DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

AVTOMOBILNING EKSPLUATATSION XUSUSIYATLARINI FORWARD VA BACKWARD MODELLASHTIRISH ASOSIDA BAHOLASH

Sharipova F., *o'qituvchi,*
Yakhshilikova G., *dotsent,*
Aerokosmik va mexanika muhandisligi kafedrasi,
Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti

Annotatsiya. *Ushbu maqolada an'anaviy, gibrid va akkumulyatorli elektr transport vositalari uchun forward va backward modellashtirish strategiyalarini taqqoslashga mo'ljallangan ixcham bo'ylama avtomobil modeli ishlab chiqilgan. Backward model oldindan berilgan tezlik–vaqt profilidan boshlanib, avtomobil tezlanishi, inertsiya kuchi, g'ildirash qarshiligi, aerodinamik qarshilik, yo'l nishabi qarshiligi, g'ildirakdagi burovchi moment, g'ildirak aylanish tezligi, transmissiya quvvati va energiya sarfini hisoblaydi. Elektrlashtirilgan avtomobillar uchun model soddalashtirilgan ekvivalent elektr zanjiri asosida akkumulyatorning klemmalardagi quvvati, toki va zaryad holatini ham baholaydi. Forward model haydovchi yoki kuch qurilmasi buyruqlaridan boshlanib, kuchlar balansi va sonli integrallash orqali avtomobilning tezlanishi, tezligi hamda bosib o'tgan masofasini aniqlaydi. Asosiy tenglamalar o'zgaruvchilar, parametrlar, o'lchov birliklari va modellashtirish farazlari bilan birga keltirilgan. Tadqiqot natijalari backward modellashtirish ma'lum harakatlanish sikli uchun energiya sarfini baholashda hisoblash jihatidan samarali ekanini, forward modellashtirish esa boshqaruv tizimlari, avtomobilning harakatlanish qulayligi va o'tkinchi rejimlarini o'rganish uchun qulayroq ekanini ko'rsatadi. Taklif etilgan yondashuv avtomobil energiyasi va ekspluatatsion ko'rsatkichlarini dastlabki darajada tahlil qilish, shuningdek, yuqori aniqlikdagi modellarni tekshirish uchun shaffof asos bo'lib xizmat qiladi.*

Abstract. *In this paper, a compact longitudinal vehicle model designed to compare forward and backward modeling strategies for conventional, hybrid, and battery electric vehicles is developed. The backward model originates from a prescribed velocity–time profile and computes vehicle acceleration, inertial force, rolling resistance, aerodynamic drag, grade resistance, wheel torque, wheel rotational speed, transmission power, and energy consumption. For electrified powertrains, the model additionally estimates battery terminal power, current, and state of charge (SoC) based on a simplified equivalent circuit. Conversely, the forward model initiates from driver or powertrain commands and determines vehicle acceleration, velocity, and traveled distance via force balance equations and numerical integration. The governing equations are presented alongside defined variables, parameters, units of measurement, and modeling assumptions. The findings demonstrate that backward modeling is computationally efficient for assessing energy consumption over designated drive cycles, whereas forward modeling is better suited for analyzing control systems, drivability, and transient dynamic regimes. The proposed approach provides a transparent framework for early-stage evaluation of vehicle energy and operational performance, as well as for benchmarking high-fidelity simulation models.*

Аннотация. *В данной статье разработана компактная продольная модель транспортного средства, предназначенная для сравнительного анализа стратегий прямого (forward) и обратного (backward) моделирования для традиционных, гибридных и аккумуляторных электромобилей. Обратная модель отталкивается от заданного профиля скорости во времени и рассчитывает ускорение автомобиля, силу инерции, сопротивление качению, аэродинамическое сопротивление, сопротивление уклону дороги, крутящий момент на колесах, частоту вращения колес, мощность трансмиссии и расход энергии. Для электрифицированных автомобилей модель дополнительно оценивает мощность на клеммах аккумулятора, ток и уровень заряда (SoC) на основе упрощенной*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

эквивалентной электрической схемы. Прямая модель начинается с команд водителя или силовой установки и определяет ускорение, скорость и пройденное расстояние автомобиля через баланс действующих сил и численное интегрирование. Основные уравнения представлены с указанием переменных, параметров, единиц измерения и расчетных допущений. Результаты исследования показывают, что обратное моделирование вычислительно эффективно при оценке энергопотребления на заданном ездовом цикле, тогда как прямое моделирование более предпочтительно для исследования систем управления, динамических качеств автомобиля и переходных режимов. Предложенный подход служит прозрачной базой для предварительного анализа энергоэффективности и эксплуатационных показателей автомобиля, а также для верификации моделей высокой точности.

