарядланганлик даражаси паст ҳолатларда электр энергиясидан автомобилни ҳаракатлантириш учун фойдаланиш самарасиздир. Аксинча, батареянинг зарядланганлик даражаси юқори ҳолатларда ҳаракат учун электр энергиясидан фойдаланишни рағбатлантириш зарур. Юқоридаги жараённи эквивалент ёнилғи сарфи тенгламасига S_{SOC} жарима функциясини киритиш орқали амалга ошириш мумкин. Бу функция виртуал ёнилғи сарфи салмоғини оширади ва қуйидаги кўринишда ифодаланади:

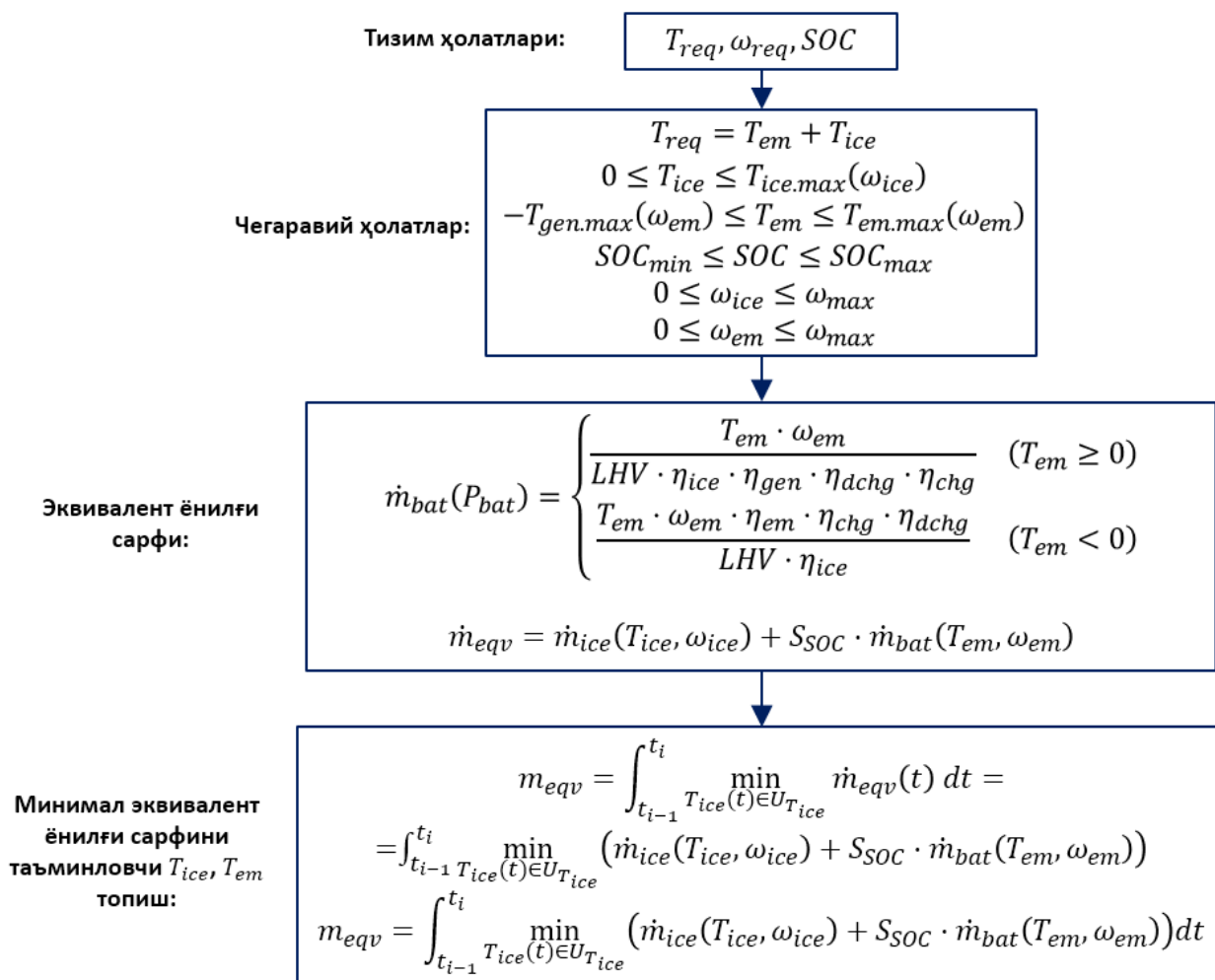
$$\dot{m}_{eqv}(t) = S_{ice} \cdot \dot{m}_{ice}(P_{ice}(t)) + S_{soc} \cdot \dot{m}_{bat}(P_{bat}(t)).$$

Агар жарима функцияси қиймати бирдан катта бўлса батарея электр энергиясидан фойдаланиш виртуал ёнилғи сарфи салмоғини оширади. Акс ҳолда, электр энергиясидан фойдаланиш ёнилғи ишлатишга нисбатан арзонлашади. Илмий адабиётларда жарима функциясини S_{SOC} қуйидаги кўринишда ифодалаш тавсия этилган:

$$S_{soc} = 1 - \left(\frac{SOC(t) - SOC_t}{(SOC_{max} - SOC_{min})/2} \right)^{k_s},$$

бу ерда $SOC(t)$, SOC_t , SOC_{max} ва SOC_{min} – мос равишда оний, мақсадли, максимал ва минимал зарядланганлик даражалари қийматлари; k_s – даража индекси.

Эквивалент ёнилғи сарфини минималлаштиришда, ИЁД бурчак тезлик ω_{req} ва буровчи моменти T_{ice} , электр машинаси буровчи моменти T_{em} ва бурчак тезлиги, шунингдек батарея зарядланганлик даражаларига SOC чегаравий қийматлар киритилиши лозим. Минимал ёнилғи сарфини аниқлаш кетма-кетлиги 7-расмда келтирилган.



7-расм. Эквивалент ёнилғи сарфини минималлаштириш кетма-кетлиги

Оптимизацион методларга асосланган бошқарув режимлари автомобиль гибрид юритмаси параметларини танлашда бошқарув режимининг таъсирини истисно қилиш имконини беради. Танлаш лозим бўлган гибрид юритма асосий параметрларига ИЁД ва ЭМ максимал қувватлари, шунингдек, батарея сиғими киради.

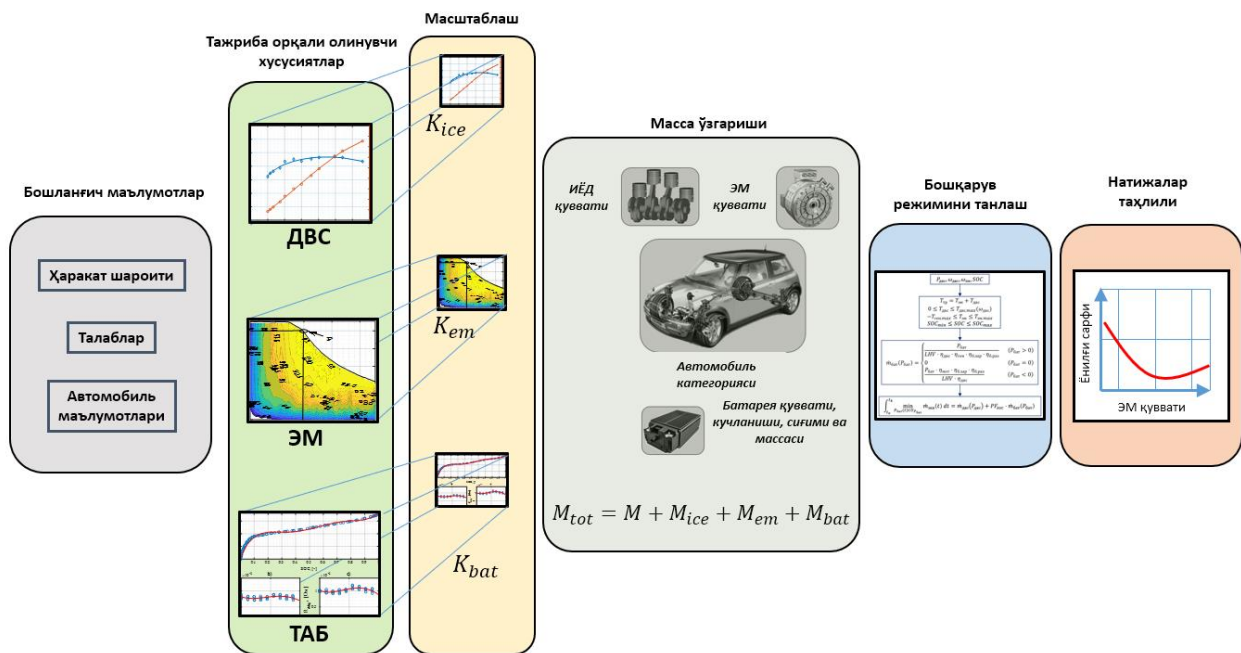
Муайян ҳаракат шароитида энг кам ёнилғи сарфига эришиш учун автомобиль гибрид юритмаси параметрларининг ёнилғи сарфига таъсирини таҳлил қилиш лозим. Ушбу параметрларни ўзгартириб, барча динамик талабларга жавоб берадиган ва айни пайтда энг кам ёнилғи сарфига эга бўлган параметрлар комбинациясини топиш мумкин.

Гибрид юритма параметрларини танлаш кетма-кетлиги 8-расмда келтирилган.

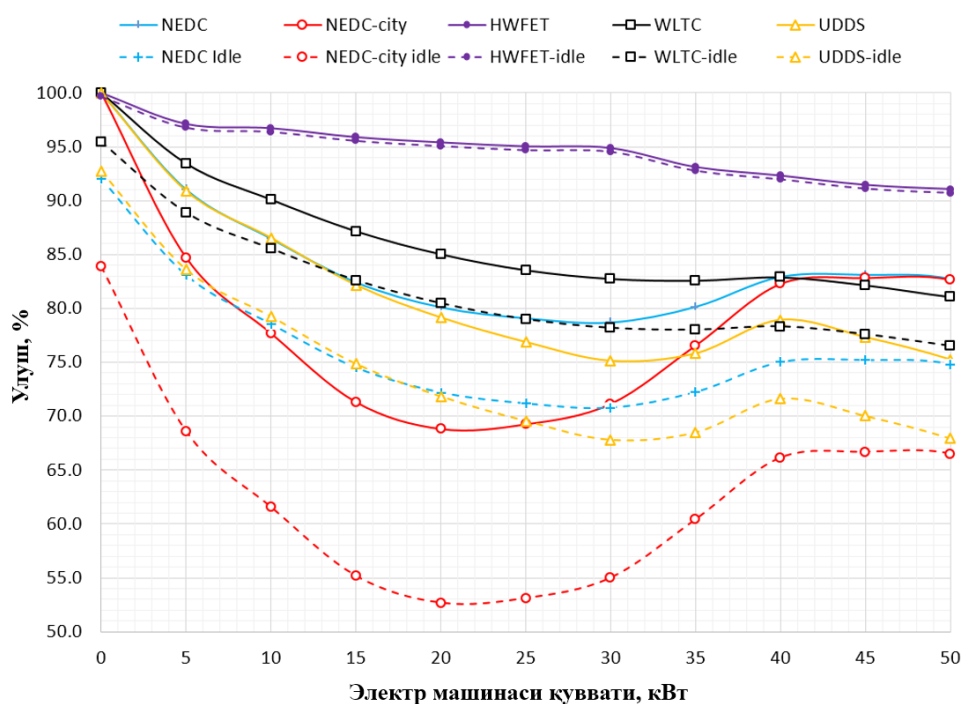
Автомобиль юритмасини гибридлаштириш сабабли ёнилғи сарфининг камайишини таҳлил қилиш учун Toyota Camry автомобили маълумотларидан фойдаланилди. Бунда ЭМ максимал қуввати $P_{em,max}$ 5 кВт ва батарея бошланғич зарядланганлик даражаси 10% қадамлар билан ўзгартирилди. ИЁД максимал қуввати ўзгаришсиз қолдирилди.

Цикл давомида сарфланган ёнилғи миқдори Q_{cycle} батарея зарядланганлик даражасининг цикл бошида ва охиридаги қиймат фарқига ΔSOC боғлиқ. Бу боғлиқлик графиги бирор цикл учун турли бошланғич зарядланганлик қийматлари SOC_0 (10 дан 90% гача 10% қадам билан) ва ЭМ турли қуввати (0 дан 60 кВт гача 5 кВт қадам билан) учун қурилади. Ҳар бир ЭМ қуввати учун баланс нуқтаси топилади, яъни $\Delta SOC = 0\% \pm \delta$ (δ руҳсат этилган четланиш диапазони 0,1%) чегарада бўлади ($SOC_0 = SOC_{final} \pm \delta$).

Берилган ЭМ қуввати учун цикл бўйича ёнилғи сарфи сифатида шу баланс нуқтасидаги ёнилғи сарфи қиймати қабул қилинади. Бу натижаларни ЭМ қуввати нолга тенг (яъни анъанавий юритмага эга автомобиль учун) ҳолатдаги ёнилғи сарфига нисбатан улуш кўринишида ифодалаш мумкин.



8-расм. Гибрид юритмали автомобиль параметрларини танлаш методи кетма-кетлиги



9-расм. Ёнилғи сарфининг турли ҳаракат циклларида нисбий ўзгариши: двигатель салт ишлагандаги сарфни инобатга олинган (узлуксиз чизиқлар) ва олинмаган (штрих чизиқлар) ҳолатларда

Ёнилғи сарфининг камайишининг график кўриниши турли гибридлаштириш даражаси ва ҳаракат цикллари учун 9-расмда келтирилган. Анъанавий юритмага эга автомобиль ёнилғи сарфи 100% деб қабул қилиниб, турли гибридлаштириш даражасидаги қийматлар шунга нисбатан олинган. Узлуксиз чизиқлар ёнилғи сарфини ҳисоблашда двигатель салт ишлаш сарфи инобатга олинган ва штрих чизиқлар (idle сўзи қўшилган) бу сарф инобатга олинмаган ҳолатлар учун келтирилган. Бу жараён турли ҳаракат цикллари учун такрорланган.

9-расмдан кўриниб турибдики, NEDC-city шаҳар ҳаракат цикли учун энг кам ёнилғи сарфи ЭМ максимал қуввати 20 кВт бўлганида эришилади. Аралаш цикллار учун минимал ёнилғи сарфи 30 кВт қувват томонга сурилади. Турли цикллар учун олинган натижалар 1-жадвалда жамланган.

Ҳаракат цикли ва ЭМ қувватига боғлиқ ҳолда ёнилғи сарфи, анъанавий юритмали автомобиль ёнилғи сарфига солиштирилганда 9-47% ораликда камайган. Энг юқори кўрсаткич NEDC city шаҳар цикли ва ЭМ 20 кВт қувватига тўғри келади.

Ҳисоб натижалари шуни кўрсатдики, тормоз энергияси ва бу энергияни рекуперация қилиш улуши ортиши, ёнилғи сарфини янада камайтиришга хизмат қилади. ЭМ қуввати ошиши билан ИЁД юқори самарадорлик зоналарида ишлашининг ёнилғи сарфи камайишига таъсири пасаяди. Бу энергиянинг бир турдан иккинчи турга айлантиришининг самародрлиги пасайиши билан боғлиқ. Тормоз энергиясини рекуперация қилиш самараси ЭМ қуввати 30 кВт гача ошиб боради ва кейин пасаяди. Қувват ошиши билан батарея ва ЭМ массалари ошиб, тормозлаш энергияси ўзгармас қолади.

**Турли ЭМ қувватлари ва ҳаракат цикллари учун ёнилғи сарфи
ҳисоб натижалари**

Ҳаракат цикли	Параметр			
	Минимумга эришиш учун зарур ЭМ қуввати, кВт	Стоп/старт тизимсиз ёнилғи сарфи камайиши, %	Стоп/старт тизими билан ёнилғи сарфи камайиши, %	Фарқ, %
NEDC	30	21.8 %	29.2 %	7.4 %
NEDC city	20	31.2 %	47.3 %	16.1 %
WLTC	35	17.4 %	22 %	4.6 %
UDDS	30	24.9 %	32.2 %	7.3 %
НWFET	50	8.9 %	9.3 %	0.4 %

ИЁД салт ишлашда ўчиришнинг самараси ЭМ қуввати қийматига боғлиқ эмас ва ўзгармас миқдорга эга. NEDC цикли мисолида, ёнилғи сарфининг камайишининг асосий қисми тормоз энергиясини рекуперация қилиш орқали эришилади ва 20% гача етади. ЭМ ёрдамида ИЁДни самарадорлиги юқори зоналарда ишлатиш орқали 4% ёнилғи сарфини камайтиришга эришиш мумкин. ИЁДни салт ишлаш режимларида ўчириш орқали 8% ёнилғи иқтисодига эришиш мумкин. ЭМ қуввати ошиши билан ИЁД юқори самадорлик зоналарида ишлаш фойдаси камаяди.

«Экспериментал тадқиқотлар» га бағишланган **учунчи бобда** – ишлаб чиқилган математик ва Matlab/Simulink дастуридаги имитацион моделлар ишончлилигини баҳолашда дунёнинг етакчи лабораториялари томонидан ўтказилган экспериментал тадқиқот натижалари билан таққосланган. Бу экспериментал натижалар АҚШ Ёнилғи ва транспорт воситаларининг миллий лабораторияси NVFEL (National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory) томонидан Toyota Camry LE 2018 автомобилида ва Аргонн миллий лабораторияси (Argonne National Laboratory) томонидан Kia Soul 2015 электрик автомобилида олинган. Шунингдек, Айдахо миллий лабораториясининг (Idaho National Laboratory) истиқболли автомобиллар бўлимида олинган батареянинг экспериментал наижаларидан фойдаланилган.

Экспериментал тадқиқот дастурига қуйидагилар киритилган:

- Toyota Camry LE 2018 автомобили двигателининг динамометрик стенддаги синовлар;
- Toyota Camry LE 2018 автомобилнинг динамометрик стендда турли ҳаракат циклларидаги синовлар;
- Kia Soul 2015 электр автомобилнинг динамометрик стендда турли ҳаракат циклларидаги синовлар.

Экспериментал тадқиқотлар натижаси имитацион ҳисоб модели натижалари билан фақат ИЁД ва фақат электр юритмада ҳаракатланган ҳолатлар учун таққосланди. Бундай ёндашув гибрид юритмали автомобил юқорида келтирилган иккита режимда турли юкламаларда ишлай олиши билан асосланади. ИЁД ва ЭМ биргаликда ишлаган режимларда улар қисман юкланган режимларда ишлайди. Ишлаб чиқилган модел квазистатик тенгламаларга асосланганлиги сабабли гибрид юритманинг иш режимларини алоҳида режимлар тўплами сифатида тавсифлаш мумкин.

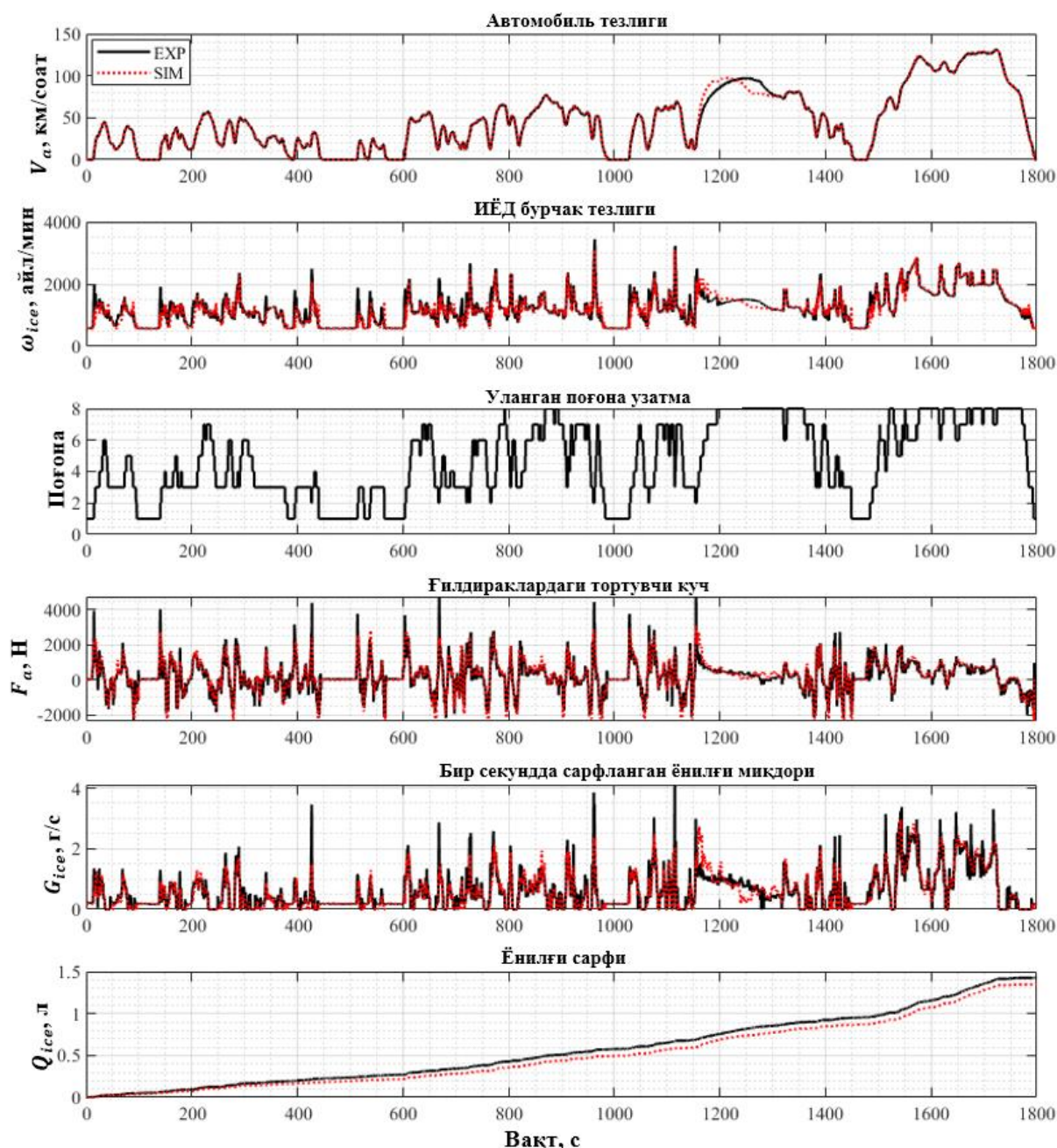
Экспериментал тадқиқотлар объекти сифатида иккита автомобиль (Toyota Camry LE 2018, массаси 1644 кг, 4 цилиндрли, бир қатор ИЁД, ишчи ҳажми 2.5 л ва электромобиль Kia Soul 2015, массаси 1664 кг) танланди ва барабан типдаги динамометрик стенда турли ҳаракат циклларида (NEDC, WLTC, UDDS ва бошқалар) синовлар ўтказилган. Дискрет датчиклардан олинган маълумотлар CAN (Controller Area Network) шинаси орқали динамометрик стенд таркибидаги ахборот-ўлчов тизимига ёзиб борилган.

Динамометрик стенда ИЁД автоматик узатмалар қутиси орқали юкламага уланган. Бу ўз навбатида ИЁДнинг реал иш шароитини имитация қилишга имкон беради (айниқса, гидротрансформатор фаол бўлган паст бурчак тезликларда). Синов жараёнларида, октан индекси 87 (АИ-92 тўғри келади) бўлган бензин ёнилғиси ишлатилган.

WLTC ҳаракат цикли учун синов ва ҳисоб натижалари солиштирилган график 10-рамда келтирилган. Расмдан кўриниб турганидек, чиқувчи сигнал ҳисобланган автомобиль тезлигининг (км/соат) синов (EXP) ва ҳисоб (SIM) натижалари юқори аниқликда мос келади. Бу бир томондан фойдаланилган стенднинг иш принципига (стенд киритилган тезлик профили сигналинини аниқ ушлашга ҳаракат қилади), бошқа томондан моделлаштиришда тескари ёндашувдан фойдаланилганлиги билан боғлиқ.

Поғоналарни ўзгартириш вақти ва тезлигидаги ҳисоб ва синовдаги фарқнинг олдини олиш мақсададида ҳисоб моделига экспериментда олинган поғоналарни ўзгартириш вақти вектори кирувчи сигнал сифатида ишлатилди. Салт ишлаш жараёнида биринчи поғона уланган ҳолда қолдирилди. Шу сабабдан поғонани ўзгартириш графигида ҳисоб модел натижаси келтирилмаган.

Ёнилғи сарфи (г/с) учун эксперимент ва ҳисоб натижалари шаҳар ҳаракат шароитининг барқарор режимларида ва магистрал ҳаракат циклларида юқори аниқликда мос келади. Аммо транзит режимлардаги пик қийматлар квазистатик модел томонидан етарлича инобатга олинмаган. Салт ишлаш режимида ёнилғи сарфи 0.18 г/с тенг деб қабул қилинган.



10-расм. Ҳисоб ва тажриба тадқиқотлари натижаларини WLTC цикли учун таққослаш: Автомобиль тезлиги (км/соат), ИЁД бурчак тезлиги (айл/мин), поғона, ғилдирақлардаги тортувчи куч, ёнилғи сарфи (г/с) ва цикл давомида ёнилғи сарфи (л)

2-жадвалда Toyota Camry автомобили ва турли ҳаракат цикллари учун босиб ўтилган масофа, ҳаракат цикли бўйича ёнилғи сарфи ва 100км га тўри келадиган ёнилғи сарфларининг экспериментал ва ҳисоб натижалари келтирилган.

Турли ҳаракат циклларида олинган натижалар, автомобиль томонидан ҳаракат циклида босиб ўтилган масофа фарқи 3.1% дан, 100км га тўри келадиган ёнилғи сарфлари фарқи 7% дан ва ҳаракат цикли бўйича ёнилғи сарфи фарқи 7.3% дан ошмаслигини кўрсатди. Ўтиш режимлар улуши ва ҳаракат интенсивлиги ошиши билан экспериментал ва ҳисоб натижалари

орасидаги фарқ ҳам ошган. Мисол учун, шаҳар цикли бўлган UDDS ўтиш режимлари улуши кўплиги сабабли бу фарқ энг катта қийматга эга.

2-жадвал

Toyota Camry автомобили учун босиб ўтилган масофа ва ёнилғи сарфларининг экспериментал ва ҳисоб натижаларини таққослаш

Ҳаракат цикли	Параметр								
	Масофа, км			Ёнилғи сарфи, л/100км			Ёнилғи сарфи, л		
	EXP	SIM	%	EXP	SIM	%	EXP	SIM	%
NEDC	11.04	10.93	-1	6.201	6.044	-2.5	0.685	0.661	-3.5
WLTC	23.27	23.26	0.005	6.132	5.798	-5.5	1.427	1.349	-5.5
UDDS	12.04	11.99	-0.04	6.598	6.39	-7	0.794	0.736	-7.3
HWFET	16.47	16.51	+3.1	4.36	4.487	+2.9	0.718	0.741	+2

Kia Soul 2015 электрик автомобилени синаш жараёнида асосий ўлчов катталиклари бўлган: барабан бурчак тезлиги (автомобиль тезлигини ифодалайди), ҳаракатга қаршилик кучлари қиймати, батарея ток кучи, кучланиши ва унинг зарядланганлик даражаси ёзиб борилган. Маълумотларни ёзишда CAN шинаси орқали контактсиз ток кучини ўлчаш қурилмаларидан фойдаланилган.

Синовлар ҳаво совутгичи (кондиционер) ёқилган ва ҳавонинг турли ҳароратларида, турли ҳаракат циклларида ўтказилган. Бу ўз навбатида, қўшимча юкларнинг ўзгаришини таъминлаган.

Электромобиль энергия сарфи SAE J1634 ("Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure") процедурасида (1993 цил майдан амалда, 2012 й октябр ойида янгиланган) келтирилган кетма-кетлик орқали аниқланади. Бу процедура АКШ атроф-муҳитни сақлаш агентлиги (EPA - Environmental Protection Agency) ва Автомобиль муҳандислари ҳалқаро ҳамжамияти SAE (Society of Automotive Engineers) томонидан тақлиф қилинган. Бу процедурага асосан электр автомобили электр энергия сарфи синови турли ҳаракат циклларида амалга оширилади.

Экспериментал тадқиқотлар натижаларини олиш қуйидаги кетма-кетликда амалга оширилган:

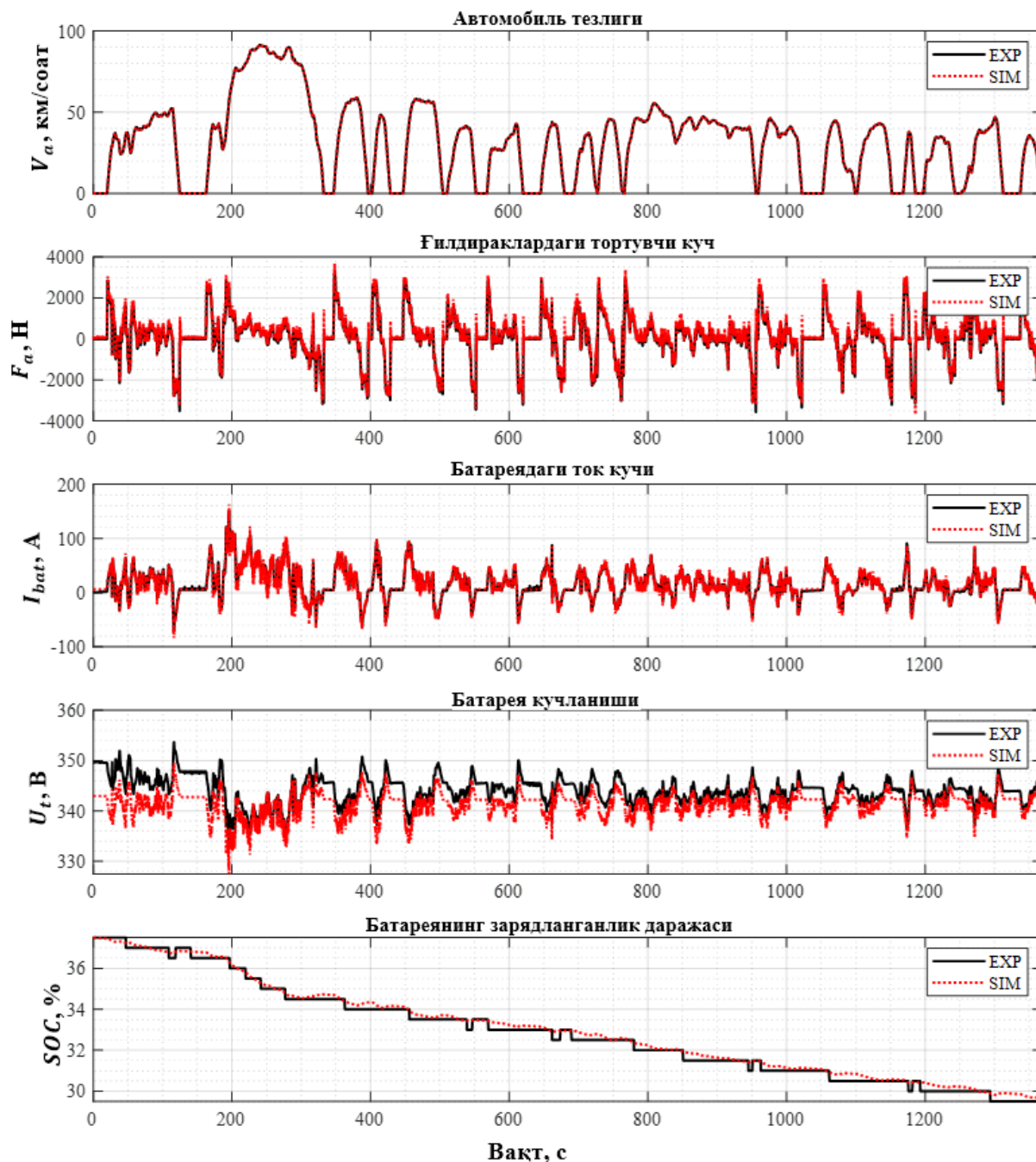
- Электрик автомобиль динамометрик стендга тўлиқ зарядланган (95%) батарея ва салон кондиционери ишга туширилган ҳолда жойлаштирилади;

- 1-Фаза – Энергия сарфи ҳаракат цикллари комбинациясида (UDDS + HWFET + тўхташ + UDDS + US06) ўлчанади;

- 2-Фаза – 65 миль/соат (104 км/соат) ўзгармас тезлик + тўхташ + US06 магистрал ҳаракат цикли амалга оширилади;

- 3-Фаза – UDDS + HWFET+ тўхташ + UDDS ҳаракат цикллари комбинацияси амалга оширилади;
- 4-Фаза – Автомобиль 65 миль/соат (104 км/соат) ўзгармас тезлик билан батарея тўлиқ разрядлангунча ҳаракатланади;

Бундан кейин автомобиль батареяси яна тўлиқ зарядланиб синов жараёни ўчирилган кондиционер билан юқоридаги кетма-кетликда амалга оширилади.



11-расм. Электрик автомобилнинг динамометрик стенда синов натижалари. UDDS шаҳар циклининг 3-фазаси охириги қисми.

11-расмда UDDS шаҳар ҳаракат циклининг 3-фазаси учун электр автомобилнинг динамометрик стендаги экспериментал ва ҳисоб натижалари таққосланган.

Kia Soul электрик автомобилнинг босиб ўтилган масофа ва энергия сарфи (бошланғич SOC_0 ва якуний SOC зарядланганлик даражаси фарқи) қийматлари экспериментал ва ҳисоб натижалари 3-жадвалда келтирилган. Электрик автомобилнинг энергия сарфи EPA жараёни бўйича аниқланади. Бу жараён шаҳар UDDS ва магистрал HWFET цикларида турли қўшимча юкламаларда синов ўтказишни ўз ичига олади.

3-жадвал

Kia Soul электрик автомобилнинг босиб ўтилган масофа ва энергия сарфи экспериментал ва ҳисоб натижаларини таққослаш

Ҳаракат цикли	Параметр							
	Масофа, км			Қўшимча юклама	SOC (%)			
	EXP	SIM	%		Вт	SOC_0	EXP	SIM
HWFET	16.51	16.51	0	5000	83.5	72	71.9	-0.1
UDDS	12.04	11.99	-0.04	5000	95	83.5	84.25	+1
UDDS	12.04	11.99	-0.04	2000	37.5	29.5	29.71	+0.8

«Тавсиялар ишлаб чиқиш ва юритмани гибридлаштиришнинг иқтисодий самарасини ҳисоблаш» га бағишланган тўртинчи бобда автомобиль гибрид юритмаси параметр ва бошқарув режимларини танлаш бўйича тавсиялар ва юритмани гибридлаштиришнинг иқтисодий самараси ҳисоблари келтирилган.

Мавжуд гибрид юритмали автомобиллар таҳлили, бу автомобилларнинг ИЁД максимал қуввати, минимал тезланиш талабини бажариш учун зарур бўлган қувватдан юқори эканлигини кўрсатди. Бундай танлов, батарея зарядланганлик даражаси кам ёки ҳаракат жараёнида батареяни зарядлаш зарурати бор ҳолларда ИЁДнинг автомобиль ҳаракатини ёлғиз таъминлаши зарурияти билан асосланади.

Шу сабабдан автомобиль юритмасини гибридлаштиришда ИЁД қувватини ўзгармас сақлаб қолиш мақсадга мувофиқ. Бунда, унинг солиштирма қуввати қуйи чегарасини 48 кВт/т атрофида танлаш лозим.