Kalit so‘zlar: *avtomobilni modellashtirish; bo‘ylama dinamika; backward modellashtirish; forward modellashtirish; tortish kuchi; transmissiya; elektr avtomobil; akkumulyator zaryad holati.*

Keywords: *vehicle modeling; longitudinal dynamics; backward modeling; forward modeling; tractive effort; powertrain; electric vehicle; battery state of charge.*

Ключевые слова: *моделирование автомобиля; продольная динамика; обратное моделирование; прямое моделирование; сила тяги; трансмиссия; электромобиль; степень заряженности аккумулятора.*

Kirish. Avtomobil ekspluatatsion ko‘rsatkichlari modellari avtomobil harakati bilan dvigatel, elektr dvigatel, transmissiya, g‘ildiraklar va energiya saqlash tizimining ishlashi o‘rtasidagi bog‘lanishni ifodalaydi. Bunday modellar avtomobil samaradorligini baholash, yoqilg‘i va elektr energiyasi sarfini aniqlash, turli kuch qurilmalari konfiguratsiyalarini taqqoslash hamda boshqaruv strategiyalarini tajriba sinovlaridan oldin tekshirish uchun zarur. Ular, shuningdek, avtomobil massasi, yo‘l nishabi, shina xususiyatlari, aerodinamik parametrlar, haydash uslubi va yordamchi yuklamalarning umumiy ekspluatatsion ko‘rsatkichlarga ta’sirini tahlil qilish imkonini beradi. Avtomobilning bo‘ylama modelida asosiy tashqi ta’sirlar inertsiya kuchi, g‘ildirash qarshiligi, aerodinamik qarshilik va yo‘l nishabi qarshiligidan iborat [1]. Ushbu kuchlar belgilangan tezlikni saqlash yoki kerakli tezlanishni hosil qilish uchun zarur tortish kuchini belgilaydi.

Avtomobil simulyatsiyasida hisoblashning ikki asosiy yo‘nalishi qo‘llanadi: backward va forward modellashtirish. Backward modellashtirishda tezlik grafigi yoki harakatlanish sikli asosiy kirish ma’lumoti sifatida beriladi. Model dastlab tezlanish va harakatga qarshilik kuchlarini hisoblaydi, so‘ngra g‘ildiraklardagi zarur burovchi moment hamda aylanish tezligini aniqlaydi. Ushbu talablar transmissiya va kuch qurilmasi orqali backward yo‘nalishda uzatilib, dvigatel yoki elektr dvigatelning ish rejimi va tegishli energiya talabi baholanadi. Mazkur yondashuv hisoblash jihatidan samarali bo‘lib, yoqilg‘i sarfini, elektr avtomobil energiya sarfini va kuch qurilmasining dastlabki o‘lchamlarini tahlil qilish uchun qulaydir.

Forward modellashtirishda haydovchi yoki boshqaruv qurilmasining buyruqlari kuch qurilmasiga beriladi va natijada avtomobilning tezligi, tezlanishi hamda bosib o‘tgan masofasi model chiqishi sifatida aniqlanadi. Berilgan burovchi moment transmissiya orqali g‘ildiraklarga uzatiladi va u yerda tortish kuchiga aylantiriladi. Keyinchalik avtomobil tezlanishi tortish kuchi bilan harakatga qarshilik qiluvchi kuchlar o‘rtasidagi balans asosida hisoblanadi. Forward modellar haydovchi xatti-harakatini, tezlikni kuzatish rostlagichlarini, uzatmalarni almashtirish mantiqini, ijro mexanizmlari cheklovlarini va komponentlarning o‘tkinchi javoblarini hisobga olishi mumkin. Shu sababli ular avtomobilning harakatlanish qulayligi, boshqaruv tizimi samaradorligi va dinamik ish rejimlarini tadqiq qilishda ayniqsa foydalidir. Har ikki yondashuv bir xil fizik avtomobil tizimini ifodalasa-da, ularning natijalari har doim ham bir xil bo‘lavermaydi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

Farqlar berilgan harakatlanish sikli, boshqaruv qonunlari, transmissiya samaradorligi, komponentlarning javob vaqti, regenerativ tormozlash strategiyasi va o‘tkinchi jarayonlarning ifodalanishiga bog‘liq bo‘lishi mumkin [2]. Backward model odatda avtomobil berilgan tezlik profiliga aniq amal qiladi, deb faraz qiladi. Forward model esa ushbu profilni mavjud kuch qurilmasi va boshqaruv cheklovlari sharoitida amalda bajarish mumkin yoki mumkin emasligini aniqlaydi. Shuning uchun modellashtirish usuli tadqiqot maqsadiga qarab tanlanishi kerak.