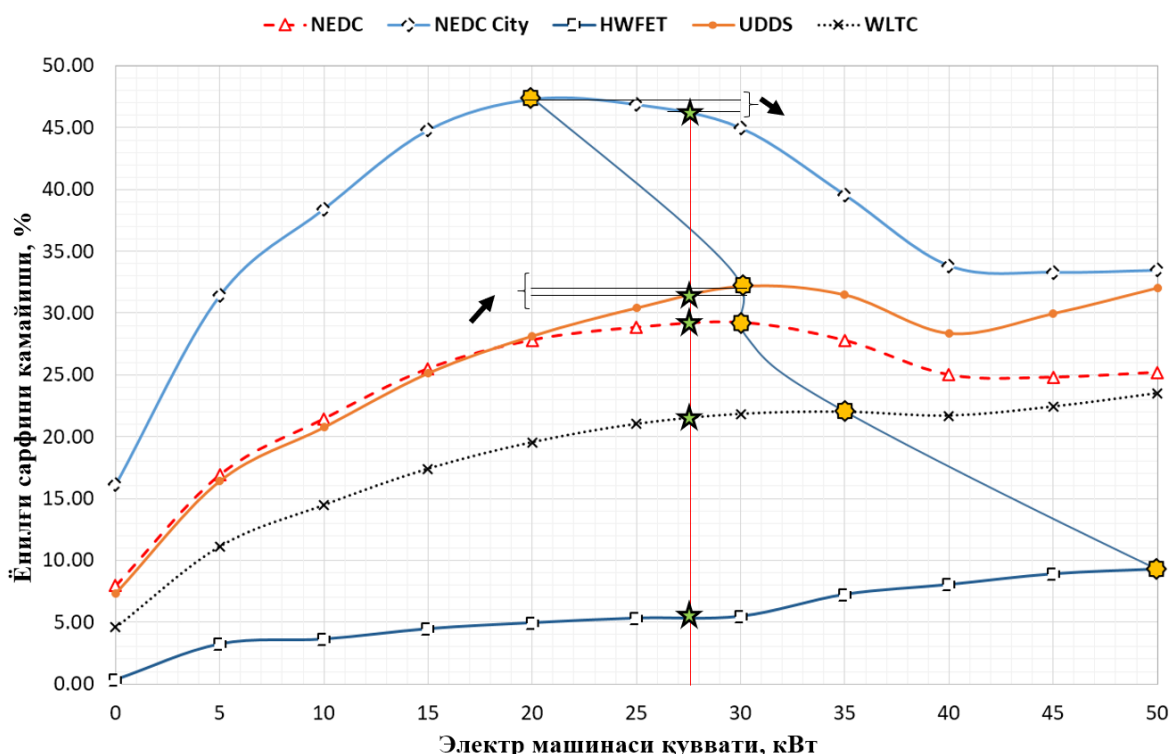
Ташқаридан зарядлаш имконияти бўлмаган гибрид юритмали автомобиллар батареяси сиғимини танлашда унинг электр машинаси максимал қувватини таъминлаш талабидан келиб чиқилади. Бунда батареянинг тури муҳим ўрин тутади. Ташқаридан зарядлаш имконияти бўлмаган гибрид юритмали автомобилларда юқори солиштирма қувватга (кВт/кг) эга батареялар танланилади. Замонавий турдаги C_{rate} батареяларда

разряд темпи 40 гача етади.

4-жадвал

ЭМ турли қувватлари ва ҳаракат цикллари учун автомобиль ёнилғи сарфи камайиши жадвали

Қувват, кВт	Ҳаракат цикли				
	NEDC	NEDCcity	HWFET	UDDS	WLTC
0	7.93	16.13	0.34	7.31	4.57
5	16.91	31.43	3.23	16.41	11.12
10	21.45	38.44	3.62	20.76	14.47
15	25.50	44.83	4.45	25.15	17.40
20	27.82	47.32	4.94	28.16	19.54
25	28.83	46.89	5.32	30.43	21.01
30	29.23	45.00	5.47	32.18	21.82
35	27.77	39.57	7.24	31.49	21.99
40	24.99	33.85	8.03	28.38	21.68
45	24.81	33.32	8.90	29.98	22.42
50	25.20	33.49	9.29	32.06	23.50



12-расм. Ёнилғи сарфининг ЭМ турли қувватлари ва турли ҳаракат циклларида камайиш кўрсаткичлари

ИЁД қувватини ўзгармас сақлаган ҳолда, электр машинаси максимал қувватини танлаш ёнилғи сарфини минималлаштириш тадқиқотнинг асосий масаласи ҳисобланади. Турли ҳаракат цикллари учун гибрид юритманинг

электр машинаси қуввати турли қийматларидаги ёнилғи сарфи 4-жадвалда умумлаштирилган. Натижалар NEDC city шаҳар ҳаракат циклида ЭМ қуввати 20 кВт бўлганда энг яхши ёнилғи самарадорлик кўрсаткичига эришиш мумкинлигини кўрсатди. Бошқа ҳаракат циклларида бу минимал қиймат бошқа ЭМ қувватида эришилади. Натижада бошқа циклларида ёнилғи самарадорлик 20 кВт қувватли ЭМ ишлатилганда шу цикл учун минималга нисбатан бироз камаяди. Мисол учун NEDC циклида минимал қиймат 30 кВт қувватда эришилади ва 20 кВт қувватда ёнилғи самарадорлик бу минимумга нисбатан 1.38%га камаяди.

Одатда, ҳисоб ва синов тадқиқотлари меъёрий ҳаракат циклларида амалга оширилсада, автомобилнинг реал ҳаракат шароитлари номаълум. Шу сабабдан муайян ЭМ қуввати ва турли ҳаракат циклларида олинган ёнилғи сарфи камайиш қийматлари йиғиндиси амалий томондан ЭМ қувватини танлаш имконини беради. 4-жадвалда бу қувват қиймати 25-30 кВт оралиғида жойлашган. Бу принципнинг график кўриниши 12-расмда келирилган. Чизиқлар турли ҳаракат цикллари натижаларини ифодалайди.

ХУЛОСА

“Автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлашнинг илмий асослари” диссертация мавзуси бўйича бажарилган тадқиқот асосида қуйидаги умумий хулосалар шакллантирилди:

1. Гибрид юритмали автомобиллар иши таҳлили, юритма параметрларини ўзгартириш, мавжуд конструкцияга жорий этиш ва тузилиши соддалиги жиҳатидан P2 параллел конфигурация истиқболли эканлигини кўрсатди. Шунингдек, бу конфигурация минимал конструктив ўзгаришлар орқали гибридизация даражасини ўзгартириш имконини беради.

2. Автомобиль ва электротехника назариялари тенгламалари асосида гибрид юритма компонентлари математик модели ва улар орқали автомобилнинг Matlab/Simulink дастуридаги ҳисоб (имитацион) модели ишлаб чиқилди. Ҳисоб модели автомобилнинг меъёрий ҳаракат циклларидаги ёнилғи ва энергия сарфини аниқлаш имконини беради.

3. Автомобиль гибрид юритмаси бошқарув режимларини танлашнинг методи ишлаб чиқилди. Бу бошқарув режими кўп параметрли эквивалент ёнилғи сарфини (ИЁД ёнилғи ва батарея электр энергияси сарфлари йиғиндиси) ифодаловчи мақсад функциясини минималлаштириш ҳисобига энг кам ёнилғи сарфига эришишни таъминлайди.

4. Автомобиль гибрид юритмаси параметрларини танлаш орқали унинг ёнилғи-тежамкорлик хусусиятини яхшилиш методи ишлаб чиқилди. Ишлаб чиқилган метод ёрдамида олинган ҳисоб натижалари, электр машинаси қуввати ва ҳаракат циклига боғлиқ ҳолда ёнилғи сарфини анъанвий юритмали автомобилга нисбатан 9–47% га камайтириш мумкинлигини кўрсатди.

5. Ёнилғи сарфининг энг кўп камайиш кўрсаткичи NEDC city шаҳар циклига электр машинаси қуввати 20 кВтга тенг бўлганда эришилди. Тормоз

энергияси ва бу энергияни рекуперацияси улуши ортиши ёнилғи сарфининг янада камайишига олиб келиши аниқланди.

6. Гибрид юритмали автомобиль имитацион моделининг ёнилғи ва энергия сарфлари ҳисоби натижалари ишончлилигини экспериментал баҳолаш услуби ишлаб чиқилди. Toyota Camry LE автомобили учун турли цикллардаги ёнилғи сарфининг эксперименталга нисбатан ҳисоб натижалари 7.3 % га кўплиги аниқланди. Бу фарқ асосан ўтиш режимлари билан боғлиқ. Ўтиш режимлар улуши ва ҳаракат интенсивлиги ошиши билан экспериментал ва ҳисоб натижалари орасидаги фарқ ҳам ортади. Kia Soul электрик автомобили энергия сарфининг экспериментал ва ҳисоб натижалари 1% фарқ қилиши аниқланди.

7. Реал ҳаракат шароитларида электр машинаси рационал қувватини аниқлаш имконини берувчи, автомобиль гибрид юритмаси параметрлари ва бошқарув режимларини танлаш усули ишлаб чиқилди.

8. Битта Toyota Camry автомобили мисолида юритмани гибридлаштириш орқали CO₂ эмиссиясини 32-37 г/км камайтириш ва бу ўз навбатида жарималарни 2185-3600 евро камайтириб иқтисодий самара бериши ҳисобланди.

9. Йилига 20 минг км масофа ҳисобидан битта автомобилдан ўртача 700 л бензин иқтисод қилиш мумкин.

10. Гибрид юритмали автомобилларда ёнилғи-тежамкорлик хусусиятларини янада яхшилашни чекловчи асосий омил кўп жиҳатдан ҳаракат шароитлари тўғрисида олдиндан маълумот етишмаслиги билан тушунтирилиши аниқланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
DSc.18/30.12.2019.T.09.01 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТУРИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ В ГОРОДЕ
ТАШКЕНТЕ**

РУЗИМОВ САНЖАРБЕК КОМИЛОВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ
УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО ПРИВОДА АВТОМОБИЛЯ**

05.08.06 – Колесные и гусеничные машины и их эксплуатация

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент– 2022

Тема диссертации доктора наук (DSc) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2021.4.DSc/T483.

Диссертация выполнена в Туринском политехническом университете в городе Ташкенте. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу <https://tstu.uz/> и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziynet.uz.

Научный консультант:

Мухитдинов Акмал Анварович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Базаров Бахтияр Имамович
доктор технических наук, профессор

Абдазимов Анвар Дониёрович
доктор технических наук, профессор

Файзиев Шерзод Собирович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

Ферганский политехнический институт

Защита диссертации состоится на заседании Ученого совета DSc.18/30.12.2019.T.09.01 при Ташкентском государственном транспортном университете в 2022 г. «10» 09 1900 часов. (Адрес: 100167, г. Ташкент, улица Темирийўлчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01, факс: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashit@exat.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (зарегистрирован под номером 063). (Адрес: 100167, г. Ташкент, улица Темирийўлчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01, факс: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashit@exat.uz).

Автореферат диссертации разослан «20» 08 2022 года.
(реестр Протокола рассылки № 15 от «14» 06 2022 года).



А.А.Рискулов
Председатель Научного совета по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

Р.М. Худайкулов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению учёных степеней, PhD, профессор

Ш.П. Алимухамедов
Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))

Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мире в сфере автомобильного транспорта эффективное использование энергетических ресурсов, эксплуатационных материалов является значимым фактором роста экономики и обеспечения экологической безопасности. Автомобильный транспорт служит основным потребителем ископаемого топлива и одним из основных источников загрязнения атмосферы; по данным международных организаций, выбросы CO₂ от передвижных источников составляют 70 - 90% от общего объёма выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в городах. В связи с этим в развитых зарубежных странах, таких как США, Япония, Китай, Россия, Европейские страны и др., был достигнут определённый прогресс за счёт особого внимания к вопросу повышения эффективности производства в сфере энергетики, экологии и экономики. На сегодняшний день особое место занимают научные исследования по внедрению электронных систем управления различными системами и механизмами автомобиля⁴.

В мире в настоящее время автопроизводителями особое внимание уделяется исследованиям, направленным на решение проблем снижения расхода топлива и количества выхлопов вредных газов путём внедрения гибридных приводов при проектировании автомобилей. Особое значение при этом играет гибридный автомобиль с параллельной схемой привода, в котором мощность к ведущим колёсам подводится отдельными ветвями от двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя. В связи с этим разработана научно обоснованная методика выбора параметров и режимов работы гибридного привода автомобиля в зависимости от специфических требований, предъявляемых к конкретному классу автомобиля и их режимов движения, является основной задачей теоретических и прикладных исследований современности.

В республике особое внимание уделяется внедрению требований по энергоэффективности при использовании природных и сырьевых ресурсов. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы особо подчёркивается, что необходимы «снижение потребления энергии и ресурсов в экономике, повсеместное внедрение в производство энергосберегающих технологий»⁵. В связи с этим в сфере автомобильного транспорта предопределяется важность разработки метода выбора режимов управления гибридным приводом автомобиля, обеспечивающим наименьший расход топлива путём разделения требуемого крутящего момента между тяговыми источниками, разработки метода выбора параметров гибридного привода автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств, а также усовершенствования методов использования имитационной модели расчёта расхода топлива и энергии

⁴ Robert Bosch GmbH, Bosch Automotive Handbook, 10th Edition, 2018 – 1750 p. ISBN: 978-1-119-53081-7.

⁵ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

автомобиля с гибридным приводом.

Данное диссертационное исследование служит реализации задач, определённых в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3012 от 26 мая 2017г. «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017 – 2021 годы», № ПП-3589 от 6 марта 2018 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы управления автомобильным транспортом», № ПП-4230 от 6 марта 2019г. «О мерах по кардинальному совершенствованию системы грузовых и пассажирских перевозок», № ПП-4477 от 4 октября 2019г. «Об утверждении стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зелёную» экономику на период 2019 — 2030 годов», а также в других нормативно-правовых актах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение».

Обзор зарубежных исследований по теме диссертации⁶. Широкие теоретические и практические исследования по выбору параметров и режимов работы гибридного привода автомобиля для улучшения показателей топливной экономичности и их тягово-скоростных свойств ведутся в таких университетах и научных лабораториях, как Техасский сельскохозяйственный и механический университет (США), Швейцарская высшая техническая школа Цюриха (Швейцария), Туринский политехнический университет (Италия), Стэнфордский университет (США), Мюнхенский технический университет, Брауншвейгский технический университет (Германия), Аргоннская национальная лаборатория, Национальная лаборатория Айдахо (США) и ряд других учреждений.

На мировом уровне получены следующие важные научные результаты по выбору параметров и режимов работы гибридного привода автомобиля, в том числе: предложены способы выбора параметров тягового гибридного привода автомобиля, применением режима управления, основанного на логических правилах (Техасский сельскохозяйственный и механический университет, США); разработана модель движения автомобиля с различными конфигурациями гибридного привода и исследованы вопросы использования динамического программирования для определения режимов управления гибридным приводом (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Швейцария); разработан режим управления использованием принципа минимума Понтрягина (Стэнфордский университет, Университет штата Огайо, США); изучены вопросы влияния конфигурации гибридного привода на его энерго-экологические показатели и разработаны конструктивные

⁶www.tamu.edu, www.ethz.ch, www.polito.it, www.stanford.edu, www.tum.de, www.tu-braunschweig.de, www.anl.gov, avt.inl.gov, www.osu.edu, www.clemson.edu, www.polimi.it, www.kth.se, www.chalmers.se.

решения трансмиссий с двойным сцеплением, обеспечивающие высокие динамические и топливно-экономические показатели автомобилей с гибридным приводом (Брауншвейгский технический университет, Германия).

Степень изученности проблемы. Из зарубежных учёных большой вклад в развитие проектирования гибридных приводов и улучшение режимов их работы внесли М. Ehsani, А. Emadi, Z. Rahman, L. Guzzella, G. Rizzoni, S. Onori, А. Tonoli, N. Amati, Т. Hofman, F. Kucukay, А. Sciarretta, O Sundström и мн.др.

В нашей республике вопросами улучшения тягово-скоростных и топливно-экономических свойств двигателя и автомобиля в целом для различных условий эксплуатации, видов топлива, трансмиссии и мехатронных блоков управления занимались учёные С.М. Кадыров, Ш.П. Алимухамедов, Дж.Р. Кульмухамедов, Б.И. Базаров, А.А. Мухитдинов, Ж.Ш. Иноятходжаев и др.

В результате их исследований было достигнуто улучшения топливно-экономических и эксплуатационных показателей автомобилей с различными двигателями при жарком и сухом климате, путём согласованного управления двигателя и бесступенчатой трансмиссии, использования мехатронных систем управления двигателем на основе нейронных сетей.

Хотя в данных исследованиях представлены пути и методы улучшения вышеуказанных свойств автомобиля, внедрение гибридного привода открывает новые возможности по улучшению тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля.

Анализ существующих исследований показал, что на сегодняшний день необходимо научное обоснование выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, которое позволит достичь наименьшего расхода топлива, сохраняя показатели динамичности при различных условиях эксплуатации.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Часть диссертационного исследования выполнена, согласно плану научно-исследовательских работ, в рамках проектов: 18.11. «Улучшение энергосбережения на автомобиле и защита экологии при использовании гибридной системы привода» (2003 – 2005); А-13-068 «Научные основы выбора параметров и режимов управления перспективной конструкцией автомобиля по топливной экономичности и экологической безопасности» (2006 – 2008), в которых диссертант являлся ответственным исполнителем.

Целью исследования является разработка научно обоснованного метода выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, позволяющего достичь наилучших показателей топливной экономичности для различных условий эксплуатации с учётом требований к динамике.

Задачи исследования:

обосновать выбор перспективной конфигурации гибридного привода автомобиля на основе анализа литературы;

создать математическую модель движения автомобиля с гибридным приводом, которая позволит рассчитать расход топлива и электрической энергии при движении автомобиля на различных нормированных ездовых циклах;

создать имитационную модель движения автомобиля с гибридным приводом на различных нормированных ездовых циклах с использованием программных пакетов Matlab/Simulink;

разработать метод выбора режимов управления гибридным приводом автомобиля, обеспечивающий наименьший расход топлива путем разделения требуемого крутящего момента между тяговыми источниками;

разработать метод выбора параметров гибридного привода автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств;

экспериментально оценить достоверность разработанной имитационной модели расчёта расхода топлива и энергии автомобиля с гибридным приводом;

определить основные факторы, ограничивающие дальнейшее улучшение топливно-экономических свойств автомобиля с гибридным приводом;

предложить рекомендации по выбору параметров и режимов управления гибридным приводом автомобиля по достижению наилучшей топливной экономичности;

Объектом исследования являются легковые автомобили с гибридным приводом параллельной конфигурации (P2).

Предмет исследования составляют параметры и режимы управления гибридным приводом автомобиля.

Методы исследования. В ходе исследования применены многопараметрические оптимизационные методы, методы расчёта расхода топлива и энергии, методы эксперимента, регрессионный анализ, методы математической статистики и имитационного моделирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

улучшен метод расчёта расхода топлива и электрической энергии при движении автомобиля с гибридным приводом на нормированных ездовых циклах, включающий математические модели автомобиля и компонентов тягового привода на основе разработанных алгоритмов и расчётных моделей;

разработан метод выбора режимов управления гибридным приводом автомобиля, обеспечивающий наименьший расход топлива, основанный на минимизации эквивалентного расхода топлива;

разработан метод выбора параметров гибридного привода автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств путём выбора их мощностных показателей;

разработанные методы выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, усовершенствованные с помощью имитационной модели движения автомобиля;

обоснована методика экспериментальной оценки достоверности имитационной модели расчёта расхода топлива и энергии автомобиля с гибридным приводом путём их сопоставления с результатами стендовых

испытаний;

разработан способ определения основных факторов, ограничивающих дальнейшее улучшение топливно-экономических свойств автомобиля с гибридным приводом, путём расчёта запаса энергии по ездовому циклу.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

обоснованы методы, позволяющие определить параметры гибридного привода и режимы его управления по достижению наименьших расходов топлива для конкретных условий движения на стадии проектирования гибридного привода автомобиля;

показана возможность использования разработанных методов при выборе моделей автомобиля и/или выборе компонентов электрического привода, согласованном с характеристиками штатного двигателя внутреннего сгорания автомобиля, приспособленного к конкретным условиям движения;

разработан метод выбора источников энергии тягового привода путём расчёта энергии, необходимой для движения автомобиля на нормированных ездовых циклах;

предложен метод выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов проведённого исследования обосновывается их соответствием данным экспериментов, проведённых ведущими лабораториями мира, и данным из научных публикаций ведущих в отрасли изданий.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость исследования обосновывается разработанным методом выбора параметров и режимов управления гибридным приводом автомобиля. Практическая значимость полученных результатов определяется экономией топливно-энергетических ресурсов, способствующей охране окружающей среды путём выбора параметров и режимов управления гибридного привода в процессе разработки автомобиля, а также метода выбора параметров гибридного привода автомобиля по определению наиболее подходящих моделей автомобилей в конкретных условиях эксплуатации.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по разработке научной основы выбора параметров и режимов управления гибридным приводом:

в научно-конструкторском центре “Research and Development Center” МСНУ при АО «Узавтосаноат» АО внедрены метод и программа расчёта расхода энергии при движении автомобиля на различных нормированных ездовых циклах, а также метод выбора параметров и законов управления гибридным приводом автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств (Акт внедрения “Research and Development Center” МСНУ №054-2021 от 19 ноября 2021г. и Справка АО «Узавтосаноат» №19/04-25-2129 от 22 ноября 2021г.). Результат научного исследования позволяет выбор конструктивных параметров и режимов управления при проектировании или в выборе вновь производимых моделей легковых автомобилей, что позволяет

оценить энергетическую эффективность и определить расход топлива в конкретных условиях движения до реализации прототипов моделей автомобилей;

в НПЦ «Узавтотранстехника» при Министерстве транспорта Республики Узбекистан принята к использованию программа расчёта эквивалентного расхода топлива на различных нормированных ездовых циклах для проведения испытаний по определению эксплуатационных свойств автомобиля с гибридным приводом (Справка НПЦ «Узавтотранстехника» от 19 ноября 2021г.). Внедрение полученных результатов обеспечит снижение затрат труда в 7 раз, а расходы на проведение испытаний – в 5 раз;

в Министерстве транспорта Республики Узбекистан приняты к использованию разработанные методы и программы расчёта расхода энергии автомобиля с гибридным приводом движения (Справка Министерства транспорта Республики Узбекистан №2/7365 от 23 ноября 2021г.). Внедрение указанных методов позволит осуществить выбор моделей автомобилей с наименьшим расходом энергии в местных условиях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования доложены и обсуждены на 10 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 25 научных работ. Из них 13 научных статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации доктора наук (DSc), в том числе 5 – в республиканских и 8 – в зарубежных журналах. Из них 12 публикаций изданы в научных журналах и сборниках материалов конференций и индицируемы в СКОПУС. Кроме того, получено 2 авторских свидетельства на расчётные программы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, выводов, рекомендаций, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 173 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы исследования применения гибридного привода на автомобилях, его основные цели и задачи, охарактеризованы объект и предмет исследования, соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Обоснована научная новизна и изложены результаты исследования по выбору параметров и режимов управления гибридным приводом, а также раскрыта научная и практическая значимость исследования. Даны общие сведения о внедрении результатов исследования в практику, о публикациях по теме диссертации и её структуре.

В первой главе – «Современные конструкции автомобиля с гибридным приводом» – дан научный обзор современного состояния проблемы исследований по снижению расхода топлива путём выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля.

Исходя из этого, рассмотрены методы выбора параметров и режимов управления гибридного привода, а также применение современных достижений техники и технологий для разрешения данной проблемы.

Исследованию выбора параметров и законов управления гибридного привода автомобиля для улучшения показателей топливной экономичности и их тягово-скоростных свойств посвящены работы зарубежных учёных A. Emadi, M. Ehsani, L. Guzzella, G. Rizzoni, S. Onori, A. Tonoli, N. Amati, T. Hoffman, F. Kucukay, A. Sciarretta, O Sundstrom. Из отечественных ученых вопросами улучшения тягово-скоростных и топливно-экономических свойств двигателя и автомобиля в целом для различных условий эксплуатации, видов топлива, трансмиссии и мехатронных блоков управления занимались С.М. Кадыров, Ш.П. Алимухамедов, Дж.Р. Кульмухамедов, Б.И. Базаров, А.А. Мухитдинов, Ж.Ш. Иноятходжаев и др.

Несмотря на то, что в исследованиях указанных авторов представляют пути и методы улучшения свойств автомобиля, внедрение гибридного привода открывают новые возможности по улучшению тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля.

Анализ существующих схем гибридных приводов автомобиля показал, что конфигурация P2 является наиболее перспективной конструкцией гибридного привода автомобиля с учётом необходимости изменения параметров тягового привода, внедрения в существующую конструкцию привода и её простоты. Кроме того, такая конфигурация позволяет варьировать степень гибридизации и включает все возможные режимы работы гибридного привода. Анализ параметров более 110 коммерческих автомобилей с гибридным приводом показывает следующее: максимальная мощность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в этих автомобилях в худшем случае обеспечивает минимальные требования по ускорению автомобиля (рис.1); возможность использования ДВС с меньшим рабочим объёмом (даунсайзинг), который обеспечивает работу двигателя в зоне высокой эффективности, не используется; более 60% таких автомобилей

имеют ёмкость батареи в диапазоне 1 – 2 кВт·ч;

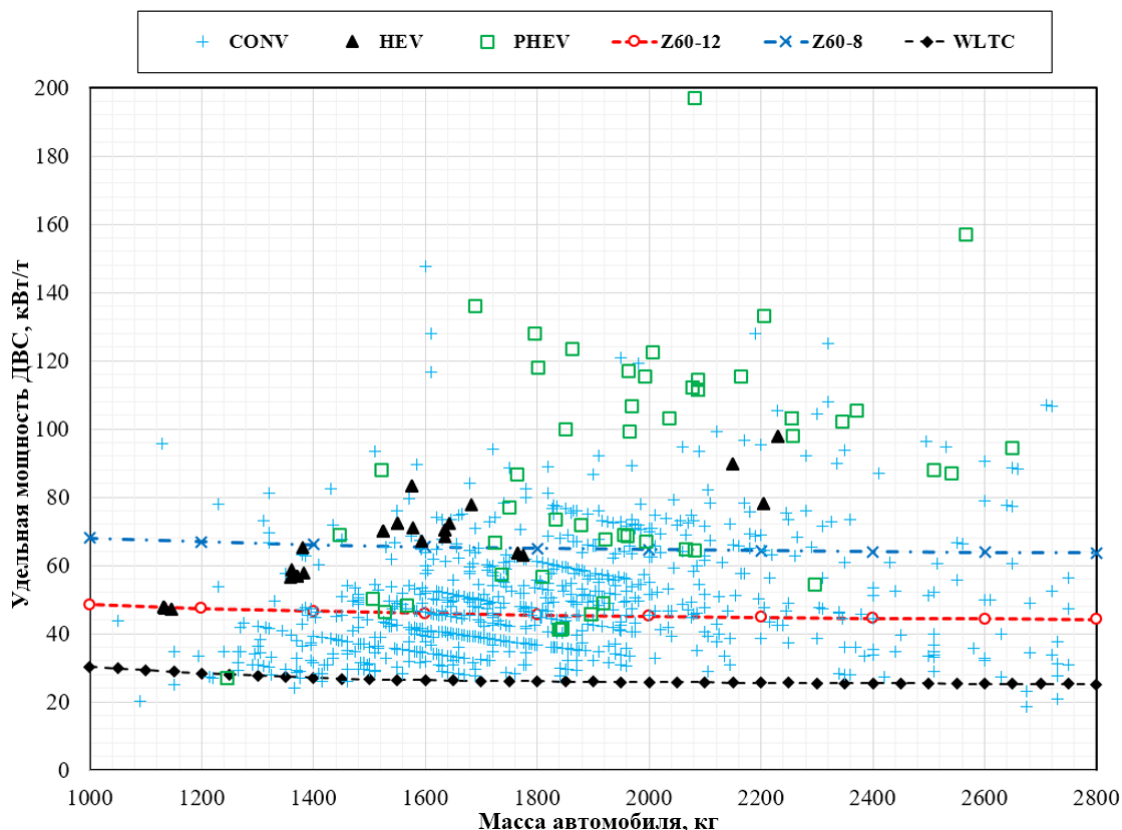


Рис. 1. Удельная мощность ДВС для автомобилей с приводами: механическим (CONV), гибридным без внешней подзарядки (HEV) и гибридным с внешней подзарядкой (PHEV)

Анализ состояния существующих исследований показал, что на сегодняшний день необходимо научное обоснование выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, которое обеспечит наименьший расход топлива, сохраняя показатели динамичности при различных условиях эксплуатации. Следовательно, необходимо научно обосновать выбор параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, позволяющих достичь наилучших показателей топливной экономичности для различных условий эксплуатации с учётом различных требований.

Во второй главе – «Теоретические основы выбора параметров и режимов управления гибридным приводом автомобиля» – проанализированы теоретические основы моделирования движения автомобиля с гибридным приводом на нормированных ездовых циклах, моделирования компонентов гибридного привода и разработки имитационной модели. Кроме того, рассмотрены методы по выбору параметров и режимов управления гибридным приводом.

По принципу обратного моделирования движения автомобиля с гибридным приводом задаётся профиль скоростей по нормированному ездовому циклу. Предполагается, что автомобиль идеально придерживается

заданной скорости без каких-либо отклонений. Далее рассчитываются тяговая сила на колёсах, необходимая для задания соответствующей динамики автомобиля, крутящий момент и угловая скорость, приведённая к входному валу трансмиссии. В зависимости от разделения требуемого крутящего момента между ДВС и электрической машиной (ЭМ) рассчитываются расходы топлива и электрической энергии. Обратная модель состоит из нескольких подсистем, которые представляют различные компоненты гибридного привода, такие как ездовой цикл, динамика автомобиля, трансмиссия, ДВС, ЭМ и батарея. Подсистемами обратной модели являются следующие:

Ездовой цикл. Эта подсистема включает в себя модель ездового цикла, которая состоит из вектора данных времени и соответствующего значения скорости автомобиля. Исходя из разницы между текущим v_i и предыдущим v_{i-1} значениями скорости автомобиля, определяем продольное ускорение/замедление автомобиля a_x , поделив на промежуток расчётного времени Δt :

$$a_x = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t}.$$

Модель продольной динамики автомобиля. В подсистеме модели продольной динамики автомобиля рассчитываются необходимая тяговая сила на колёсах и силы сопротивления автомобиля. Входными переменными являются продольные ускорение a_x и скорость v_x автомобиля, а выходными – требуемый крутящий момент на колёсах T_{gb} , угловая скорость ω_{gb} и ускорение $\dot{\omega}_{gb}$ колёс. Баланс сил при движении можно выразить следующим уравнением:

$$F_x = M \cdot a_x + M \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_f \cdot v_x^2.$$

Требуемый крутящий момент для преодоления сил сопротивления и инерции J_w колес с угловым ускорением $\dot{\omega}_w$, можно выразить как

$$T_{gb} = F_x \cdot R_w + 4 \cdot J_w \cdot \dot{\omega}_w.$$

Модель трансмиссии включает в себя функцию коробки передач и главной передачи, которые предназначены для увеличения крутящего момента и снижению угловой скорости ДВС и/или ЭМ. Как отмечалось, момент переключения передач и скорости, при которых должно осуществляться переключение, задаётся в модели ездового цикла. Зависимость крутящего момента, необходимого на входном валу T_{req} , от крутящего момента на колесах T_{gb} выражается в виде

$$T_{req} = \begin{cases} \frac{T_{gb}}{i_{gb.i} \cdot i_f \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_f}, & \text{если } T_{gb} \geq 0 \text{ (тяговый режим)}, \\ \frac{T_w \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_f}{i_{gb.i} \cdot i_f}, & \text{если } T_{gb} < 0 \text{ (тормозной режим)}, \end{cases}$$

где i_{gb} и i_f – передаточное отношение; η_{gb} и η_f – коэффициенты полезного действия, соответственно, коробки передач и главной передачи.

Модель электронного блока управления (ЭБУ) отвечает за выбор режима управления гибридным приводом автомобиля. В зависимости от состояния входных параметров ЭБУ определяет распределение требуемого крутящего момента (T_{req}) между ДВС (T_{ice}) и ЭМ (T_{em}). При этом угловые скорости ДВС (ω_{ice}) и ЭМ (ω_{em}) равны, так как они имеют общий вал вращения. Вышеуказанная модель выражается следующими уравнениями:

$$T_{req} = T_{ice} + T_{em},$$

$$\omega_{ice} = \omega_{em} = \omega_{req}.$$

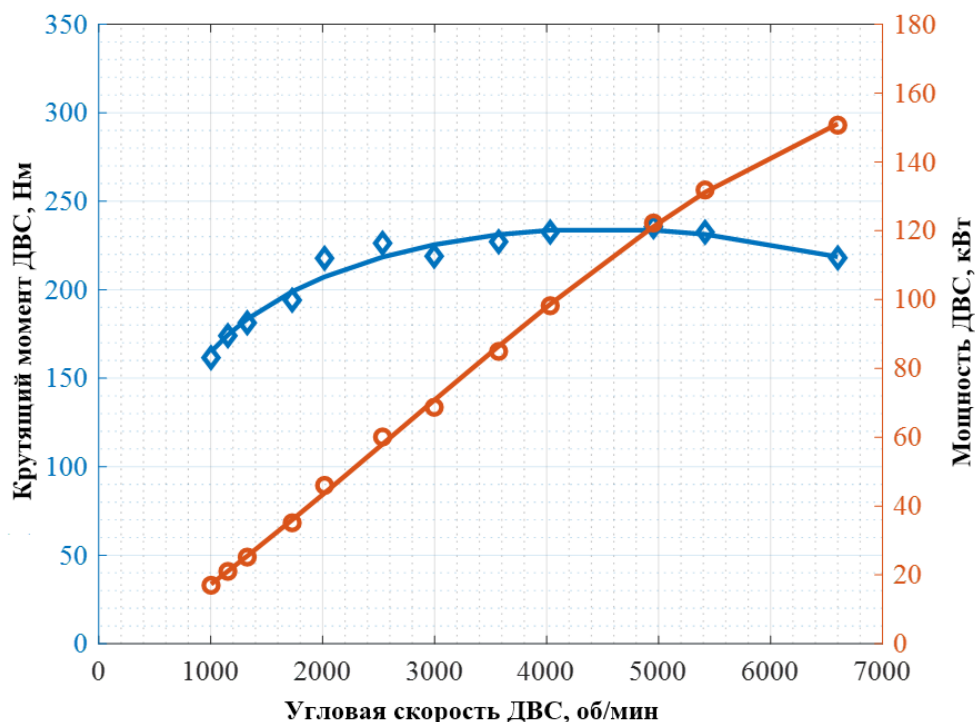


Рис. 2. Внешняя скоростная характеристика двигателя автомобиля Toyota Camry

Модель двигателя внутреннего сгорания и его расхода топлива. При равномерном движении ДВС автомобиля работает в статическом режиме и характеризуется точкой (T_{ice}, ω_{ice}) (рис.2). Мощность двигателя P_{ice} с учётом КПД трансмиссии равна сумме мощностей сопротивления движению. Известно, что часовой расход топлива двигателя \dot{m}_{ice} (г/ч или г/с) можно определить в зависимости от угловой скорости вала и степени использования

мощности двигателя:

$$\dot{m}_{ice} = g_e \cdot P_{ice} = g_{eN} \cdot K_u \cdot K_\omega \cdot T_{ice} \cdot \omega_{ice},$$

где K_u , K_ω – коэффициенты, соответственно, учитывающие изменения удельного расхода топлива в зависимости от степени использования мощности и угловой скорости двигателя; g_{eN} – удельный расход топлива двигателя при его максимальной мощности (г/кВт·ч).

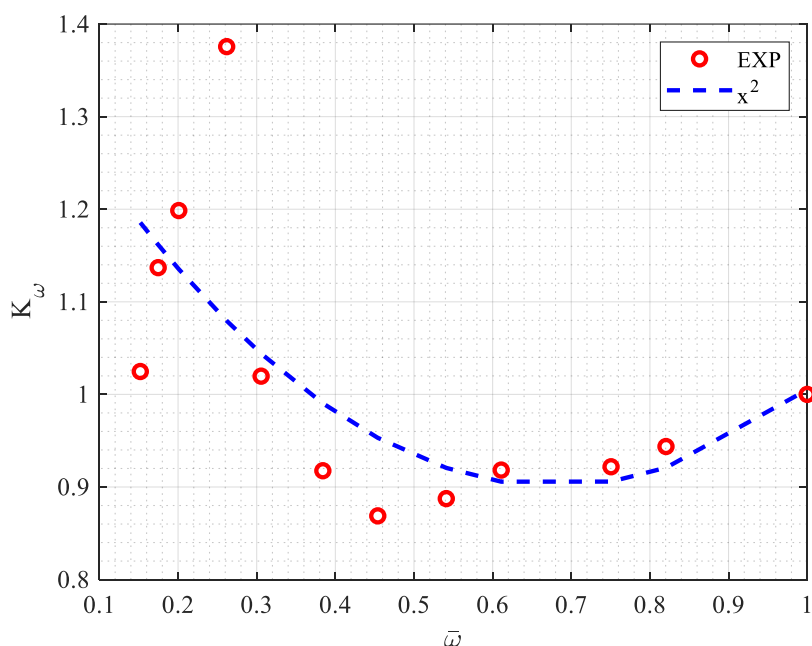


Рис. 3. Изменение коэффициента расхода топлива K_ω от относительной угловой скорости $\bar{\omega}$ двигателя автомобиля Toyota Camry

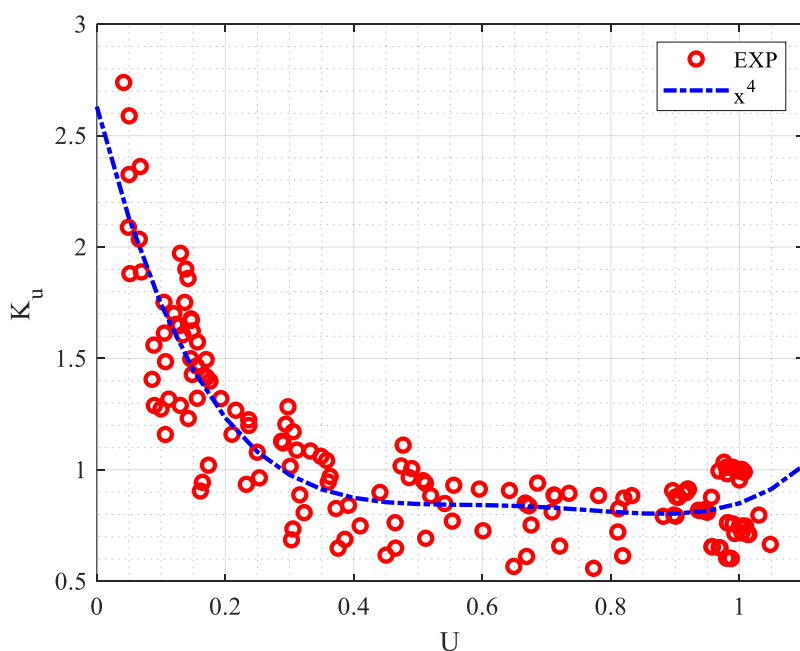


Рис.4. Изменение коэффициента расхода топлива K_u от степени использования мощности двигателя автомобиля Toyota Camry

После обработки результатов экспериментов зависимость K_ω от относительной угловой скорости двигателя $\bar{\omega}$ имеет вид, представленный на рис.3. Следовательно, можно применить аппроксимацию полиномом второй степени (штриховая линия на рис.3) для коэффициента K_ω , которая принимает следующий вид:

$$K_\omega = 1.02 \cdot \bar{\omega}^2 - 1.388 \cdot \bar{\omega} + 1.373.$$

Эмпирическое уравнение зависимости K_u от степени использования мощности U выражается полиномом четвёртой степени (рис.4). Уравнение полинома для K_u

$$K_u = 10.11 \cdot U^4 - 26.96 \cdot U^3 + 26.32 \cdot U^2 - 11.25 \cdot U + 2.63.$$

Модель электрической машины. В автомобилях с гибридным приводом ЭМ работает в тяговом (электродвигатель) и тормозном (генератор) режимах. В генераторном режиме ЭМ вырабатывает электрическую энергию и может заряжать батарею. Таким образом, модель электрической машины рассчитывает значение мощности (выходная величина), запрашиваемой от батареи при разряде или заряде в зависимости от требуемого крутящего момента и скорости вращения ротора ЭМ (входные величины).

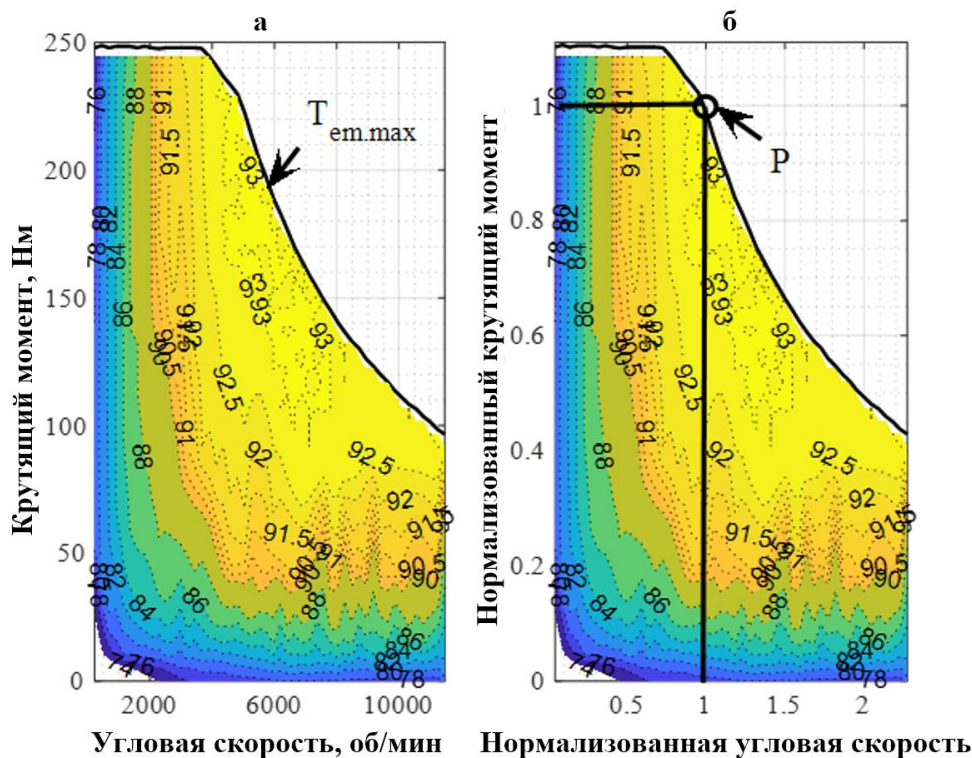


Рис. 5. Многопараметрическая характеристика электрической машины в тяговом режиме

Связь между входными и выходными величинами осуществляется через КПД электрической машины η_{mot} или η_{gen} , которая выражается как

функция двух переменных, т.е. крутящего момента и угловой скорости вращения вала электрической машины:

$$\begin{cases} \eta_{mot} = f(T_{em}, \omega_{em}), \\ \eta_{gen} = f(T_{gen}, \omega_{gen}). \end{cases}$$

На рис.5 приведена многопараметрическая характеристика электрической машины в режиме тяги, полученная экспериментальным путём. В режиме генератора характеристика отображается симметрично вниз, т.е. с отрицательными значениями крутящего момента. Изолинии являются линиями изменения КПД электрической машины. Точка P является точкой, при которой мощность ЭМ достигает максимального значения. Крутящий момент и угловая скорость вала ЭМ в этой точке работы обозначены как $T_{em, Pmax}$ и $\omega_{em, Pmax}$, соответственно. На рис.5,б приведена нормализованная многопараметрическая характеристика ЭМ. Угловая скорость нормализована ($\omega_{n,em}$) в отношении $\omega_{em, Pmax}$, а крутящий момент ($T_{n,em}$) – в отношении $T_{em, Pmax}$.

Необходимую электрическую мощность в режимах тяги P_{em} или генератора P_{gen} для получения механической мощности можно рассчитать с учётом КПД в соответствующем режиме работы:

$$\begin{cases} P_{em} = T_{em} \cdot \omega_{em} / \eta_{mot}, \\ P_{gen} = T_{gen} \cdot \omega_{gen} \cdot \eta_{gen}. \end{cases}$$

Изолинии КПД ЭМ можно описать полиномиальной функцией с двумя переменными ($\omega_{n,em}$, $T_{n,em}$):

$$\begin{aligned} \eta_{mot} = & p_{00} + p_{10} \cdot \omega_{n,em} + p_{01} \cdot T_{n,em} + p_{20} \cdot \omega_{n,em}^2 + p_{11} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em} + p_{02} \\ & \cdot T_{n,em}^2 + p_{30} \cdot \omega_{n,em}^3 + p_{21} \cdot \omega_{n,em}^2 \cdot T_{n,em} + p_{12} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^2 \\ & + p_{03} \cdot T_{n,em}^3 + p_{31} \cdot \omega_{n,em}^3 \cdot T_{n,em} + p_{22} \cdot \omega_{n,em}^2 \cdot T_{n,em}^2 + p_{13} \\ & \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^3 + p_{04} \cdot T_{n,em}^4 + p_{32} \cdot \omega_{n,em}^3 \cdot T_{n,em}^2 + p_{23} \cdot \omega_{n,em}^2 \\ & \cdot T_{n,em}^3 + p_{14} \cdot \omega_{n,em} \cdot T_{n,em}^4 + p_{05} \cdot T_{n,em}^5. \end{aligned}$$

Здесь коэффициенты аппроксимации p_{ij} имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} p_{00} &= 67.52; p_{10} = 20.91; p_{01} = 115.9; p_{20} = -13.45; p_{11} = -19.17; \\ p_{02} &= -418.3; p_{30} = 2.814; p_{21} = 35.69; p_{12} = 145.7; p_{03} = 690.7; \\ p_{31} &= -12.11; p_{22} = -165.5; p_{13} = -100.4; p_{04} = -551.2; \\ p_{32} &= 43.49; p_{23} = 60.73; p_{14} = 20.56; p_{05} = 169.1. \end{aligned}$$

Максимальный крутящий момент ЭМ также можно описать полиномом 6-й степени как функцию от нормализованной угловой скорости ротора ЭМ:

$$T_{em,max} = T_{em,Pmax} \cdot (0.0735 \cdot \omega_{n,em}^6 - 0.7729 \cdot \omega_{n,em}^5 + 2.8935 \cdot \omega_{n,em}^4 - 4.7297 \cdot \omega_{n,em}^3 + 3.1108 \cdot \omega_{n,em}^2 - 0.7504 \cdot \omega_{n,em} + 1.1281).$$

Максимальный крутящий момент электрической машины ограничивается кривой максимального крутящего момента $T_{em,max}$ (см. рис. 5).

Модель тяговой электрической батареи. В комплексной оценке тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобиля с гибридным приводом достаточно, чтобы модель тяговой электрической батареи включала в себя такие параметры, как реализуемая мощность, энергоёмкость, ограничения в процессе заряда и разряда, КПД цикла заряд/разряд. Следовательно, входным сигналом для модели батареи должна быть требуемая мощность на клеммах, а выходными сигналами – сила тока, напряжение и степень заряженности батареи.

Из теоремы Тевенина эквивалентную модель батареи можно выразить как ЭДС (E) и внутреннее сопротивление (при разряде R_{dchg} и заряде R_{chg}), которые являются функциями от степени заряженности SOC (сокращённо от английского слова State of Charge), т.е. $E = f(SOC)$, $R_{dchg} = f(SOC)$ и $R_{chg} = f(SOC)$. Определение этих величин позволяет вычислить выходное напряжение на клеммах батареи U_t .

Обозначив I_{bat} для режимов разряда и заряда как I_{dchg} и I_{chg} , соответственно, их значения можно вычислить по формулам:

$$I_{dchg} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot R_{dchg} \cdot (P_t)}}{2 \cdot R_{dchg}},$$

$$I_{chg} = \frac{\sqrt{E^2 + 4 \cdot R_{chg} \cdot P_t} - E}{2 \cdot R_{chg}}.$$

Динамику изменения степени заряженности в режиме разряда и заряда можно определить, следующим уравнением:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int_0^T I_{dchg} dt}{Q_{nom.Ah}} + \frac{\int_0^T I_{chg} dt}{Q_{nom.Ah}},$$

где SOC_0 – начальная степень заряженности; T – конечное значение времени заряда или разряда (с); $Q_{nom.Ah}$ – номинальное значение ёмкости батареи (А·с). В этом уравнении не рассматривается эффект Пойкерта, учитывающий изменения ёмкости батареи при различных значениях разрядных токов, так

как значение числа Пойкерта (показатель степени) близок к единице для рассматриваемых литий-ионных батарей.

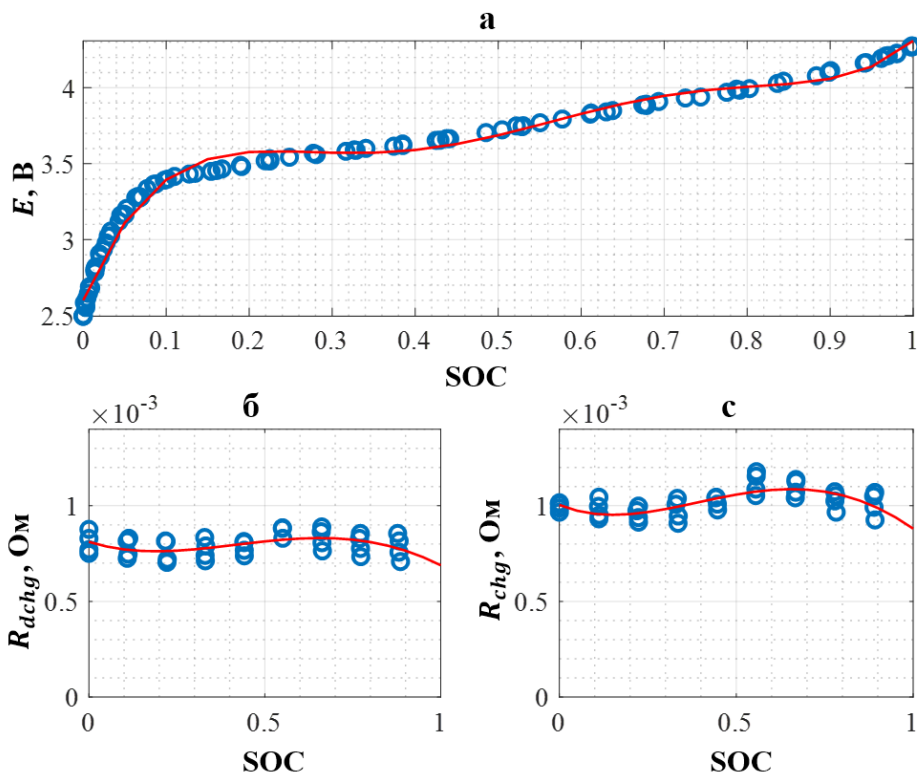


Рис. 6. Характеристики изменения ЭДС и внутренних сопротивлений в зависимости от степени заряженности для одного элемента литий-ионной полимерной батареи. Точки «о» представляют экспериментальные значения, красные линии – аппроксимирующие кривые

Известно, что значение ЭДС батареи зависит от степени заряженности, т.е. с увеличением степени заряженности значение ЭДС батареи также увеличивается. Рассмотрены характеры изменения ЭДС (см. рис.6,а) и внутренних сопротивлений (см. рис.6,б,с) в зависимости от степени заряженности для литий-ион полимерной батареи.

Точки «о» на рис.6 представляют значения исследуемых параметров, полученные экспериментальным путём на стендах Национальной лаборатории Айдахо (Idaho National Laboratory) по перспективным конструкциям автомобилей, а красные линии, аппроксимирующие кривые этих экспериментальных результатов, выражаются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 E(SOC) &= 50.621 \cdot SOC^5 - 139.61 \cdot SOC^4 + 141.66 \cdot SOC^3 \dots \\
 &\quad - 64.015 \cdot SOC^2 + 13.052 \cdot SOC + 2.6013; \\
 R_{chg}(SOC) &= 0.00032 \cdot SOC^4 - 0.00191 \cdot SOC^3 + 0.00205 \cdot SOC^2 \dots \\
 &\quad - 0.00058 \cdot SOC + 0.00081; \\
 R_{dchg}(SOC) &= 0.00076 \cdot SOC^4 - 0.00332 \cdot SOC^3 + 0.0032 \cdot SOC^2 \dots \\
 &\quad - 0.00075 \cdot SOC + 0.001.
 \end{aligned}$$

При регрессионных анализах основными критериями для выбора соответствующего уравнения были использованы коэффициент детерминации и сумма квадратов остатков регрессии.

Основной задачей режима управления является оптимальное распределение требуемого крутящего момента T_{req} между силовыми установками (т.е. между ДВС T_{ice} и ЭМ T_{em}).

При использовании режима управления по минимизации эквивалентного расхода топлива (МЭРТ) устанавливается стоимость электрической энергии, эквивалентная расходу топлива. Эквивалентная стоимость зависит от того, как в будущем электрическая энергия будет использована тяговым приводом. Безусловно, будущее поведение автомобиля неизвестно, следовательно, только средние значения КПД силовых установок могут быть использованы при расчёте эквивалентного расхода топлива. Таким образом, эквивалентный часовой расход топлива \dot{m}_{eqv} (г/с) можно представить как сумму действительного часового расхода топлива ДВС \dot{m}_{ice} и виртуального (мнимого) \dot{m}_{bat} из-за разрядки или зарядки батареи в момент времени t , представляемый следующим уравнением:

$$\dot{m}_{eqv}(t) = \dot{m}_{ice}(t) + \dot{m}_{bat}(t).$$

Часовой расход топлива ДВС рассчитывается как:

$$\dot{m}_{ice}(t) = \frac{P_{ice}(t)}{LHV \cdot \eta_{ice}(t)} = \frac{T_{ice}(t) \cdot \omega_{ice}(t)}{LHV \cdot \eta_{ice}(t)} = \frac{T_{ice}(t) \cdot \omega_{ice}(t) \cdot g_e(t)}{3600},$$

где LHV – удельная теплота сгорания топлива, МЖ/кг; η_{ice} – мгновенное значение КПД ДВС; g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч.

Очевидна нецелесообразность использования электрической энергии для тяги в случаях, когда степень заряженности батареи низкая. Наоборот, в случаях, когда степень заряженности батареи высокая, необходимо поощрять использование электрической энергии. Это можно осуществить путём включения в уравнение эквивалентного расхода топлива штрафной функции S_{SOC} , которая изменяет весомость виртуального расхода топлива:

$$\dot{m}_{eqv}(t) = S_{ice} \cdot \dot{m}_{ice}(P_{ice}(t)) + S_{soc} \cdot \dot{m}_{bat}(P_{bat}(t)).$$

Если значение штрафной функции больше единицы, использование электрической энергии от батареи имеет большую весомость. В обратном случае электрическая энергия становится дешевле, чем использование топлива. В научной литературе предлагается использовать следующее уравнение в качестве штрафной функции S_{SOC} :

$$S_{soc} = 1 - \left(\frac{SOC(t) - SOC_t}{(SOC_{max} - SOC_{min})/2} \right)^{k_s},$$

где $SOC(t)$, SOC_t , SOC_{max} и SOC_{min} – соответственно текущее, желаемое, максимальное и минимальное степени заряженности; k_s – степень.

Для минимизации эквивалентного расхода топлива необходимо установить ограничения соответствующей угловой скорости ω_{req} по крутящему моменту ДВС T_{ice} и электрической машины T_{em} , по их угловым скоростям, а также степени заряженности батареи SOC .

Последовательность нахождения минимального расхода топлива и расхода топлива за цикл обобщена на рис. 7.

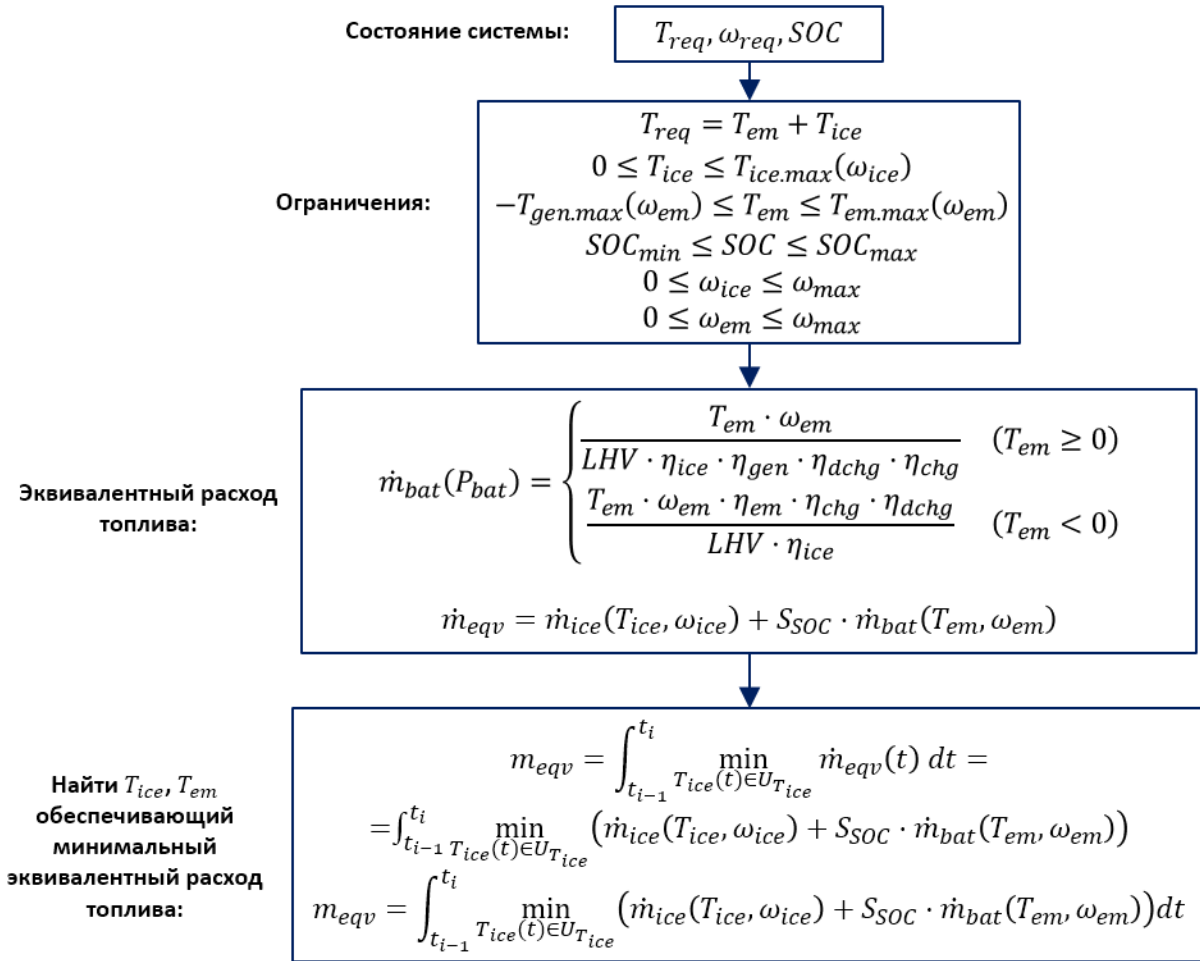


Рис. 7 Последовательность минимизации эквивалентного расхода топлива

Использование режимов управления, основанных на оптимизационных методах, позволяет исключить их влияние на выбор параметров гибридного привода автомобиля. Основными параметрами гибридного привода являются: максимальная мощность ДВС и ЭМ, а также ёмкость тяговой батареи.

В целях определения параметров гибридного автомобиля для достижения наименьшего расхода топлива в конкретных условиях движения необходимо провести анализ влияния этих параметров на расход топлива автомобиля. Варьированием этих параметров можно найти такую

комбинацию параметров, которая отвечает всем динамическим требованиям и при этом имеет наименьший расход топлива.

Последовательность выполнения выбора параметров гибридного привода автомобиля приведена на рис. 8.

Для определения снижения расхода топлива за счёт гибридизации тягового привода были использованы данные автомобиля Toyota Camry. Максимальная мощность ЭМ $P_{em,max}$ варьировалась с шагом 5кВт, а начальная степень заряженности – с шагом 10%, с неизменной максимальной мощности ДВС.

Расход топлива за цикл Q_{cycle} зависит от разницы ΔSOC в начале и в конце ездового цикла. Графики этой зависимости для конкретного цикла строятся из результатов расчётов для различных начальных значений степени заряженности SOC_0 (от 10 до 90% с шагом 10%) и различных мощностей ЭМ (от 0 до 60 кВт с шагом 5 кВт). Для каждой мощности находится точка баланса, при котором начальная степень заряженности $\Delta SOC = 0\% \pm \delta$ (где δ – допустимое отклонение в диапазоне 0.1%), т.е. $SOC_0 = SOC_{final} \pm \delta$.

За расход топлива за цикл принимается значение в точке баланса при различных мощностях ЭМ. Результаты расхода топлива можно представить в долевого значении относительно расхода топлива с нулевой мощностью ЭМ, т.е. относительно расхода топлива за соответствующий ездовой цикл для автомобиля с традиционным приводом.

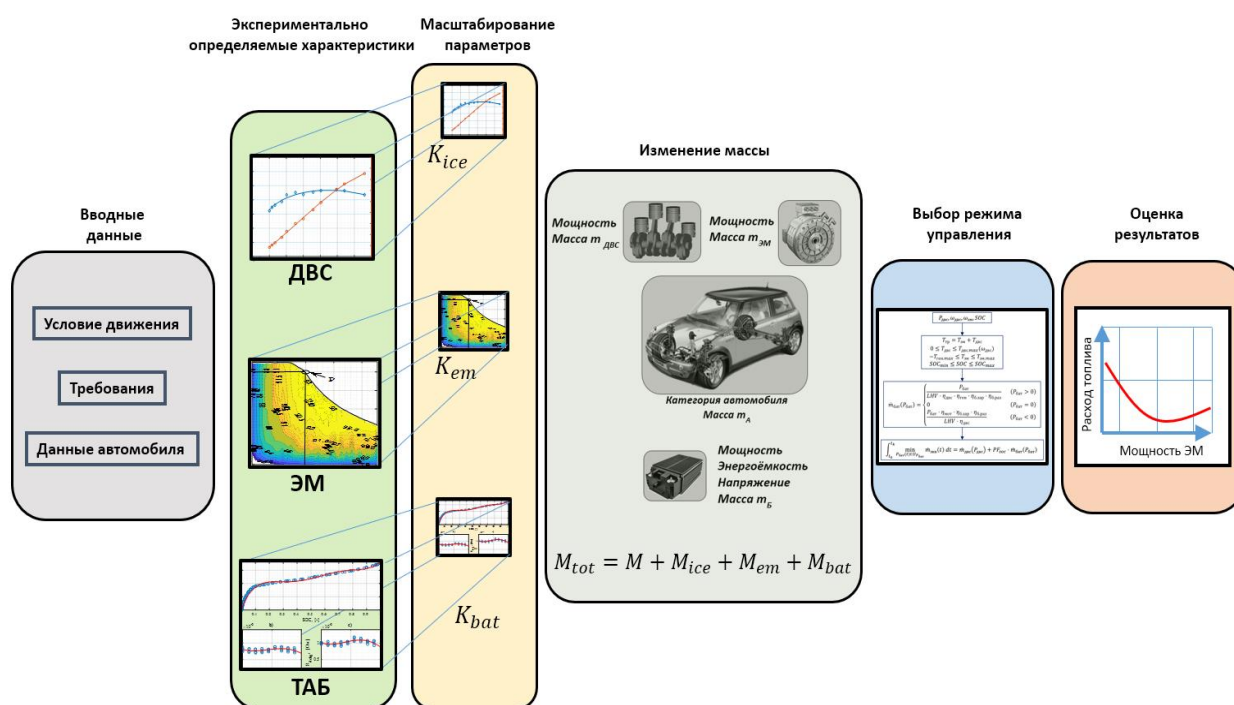


Рис. 8. Последовательность осуществления метода выбора параметров гибридного привода автомобиля

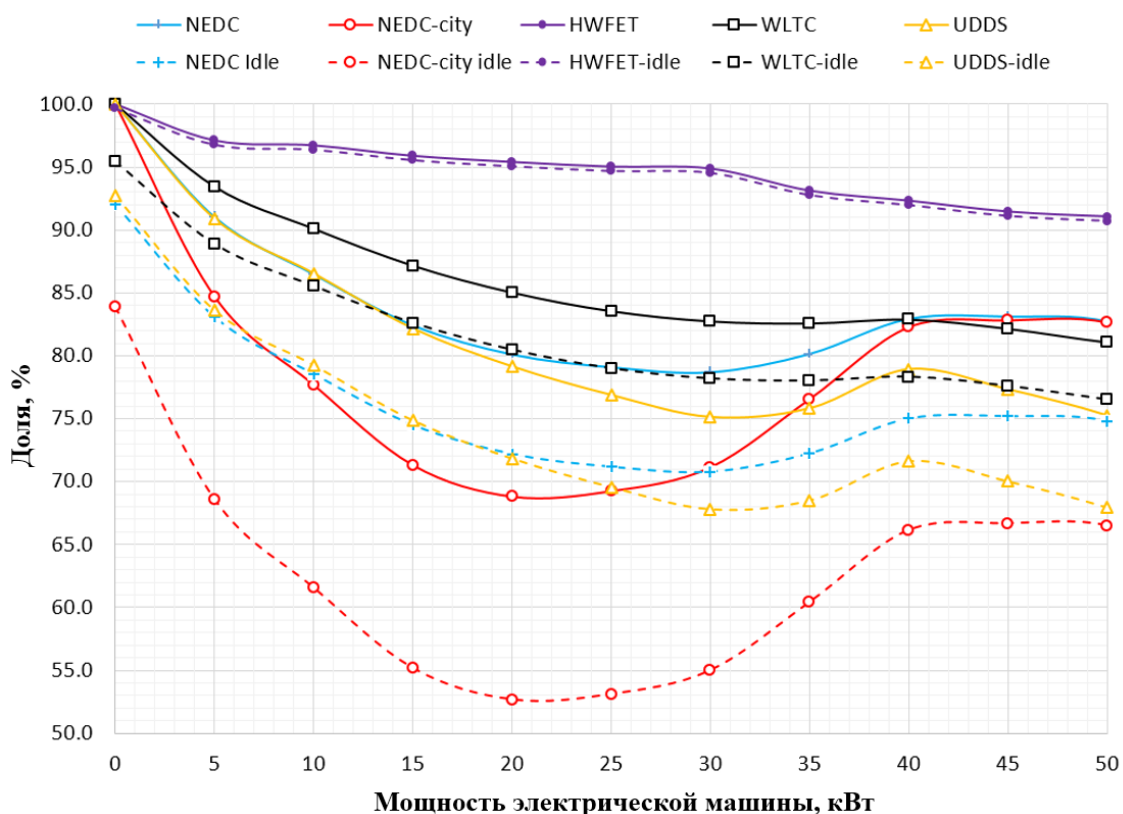


Рис. 9. Относительные расходы топлива при различных ездовых циклах с учётом (сплошные линии) и без учёта (штриховые линии) расхода топлива при работе на холостом ходу

В графическом виде уменьшение расхода топлива при различных степенях гибридизации показано на рис. 9. Расход топлива автомобиля с традиционным приводом принимается как 100%, а расходы топлива автомобилей с гибридным приводом с различными степенями гибридизации рассчитываются относительно этого значения. Сплошные линии представляют расход топлива с учётом при работе на холостом ходу, а штриховые линии и без его учёта (отличается подстрокой idle). Далее данный процесс повторяется для различных ездовых циклов.

Кроме того, из рис. 9 видно, что для городского цикла NEDC-city наибольшая экономия топлива достигается с ЭМ максимальной мощностью 20 кВт, а в смешенных циклах точка минимума смещается к 30 кВт. Полученные результаты обобщены в табл. 1.

В зависимости от ездового цикла и мощности ЭМ расход топлива снизился на 9-47% относительно расхода топлива автомобиля с традиционным приводом. Наибольшее значение улучшения приходится на городской цикл NEDC city при мощности ЭМ, равной 20 кВт.

Результаты расчётов показывают, что, чем больше доля тормозной энергии и её дальнейшей рекуперации, тем больше возможно уменьшение расхода топлива. С увеличением мощности ЭМ эффект от использования режима работы ДВС в экономичных зонах снижается. Это связано с уменьшением КПД при преобразовании энергии из одного вида в другой.

Эффект от рекуперации энергии торможения также увеличивается до 30 кВт, а затем снижается, так как дальнейшее увеличение мощности ЭМ и ёмкости батареи увеличивает массу, но при этом возможная энергия торможения не изменяется.

Таблица 1

Результаты расчёта расхода топлива при различных мощностях ЭМ и ездовых циклов

Ездовой цикл	Параметр			
	мощность ЭМ при котором достигается минимум, кВт	экономия без системы стоп/старт, %	экономия с системой стоп/старт, %	разница, %
NEDC	30	21.8	29.2	7.4
NEDC city	20	31.2	47.3	16.1
WLTC	35	17.4	22	4.6
UDDS	30	24.9	32.2	7.3
HWFET	50	8.9	9.3	0.4

Эффект от выключения ДВС в режиме холостого хода не зависит от мощности ЭМ и остаётся постоянной. Для цикла NEDC наибольшая экономия достигается за счёт рекуперации энергии торможения и в максимальном случае может достигать 20%. За счёт работы ДВС в экономичных зонах с помощью ЭМ достигается 4% экономии топлива, а от выключения ДВС в режиме холостого хода – 8%.

В третьей главе – «Экспериментальные исследования» – приведена оценка достоверности разработанных математических моделей и имитационной модели автомобиля, разработанной на базе пакета Matlab/Simulink с использованием результатов экспериментальных исследований, проведённых Национальной лабораторией по топливам и выбросам транспортных средств США – NVFEL (сокращённая от National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory – Национальная лаборатория транспортных средств и топливных выхлопов) на автомобиле Toyota Camry LE 2018 и Аргоннской национальной лабораторией (Argonne National Laboratory) на электрическом автомобиле Kia Soul 2015. Наряду с этим были использованы экспериментальные данные батареи, полученные разделом перспективных автомобилей в Национальной лаборатории Айдахо (Idaho National Laboratory).

В программу экспериментальных исследований включалось:

- проведение экспериментов на ДВС автомобиля Toyota Camry LE 2018 года выпуска на динамометрическом стенде;

- проведение экспериментов на автомобиле Toyota Camry LE 2018 года выпуска на динамометрическом стенде при движении на различных ездовых циклах;

- проведение экспериментов на электрическом автомобиле Kia Soul 2015 года выпуска на динамометрическом стенде при движении на различных ездовых циклах.

Результаты экспериментальных исследований сравниваются с результатом имитационного расчётного моделирования отдельно для автомобиля с ДВС и с электрической тягой. Данный подход обосновывается тем, что автомобиль с гибридным приводом может работать как в режиме тяги с ДВС, так и с электрической тягой во всех нагрузочных режимах. В гибридных тяговых режимах ДВС и ЭМ работают в частичных нагрузках. Так как изначально модель основывается на квазистатических уравнениях, можно предположить, что гибридный режим можно описать совокупностью отдельных режимов тяги.

Объектами экспериментальных исследований являются два автомобиля (Toyota Camry LE 2018 года выпуска с массой 1644 кг, с 4-цилиндровым рядным ДВС и рабочим объёмом 2.5 л и электромобиль Kia Soul 2015 года выпуска с массой 1664 кг), установленные на динамометрическом стенде барабанного типа, которые выполняют движение на различных ездовых циклах, таких как NEDC, WLTC, UDDS и др. Сбор данных осуществляется по CAN (Controller Area Network) шине с использованием дискретных датчиков и на информационно-измерительной системе в составе динамометрического стенда.

ДВС на динамометрическом стенде был подсоединён к нагрузке через автоматическую коробку передач, что позволяет имитировать реальную рабочую обстановку, особенно при низких оборотах, когда гидротрансформатор работает активно. Бензиновое топливо с октановым индексом 87 (соответствует АИ-92) использовалось при тестировании ДВС.

Образец графика сравнения результатов испытания и расчёта для ездового цикла WLTC приведён на рис. 10. Как установлено, скорость автомобиля (км/ч), которая является входным сигналом, как и в экспериментах (EXP), так и в расчётной модели (SIM), совпадают с высокой точностью. Это связано, с одной стороны с принципом работы используемого стенда для испытания, который идеально поддерживает заданную скорость, с другой – при расчётах использовался обратный подход моделирования.

Во избежание разницы в моменте переключения передач в качестве входного сигнала включённой передачи в расчётах использовались экспериментальные данные. При холостом ходе была подключена первая передача. Соответственно, в графиках отсутствуют линии расчётных включённых передач.

Результаты часового расхода топлива эксперимента и расчёта, измеряемые в г/с, совпадают с высокой точностью в установившихся и магистральных режимах, но в транзитные пиковые значения в переходных

режимах отсутствуют. В режиме холостого хода часовой расход топлива был принят равным 0.18 г/с.

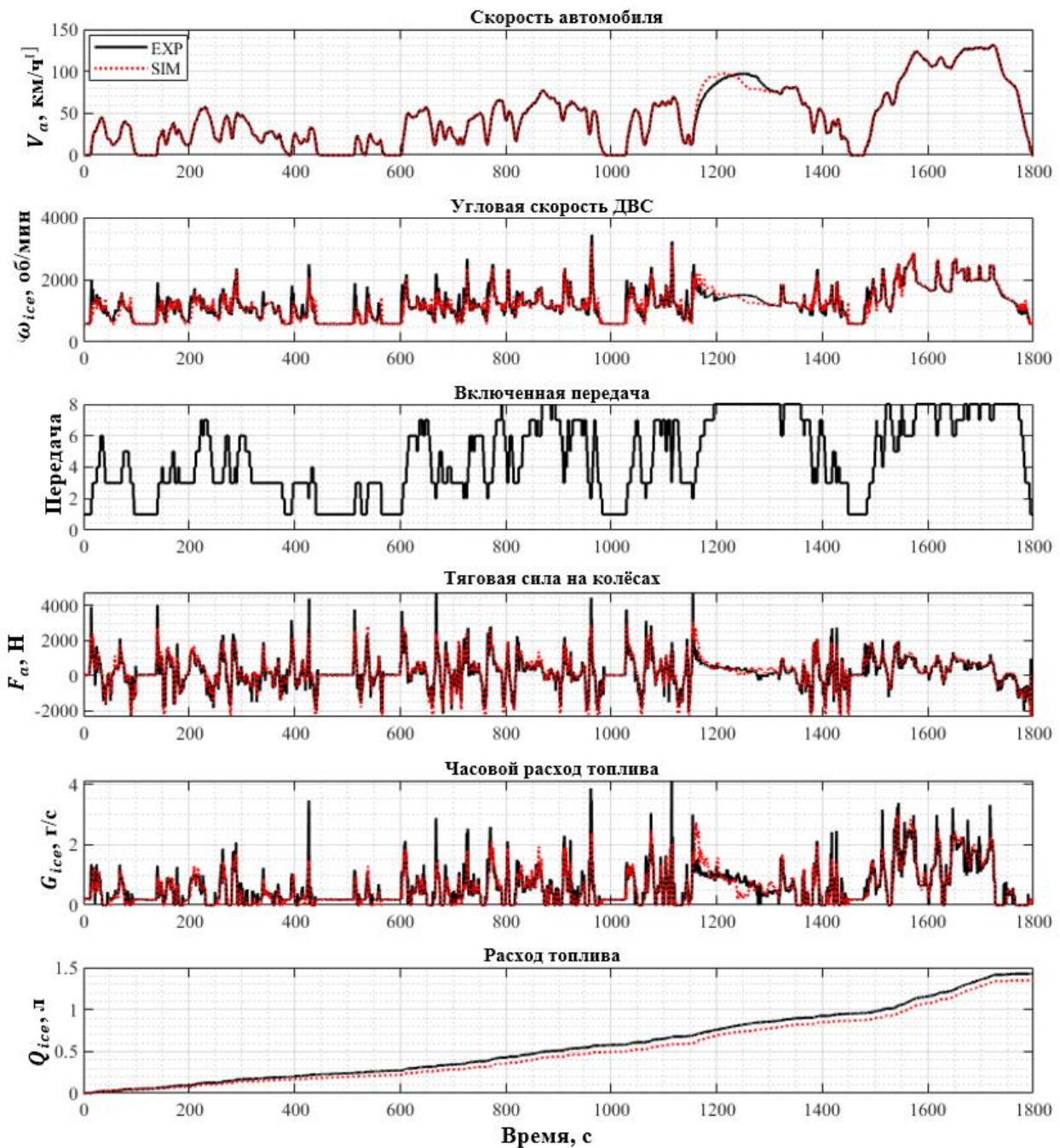


Рис. 10 Графики сравнения результатов испытания и расчёта для цикла WLTC: скорость автомобиля (км/ч), угловая скорость коленчатого вала ДВС (об/мин), включённая передача, тяговая сила на колёсах, часовой расход топлива (г/с) и расход топлива за цикл (л)

Результаты сравнения пройденного пути, расхода топлива и путевого расхода топлива для экспериментальных и расчётных исследований на автомобиле Toyota Camry приведены в табл. 2. Значения результатов этих величин показывает, что разница для пройденного пути не превышает 3.1%, разница путевого расхода топлива находится в пределах 7%, а расход топлива за цикл – 7.3%. Разница между экспериментальным и расчётными

результатами увеличивается в зависимости от доли и интенсивности переходных режимов. Так, в городском цикле UDDS, в котором преобладают резкие переходные режимы, разница максимальна.

Таблица 2

Сравнение результатов пройденного пути и расхода топлива для экспериментальных и расчётных исследований автомобиля Toyota Camry

Ездовой цикл	Параметр								
	Путь, км			Путевой расход топлива, л/100 км			Расход топлива, л		
	EXP	SIM	%	EXP	SIM	%	EXP	SIM	%
NEDC	11.04	10.93	-1	6.201	6.044	-2.5	0.685	0.661	-3.5
WLTC	23.27	23.26	0.005	6.132	5.798	-5.5	1.427	1.349	-5.5
UDDS	12.04	11.99	-0.04	6.598	6.139	-7	0.794	0.736	-7.3
HWFET	16.47	16.51	+3.1	4.36	4.487	+2.9	0.718	0.741	+2

При испытании электрического автомобиля Kia Soul 2015 записывались изменения во времени основных измеряемых величин, таких как скорость вращения барабана (имитирует скорость автомобиля), силы сопротивления движению, сила тока батареи, напряжение батареи, степень заряженности батареи. Данные записывались с помощью CAN шины. Использовались бесконтактные клещи измерения силы тока.

Испытания проводились с включённым кондиционером воздуха салона при различных внешних температурах окружающей среды и на различных ездовых циклах. Следовательно, мощность дополнительных оборудования варьировалась.

Расход энергии электромобиля оценивается по процедуре SAE J1634 ("Electric Vehicle Energy Consumption and Range Test Procedure"), действующей с мая 1993 г. (обновлена в октябре 2012 г. и предложена Агентством по охране окружающей среды США (EPA - Environmental Protection Agency) и Международным Обществом автомобильных инженеров (SAE - Society of Automotive Engineers). Согласно этой процедуре, испытания электрического автомобиля, расходы электрической энергии измеряются в различных ездовых циклах.

Результаты, использованные в данной диссертации, были получены в следующей последовательности:

- Электрический автомобиль устанавливается на динамометрическом стенде с полностью заряженной (95%) батареей, включается кондиционер салона.
- Фаза 1 – расход энергии измеряется в комбинации ездовых циклов

UDDS+HWFET+остановка+UDDS+US06.

- Фаза 2 – затем автомобиль движется с постоянной скоростью 65 миль/ч (104 км/ч) + остановка + осуществляется магистральный ездовой цикл US06.

- Фаза 3 – осуществляется комбинированный цикл UDDS+HWFET+остановка+UDDS.

- Фаза 4 – затем автомобиль движется с постоянной скоростью 65 миль/ч (104 км/ч) до полного разряда батареи.

После этого автомобиль заряжается снова и испытание продолжается с выключенным кондиционером, т.е. дополнительный расход энергии уменьшается. Повторяется вышеприведённая последовательность циклов.

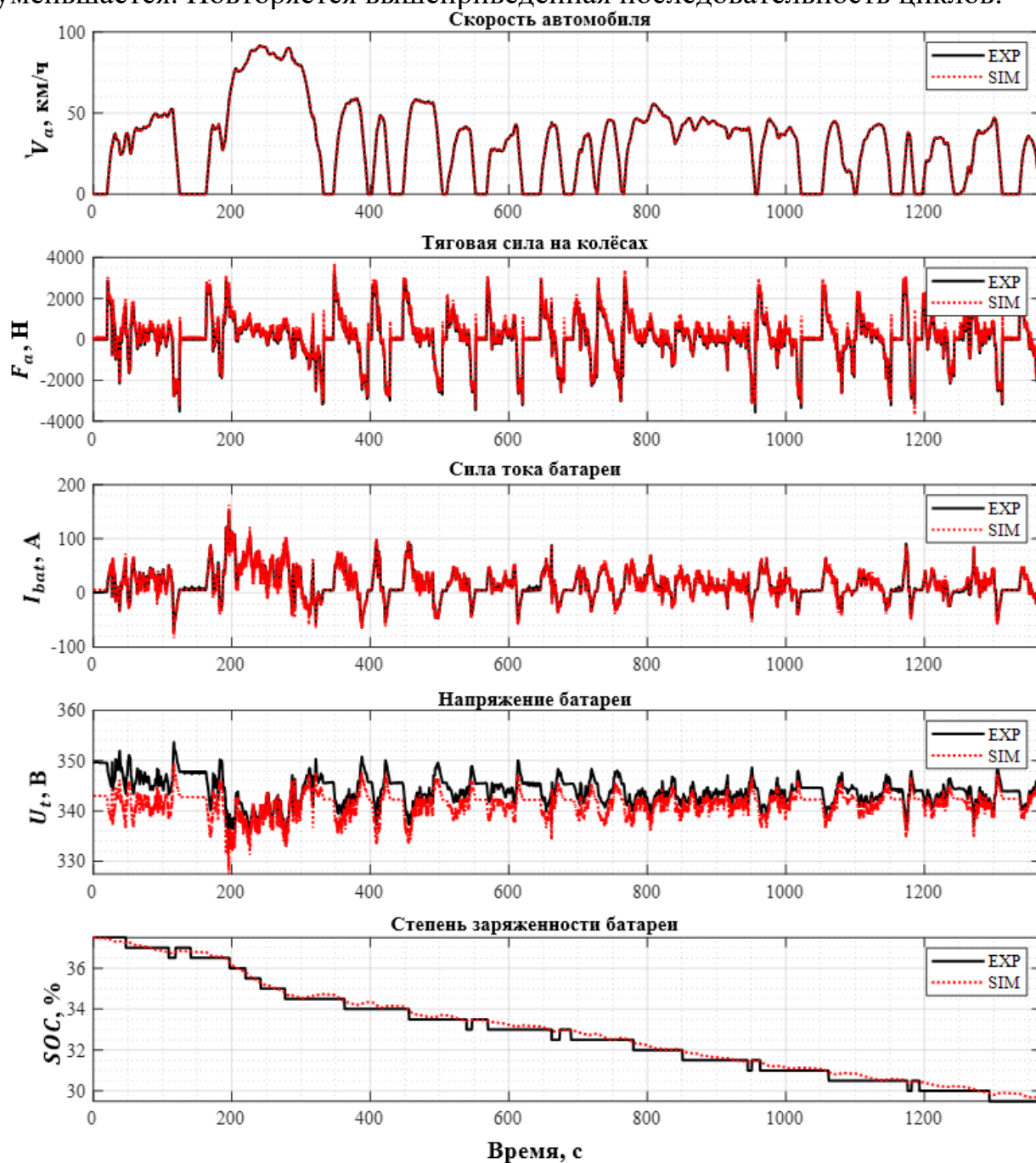


Рис. 11. Результаты испытаний электрического автомобиля на динамометрическом стенде, где конечная часть фазы 3 соответствует городскому циклу UDDS

На рис.11 приведено сопоставление результатов испытаний электрического автомобиля на динамометрическом стенде и расчётных исследований для конечной части фазы 3, соответствующей городскому циклу UDDS.

Результаты сравнения пройденного пути и расхода энергии (разница между начальной и конечной степенями заряженности SOC_0 и SOC соответственно) для экспериментальных и расчётных исследований на электрическом автомобиле Kia Soul приведены в табл. 3. Расход электрической энергии электрического автомобиля оценивается по процедуре EPA, которая включает в себя испытания в городском UDDS и магистральном HWFET циклах при различных дополнительных нагрузках.

Таблица 3

Сравнение результатов пройденного пути и расхода энергии для экспериментальных и расчётных исследований электрического автомобиля Kia Soul

Ездовой цикл	Параметр							
	Путь, км			Доп. нагрузка	SOC, %			
	EXP	SIM	%		Вт	SOC_0	EXP	SIM
HWFET	16.51	16.51	0	5000	83.5	72	71.9	-0.1
UDDS	12.04	11.99	-0.04	5000	95	83.5	84.25	+1
UDDS	12.04	11.99	-0.04	2000	37.5	29.5	29.71	+0.8

В четвертой главе – «Разработка рекомендаций и расчёт экономического эффекта от гибридизации привода» рассматриваются способы выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, и методика расчёта экономического эффекта от гибридизации привода автомобиля.

Как показал анализ существующих автомобилей с гибридным приводом, максимальная мощность ДВС превышает минимально необходимую мощность для разгона автомобиля. Это обуславливается тем, что ДВС должен обеспечивать движение автомобиля в таких ситуациях и режимах, как разгон с разряженной батареей и заряд батареи во время движения.

Следовательно, при гибридизации автомобиля с традиционным приводом целесообразно оставить максимальную мощность ДВС неизменной. Низкий предел удельной мощности ДВС при этом приблизительно должна быть 48 кВт/т.

Для автомобиля с гибридным приводом без внешней подзарядки ёмкость электрической батареи рассчитывается по условию обеспечения

максимальной мощности электрической машины. В этом случае большую роль играет тип используемой батареи. В автомобилях с гибридным приводом без внешней подзарядки выбираются батареи с высоким показателем удельной мощности (кВт/кг). В современных типах батарей темп разряда C_{rate} достигает 40.

Таблица 4

Таблица результатов снижения расхода топлива автомобиля при различных мощностях ЭМ и ездовых циклов

Мощность	Ездовой цикл				
	NEDC	NEDCcity	HWFET	UDDS	WLTC
0	7.93	16.13	0.34	7.31	4.57
5	16.91	31.43	3.23	16.41	11.12
10	21.45	38.44	3.62	20.76	14.47
15	25.50	44.83	4.45	25.15	17.40
20	27.82	47.32	4.94	28.16	19.54
25	28.83	46.89	5.32	30.43	21.01
30	29.23	45.00	5.47	32.18	21.82
35	27.77	39.57	7.24	31.49	21.99
40	24.99	33.85	8.03	28.38	21.68
45	24.81	33.32	8.90	29.98	22.42
50	25.20	33.49	9.29	32.06	23.50

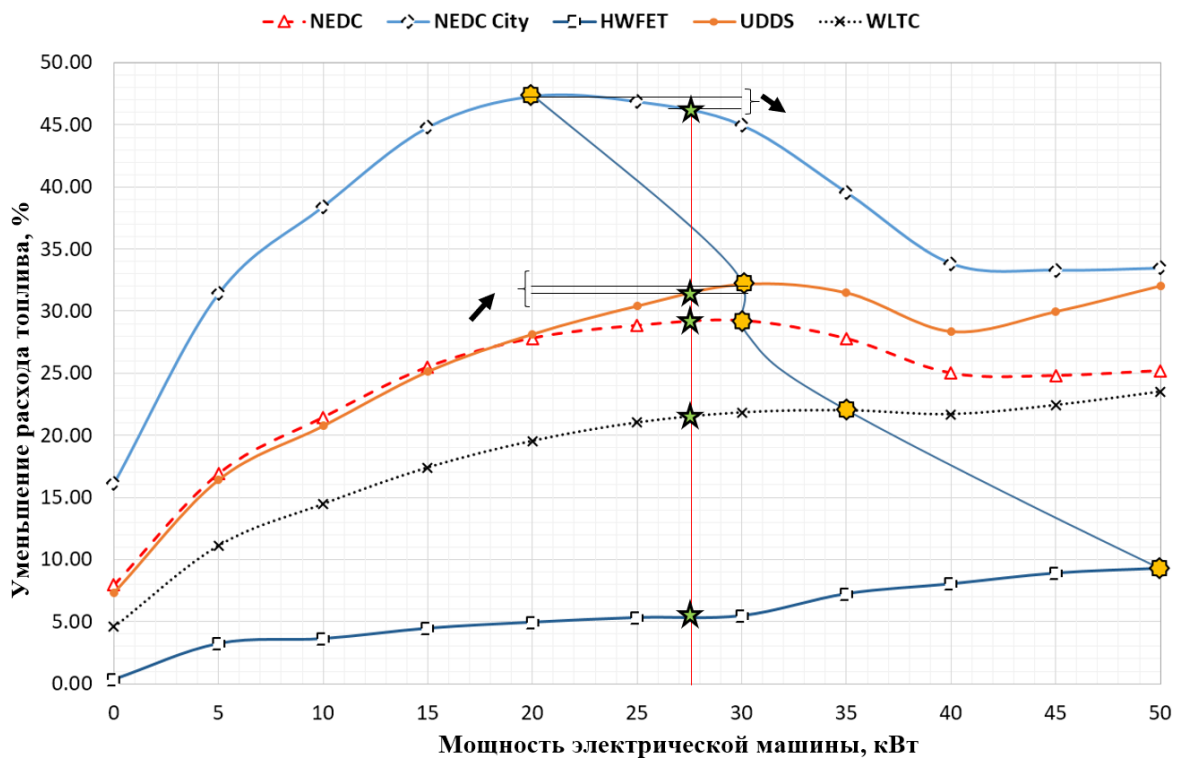


Рис. 12. Уменьшение расхода топлива при различных мощностях ЭМ и ездовых циклах

Выбор максимальной мощности электрической машины при постоянной мощности ДВС является основной задачей для минимизации расхода топлива. В табл. 4 приведены результаты расхода топлива автомобиля с традиционным и гибридным приводами с различной мощностью ЭМ при различных ездовых циклах. Результаты показывают, что при 20 кВт мощности максимальное улучшение топливной экономичности достигается по городскому циклу NEDC city. В других циклах минимум достигается при иных значениях мощности ЭМ. Следовательно, при использовании ЭМ с мощностью в 20 кВт улучшение топливной экономичности несколько снижается в других циклах. Так, по циклу NEDC она уменьшается на 1.38% относительно минимума (который достигается при мощности ЭМ 30 кВт).

Несмотря на то, что расчёты и испытания, как правило проводятся на нормированных ездовых циклах, реальные условия движения автомобиля неизвестны. Следовательно, для различных условий движения и конкретной мощности ЭМ сумма возможных снижений расхода топлива позволяет определить параметры ЭМ. В табл. 4 это значение находится в пределах 25 – 30 кВт. Графическое изображение данного принципа показано на рис. 12, где кривые соответствуют различным ездовым циклам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенного по теме диссертации «Научные основы выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля» исследования сформулированы следующие общие выводы:

1. Анализ работы существующих автомобилей с гибридным приводом показывает, что параллельный гибридный привод P2 конфигурации является наиболее перспективным с учётом простоты конструкции, возможности изменения параметров тягового привода, внедрения в существующую конструкцию привода. Кроме того, эта конфигурация позволяет варьировать степень гибридизации при минимальных конструктивных изменениях.

2. На основе уравнений теории автомобиля и электротехники составлена математическая модель компонентов тягового привода и расчётная (имитационная) модель на Matlab/Simulink, которая позволяет рассчитать расход топлива и электрической энергии при движении автомобиля на нормированных ездовых циклах.

3. Разработан метод выбора режимов управления гибридным приводом автомобиля, обеспечивающий наименьший расход топлива, основанный на минимизации многопараметрической целевой функции эквивалентного расхода топлива включающий в себя расход топлива двигателя внутреннего сгорания и электрической энергии батареи;

4. Разработан метод выбора параметров гибридного привода автомобиля по улучшению топливно-экономических свойств. Результаты расчёта на основе разработанного метода показывают, что в зависимости от ездового цикла и мощности ЭМ расход топлива можно уменьшить на 9–47%

относительно расхода топлива автомобиля с традиционным приводом;

5. Наибольшее значение улучшения приходится на городской цикл NEDC city при мощности ЭМ, равной 20 кВт. Чем больше доля тормозной энергии и её дальнейшей рекуперации, тем больше возможность снизить расхода топлива.

6. Разработана методика экспериментальной оценки достоверности расчётных исследований. Достоверность результатов расчётных исследований была оценена экспериментальными данными, полученными на динамометрическом стенде. Результаты экспериментальной оценки автомобиля Toyota Camry LE показали следующее: при тяге с ДВС расход топлива за цикл расчётных исследований меньше на 7.3%, чем при испытаниях за счёт переходных режимов. Разница между экспериментальными и расчётными данными увеличивается в зависимости от доли и интенсивности переходных режимов. Для автомобиля Kia Soul результаты показали, что электрическая тяга менее подвержена переходным процессам, чем тяга с ДВС, что приводит к разнице расхода электрической энергии между экспериментальными и расчётными результатами менее 1% для двух значений дополнительной нагрузки.

7. Разработан способ выбора параметров и режимов управления гибридного привода автомобиля, который позволяет определить рациональное значение мощности электрической машины для реальных условий движения.

8. Экономический эффект от гибридизации привода на примере одного автомобиля Toyota Camry, позволяет снизить выхлопы CO₂ на 32 – 37 г/км, что равно 2185 – 3600 евро за счёт избежания возможных штрафов.

9. При пробеге автомобиля в 20 тыс.км в год в среднем можно сэкономить 700 л бензина за год.

10. Определены основные факторы, ограничивающие дальнейшее улучшение топливно-экономических показателей, что в большей степени объясняется отсутствием априори-информации об условиях движения.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc.18/30.12.2019.T.09.01 AT TASHKENT STATE TRANSPORT
UNIVERSITY**

TURIN POLYTECHNIC UNIVERSITY IN TASHKENT

RUZIMOV SANJARBEK KOMILOVICH

**SCIENTIFIC METHODOLOGIES FOR SELECTION OF VEHICLE
HYBRID POWERTRAIN SIZING AND ITS CONTROL STRATEGY**

05.08.06 – Wheeled and tracked vehicles and their operation

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
IN TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent– 2022

The theme of doctor of science (DSc) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2021.4.DSc/T483.

The dissertation has been prepared at the Turin Polytechnic University in Tashkent. The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website tstu.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific advisor:

Mukhitdinov Akmal Anvarovich
doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Bazarov Bakhtiyar Imamovich
doctor of technical sciences, professor

Abdazimov Anvar Daniyrovich
doctor of technical sciences, professor

Fayziboyev Sherzod Sobirovich
doctor of technical sciences, professor

Leading organization:

Ferghana Polytechnic Institute

The defense of the dissertation will take place on "10" 09 2022 at 10⁰⁰ at the Scientific Council DSc.18/30.12.2019.T.09.01 at the Tashkent State Transport University. (Address: 100167, str. Temiryo'Ichilar 1, Phone: (99871) 299-00-01, fax: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashiit@exat.uz)

The dissertation is registered in Information-Resource of the Tashkent State Transport University (is registered under № 065). (Address: 100167, str. Temiryo'Ichilar 1, Phone: (99871) 299-00-01, fax: 71-293-57-54, e-mail: rektorat@tstu.uz, tashiit@exat.uz)

Abstract of the dissertation sent out on "20" 08 2022 y.
(mailing report No. 15 on "18" 06 2022 y.).



A.A. Riskulov
Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

R.M. Khudaykulov
Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of philosophy, professor

Sh.P. Alimukhamedov
Chairman of the academic seminar under
the scientific council awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF SCIENCE (DSc) ON TECHNICAL SCIENCES

A brief content of dissertation abstract of doctor of science (DSc)

INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)

The aim of the research is to develop a scientific methodology of sizing a vehicle hybrid powertrain and selection of its control strategy that allows to achieve the best fuel efficiency at different driving conditions satisfying the dynamic requirements.

The tasks of the research work, which allow reaching the main research goal, are as follows:

- choosing the most promising hybrid powertrain configuration in terms of practical application on vehicles based on the critical trade-off analysis;

- development of a mathematical model of motion of the vehicle with hybrid powertrain on different driving cycles that allows to calculate a fuel and an electric energy consumption;

- development of a hybrid powertrain simulation model representing vehicle motion on homologation cycles using Matlab/Simulink;

- development of a method for selecting a control strategy of the hybrid powertrain to achieve minimization of the fuel consumption by optimally splitting the required driving torque between power sources;

- development of a method of sizing the hybrid powertrain to minimize the fuel consumption;

- experimental validation of the simulation results of fuel and electric energy consumption;

- determining the main factors limiting a further improvement of fuel efficiency of the vehicle with hybrid powertrain;

- developing recommendations on hybrid powertrain sizing and its control strategy selection to achieve the best fuel efficiency.

The object of the work is a passenger car with a parallel P2 hybrid powertrain configuration.

The scientific novelty of the research is composed of following developments:

- a method is developed for computation of fuel and electric energy consumptions during the motion of the vehicle with hybrid powertrain on different homologation cycles was improved by means of developed mathematical models and algorithms;

- a method is developed for selecting the control strategy of the vehicle with hybrid powertrain to achieve the best fuel efficiency by minimizing equivalent fuel consumption;

- a method developed for sizing the vehicle hybrid powertrain components based on their power outputs to achieve the best fuel efficiency;

- the developed methods for selection of the control strategy and the powertrain

component sizing is improved by using the simulation model of vehicle motion on a homologation cycle;

the method for an experimental validation is justified by comparing the computational results of fuel and electric energy consumptions of the hybrid powertrain with the results of dynamometric testbench;

the approach is developed for defining main factors limiting a further improvement of fuel efficiency of the vehicle with hybrid powertrain which is based on computation of excessive energy not used during the drive cycle.

Implementation of the research results. Based on the results obtained on the development of a scientific basis for the selection of parameters and control strategy for a hybrid powertrain:

in the research and development center "Research and Development Center" MCHJ at JSC "Uzavtosanoat" JSC, a method and a simulation program for calculating the energy consumption on various homologation driving cycles, as well as a method for selecting parameters and control strategies for a hybrid powertrain of a vehicle to improve economy was implemented (Act of implementation of "Research and Development Center" MCHJ No. 054-2021 dated November 19, 2021 and Certificate of Uzavtosanoat JSC No. 19/04-25-2129 dated November 22, 2021). The result of scientific research allows to select vehicle powertrain parameters and its control strategies while designing or choosing newly produced passenger vehicle models, which makes it possible to evaluate energy efficiency and determine fuel consumption in specific driving conditions before the realizing the prototype of the vehicle;

at the SPC "Uzavtotranstekhnika" under the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan, a program for calculating the equivalent fuel consumption of a vehicle with hybrid powertrain on various homologation driving cycles has been adopted for use (Certificate of the SPC "Uzavtotranstekhnika" dated November 19, 2021). The implementation of the obtained results will ensure a reduction in workforce costs 7 times, and a reduction of testing costs by 5 times;

the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan adopted for use the developed methods and simulation programs for calculating the energy consumption of a vehicle with a hybrid powertrain (Certificate of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan No. 2/7365 dated November 23, 2021). The introduction of these methods will allow the selection of vehicle models with the lowest energy consumption in given conditions.

Main conclusions of the research.

1. The qualitative trade-off analysis of different vehicle hybrid powertrain configurations is performed to establish the perspective one for practical application in the vehicles. P2 parallel configuration has been chosen for its relative simplicity in integration on the existing configuration, scalability and increased number of operation modes;

2. Based on the equation of vehicle dynamics and circuits theory, the mathematical models of the main powertrain components are derived. The simulation model on Matlab/Simulink environment is developed based on the established mathematical models. The simulation model allows to compute the fuel

and energy consumption of the vehicle with hybrid powertrain on different homologation driving cycles;

3. The method of selection of control strategy of the hybrid powertrain to minimize the fuel consumption is developed. It is based on the minimization of multivariable cost function of equivalent fuel consumption composed of real fuel consumption and virtual consumption converted from an electric energy consumption;

4. The developed method of selection of the hybrid powertrain component sizes allows to reduce the fuel consumption by 9 - 47% depending on the driving conditions. It allows to select the values of power of the electric machine, the capacity of the battery while keeping the internal combustion engine power unchanged;

5. The best improvement of the fuel efficiency improvement due to powertrain hybridization is obtain for city part of the NEDC homologation cycle and at 20 kW electric machine power;

6. The method for experimental validation of the simulation results using the experimental data from world leading laboratories in the field. The comparison of the simulation and experimental results show that the fuel consumption of the Toyota Camry LE is less by up to 7,3% for the former due to quasi-static nature of the model used in the simulation as the transient phases are not considered. The more aggressive is the cycle the more is this difference. The results for the battery electric vehicle Kia Soul with different level of accessory loads show that the simulation and experimental results deviate by 1% as the electric drive suffers less from transient loads compared to its thermal counterpart;

7. An approach for selecting the hybrid powertrain components size and its control strategies is proposed. It allows to determine the rational value of the power of an electric machine for real driving conditions partially combining the results for different homologation driving cycles;

8. Economical advantage from hybridization of the Toyota Camry powertrain can be calculated from the fact that the emissions of CO₂ reduce by 32 - 37 g/km, that is equal to 2185-3600 euros of penalties reduction for each produced vehicle;

9. Considering the driving range of 20 thousand km per year, in average, 700 liters of gasoline can be saved;

10. The main factors limiting the further improvement of the fuel efficiency of the vehicle with hybrid powertrain are defined which are mainly linked with the absence of apriori knowledge of the driving conditions.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLICATIONS

I бўлим (I часть; I part)

1. Мухитдинов А.А., Рузимов С.К. Об эффективности применения рекуперативного торможения на автомобиле// Транспорт. – М. 2005. – № 2. – С.35 – 37. (05.00.00; №82).
2. Мухитдинов А.А., Рузимов С.К. Выбор коэффициентов ПИ-регулятора в системе управления «водитель – автомобиль – окружающая среда»// Механика муаммолари. – 2008. – №4-5. – С. 38-41. (05.00.00; №6).
3. Мухитдинов А.А., Рузимов С.К. Имитационное моделирование компонентов силовой установки гибридного автомобиля// Механика муаммолари. – 2017, – №4, – С. 56-60. (05.00.00; №6).
4. Мухитдинов А.А., Рузимов С.К. Виртуальный стенд для испытания тягово-скоростных свойств автомобиля// АСТА ТТРУ 3/2018. (05.00.00; №25).
5. Amati N., Tonoli A., Castellazzi L., Ruzimov S. Design of Electromechanical Height Adjustable Suspension // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering. 2018. Vol.232, Issue 9 - Pp. 1253–1269. (05.00.00; №3. Scopus. IF=1.828).
6. Castellazzi L., Ruzimov S., Bonfitto A., Tonoli A., Amati N. A method for battery sizing in parallel P4 mild hybrid electric vehicles // SAE International Journal of Electrified Vehicles, 2021. Vol.11, Issue 1. – Pp. 97-111. (05.00.00; №3. Scopus).
7. Mavlonov J., Ruzimov S., Mukhitdinov A. Critical review of the performance of the battery electric vehicle available on the market//АСТА of Turin Polytechnic University in Tashkent, 2021. 6, 21 – 24 б. (05.00.00; №25).
8. Ruzimov S., Mavlonov J., Mukhitdinov A. Analysis of the powertrain component size of electrified vehicles commercially available on the market // COMMUNICATIONS – Scientific Letters of the University of Zilina, 2022. Vol.24, Issue 1 – Pp. B74-B86 (05.00.00; №3. IF=1.6).
9. Ezemobi E., Yakhshilikova G., Ruzimov S., Castellanos L.M., Tonoli A. Adaptive Model Predictive Control Including Battery Thermal Limitations for Fuel Consumption Reduction in P2 Hybrid Electric Vehicles // World Electric Vehicle Journal. MDPI AG, 2022. Vol. 13., Issue 2. – p.33 (05.00.00; №3. IF=2.9).
10. Khan I., Ruzimov S., Amati N., Tonoli A. Study of the Impact of E-Machine in Hybrid Dual Clutch Transmission Powertrain // Energies. MDPI AG, 2022. – Vol. 15, Issue 3 – p. 945 (05.00.00; №3. IF=3.25).
11. Yakhshilikova G., Ruzimov S., Ezemobi E., Tonoli A., Amati N. Development of Optimization Based Control Strategy for P2 Hybrid Electric

- Vehicle including Transient Characteristics of Engine // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, Issue 6 – p. 2852. (05.00.00; №3. IF=2.84).
12. Yakhshilikova G., Ezemobi E., Ruzimov S., Tonoli A. Battery Sizing for Mild P2 HEVs Considering the Battery Pack Thermal Limitations// Applied Sciences. Vol.12, 2022 no. 1: P226. (05.00.00; №3. IF=2.84).

II бўлим (II часть; II part)

1. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К. Влияние интенсивности торможения автомобиля с гибридным приводом на эффективность рекуперации энергии // Механика муаммолари ва иншоотлар сейсmodинамикаси халқаро конф. – 2004. – №5. – С.22 – 28.
2. Mukhitdinov A.A., Ruzimov S.K., Eshkabilov S.L., Optimal Control Strategies for CVT of the HEV during a regenerative process// Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICENHV '06. IEEE Conference, Dec. 2006. – Pune. India, 12. с. (05.00.00; №3. Scopus).
3. Eshkabilov S.L., Ruzimov S.K. Analyses of Control Strategies for CVT of the HEV during a regenerative braking// Кибернетика масалалари. 176-сон, 2007. – 10 с.
4. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К. Автомобиль бўйлама динамикасини тадқиқ қилиш// Компьютер дастури, Авторлик гувоҳномаси. №DGU 01446, 2007.
5. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К. Гибрид юритмали автомобиль бўйлама динамикасини тадқиқ қилиш// Компьютер дастури, Авторлик гувоҳномаси. №DGU 01447, 2007.
6. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К., Эшкабилов С.Л. Моделирование человека-оператора в системе управления “водитель – автомобиль – окружающая среда”// Международная научно-техническая конференция Ассоц. Автомобильных инженеров, 3-4 июня 2009 г, НИЦИАМТ ФГУП “НАМИ”, п. Автополигон, М. 2009, – 6 с.
7. Tonoli A., Amati N., Impinna F., Detoni J.G., Gasparin E., Ruzimov S., Abdivakhidov K. Influence of dry friction on the irreversibility of cycloidal speed reducer// 5th World Tribology Congress, – Turin, Italy. 9-13 September 2013. (№3. Scopus).
8. Di Napoli M.; Straehle M.; Ruzimov S., Suarez Cabrera L.D.; Amati N.; Tonoli A. Characterization of Belt Drive Systems in Hybrid Powertrains//AIAS - Associazione Italiana per L'analisi Delle Sollecitazioni, 45° Convegno Nazionale, Universita' Degli Studi Di Trieste, 7-10 Settembre. 2016. – 10 p.
9. Di Napoli M.; Straehle M.; Ruzimov S., Suarez Cabrera L.D.; Amati N.; Tonoli A. Intelligent Belt Drive Systems in Hybrid Powertrains: a Multipurpose Test Rig// 7th IFAC Symposium on Mechatronic Systems & 15th Mechatronics Forum International Conference, Loughborough University, 5-8 September 2016. – 7 p. (05.00.00; №3. Scopus).

10. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К. Имитационное моделирование гибридного автомобиля// "Йўл транспорт ва муҳандислик коммуникация инфратузилмасини ривожлантириш истиқболлари", 2017 йил 24-25 – ноябрь кунлари. – 3б.
11. Мухитдинов А.А., Рuzимов С.К., Касымов О.К. Виртуальный стенд для испытания тягово-скоростных свойств автомобиля// 104-я Международная научно-техническая конференция «Опыт создания и эксплуатации автомобильного транспорта в условиях жаркого климата», Ташкент, 20-21 Сентября, 2018.
12. Ezemobi E., Ruzimov S., Bonfitto A., Tonoli A., Amati N. Energy savings from electrification of cooling system//Proceedings of the ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2020, August 16 – 19, 2020, St. Louis, MO, USA, – 9p. (05.00.00; №3. Scopus).
13. Rahmeh H., Bonfitto A., Ruzimov S. Fuzzy logic vs Equivalent Consumption Minimization strategy for energy management in P2 hybrid electric vehicles// Proceedings of the ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2020, August 16-19, 2020, St. Louis, MO, USA, – 6 p. (05.00.00; №3. Scopus).

Автореферат «ТДТУ Хабарномаси» илмий-техник журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус тилларидаги матнларининг мослиги текширилди.



Нусха кўпайтирувчи: ЯТТ «**Ризаев М.Х.**».
Босишга рухсат этилди: 15.08.2022й.
Бичими: 21x30¹/₂. Адади: 100 нусха.
Тошкент, Фаровон 4-тор кўча, 35.
Тел: (+998) 97 737 23 01