Ushbu ishning maqsadi backward va forward avtomobil modellarini yagona belgilar tizimi asosida shakllantirish, asosiy tenglamalarning fizik mazmunini tushuntirish va har bir usulning qo‘llanish sohasini aniqlashdan iborat. Tadqiqotda avtomobil dinamikasi, transmissiya, kuch qurilmasi va energiya saqlash tizimi o‘rtasidagi signal almashinuvi ham izohlanadi. Bu yondashuv avtomobil energiya sarfini baholash uchun shaffof asos yaratadi hamda modelni batafsilroq simulyatsiya va tajribaviy tekshiruvlar yo‘nalishida rivojlantirish imkonini beradi.

Mavzuga oid adabiyotlar sharhi. Avtomobilning ekspluatatsion xususiyatlarini baholash, uning harakat dinamikasi va energetik ko‘rsatkichlarini aniqlash masalalari avtomobil dinamikasi va transport vositalarini modellashtirish sohasidagi muhim tadqiqot yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Mavjud ilmiy adabiyotlarda avtomobil dinamikasi, transport vositalarining harakat jarayonini modellashtirish, forward va backward modellashtirish yondashuvlari, akkumulyator modellari hamda kuch uzatmasi komponentlarini tanlash va baholash masalalari keng o‘rganilgan.

T. D. Gillespie tomonidan tayyorlangan “Fundamentals of Vehicle Dynamics” asarida avtomobil dinamikasining asosiy nazariy asoslari, jumladan, avtomobil harakatiga ta’sir etuvchi kuchlar, tortish kuchi, g‘ildirakdagi kuch, aerodinamik qarshilik, dumalash qarshiligi, tezlanish va tormozlanish jarayonlari batafsil yoritilgan [1]. Mazkur ish avtomobil harakatining asosiy fizik jarayonlarini tushunish va transport vositasining ekspluatatsion ko‘rsatkichlarini aniqlash uchun nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. Biroq ushbu tadqiqotda forward va backward kompyuter modellarini o‘zaro taqqoslash asosiy masala sifatida qaralmagan.

Fast L., Bruzelius F., Johannesson P. va boshqalarning tadqiqotida forward va backward vehicle simulation modellari o‘rtasidagi ichki farqlar tahlil qilingan [2]. Mualliflar ikki modelda bir xil avtomobil va harakat sharoitlaridan foydalanilganda olinadigan natijalarning farqlanish sabablarini o‘rganganlar. Backward modelda berilgan tezlik profilidan kelib chiqib, talab etiladigan kuch va quvvat transport vositasining energiya oqimi bo‘yicha teskari yo‘nalishda hisoblansa, forward modelda energiya manbaidan g‘ildiraklargacha bo‘lgan jarayon va avtomobil harakatining dinamik javobi modellashtiriladi. Ushbu tadqiqot forward va backward yondashuvlarini solishtirish uchun muhim ilmiy asos bo‘lsa-da, mazkur ishda avtomobil ekspluatatsion xususiyatlarining kompleks bahosi alohida tadqiqot obyekti sifatida shakllantirilmagan.

G. L. Plettning “Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling” asarida akkumulyatorlarni modellashtirish, akkumulyatorning elektr xarakteristikalari, zaryad holati (SOC), kuchlanish va energiya holatini aniqlash usullari tadqiq etilgan [3]. Ushbu ish elektr va gibrid avtomobillarning energiya tizimlarini modellashtirishda muhim nazariy manba hisoblanadi. Akkumulyator modeli transport vositasining umumiy energetik modelining muhim qismi bo‘lib, uning parametrlari avtomobilning energiya sarfi va harakat masofasini baholashda qo‘llanilishi mumkin. Shu bilan birga, mazkur manba asosan akkumulyator modellashtirish masalalariga bag‘ishlangan bo‘lib, forward va backward avtomobil modellarining ekspluatatsion xususiyatlarga ta’siri kompleks ravishda tahlil qilinmagan.

Longo S. va boshqalar tomonidan olib borilgan tadqiqotda kuch uzatmasi komponentlarini tanlash va o‘lchamlarini belgilashda forward-facing va backward-facing modellarining qo‘llanilishi qiyosiy tahlil qilingan [4]. Tadqiqotda har ikki yondashuvning hisoblash xususiyatlari va powertrain komponentlarini sizing jarayonidagi qo‘llanish imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

Backward-facing modellar berilgan harakat sikli asosida komponentlarga bo‘lgan quvvat talabini aniqlashda samarali bo‘lsa, forward-facing modellar transport vositasining dinamik harakatini modellashtirish imkonini beradi. Mazkur ish ushbu ikki modellashtirish usulini qiyosiy o‘rganish nuqtai nazaridan tadqiqotimizga yaqin bo‘lsa-da, unda avtomobilning ekspluatatsion xususiyatlarini keng qamrovda, jumladan, tezlanish, tortish kuchi va harakat jarayoni nuqtai nazaridan baholash masalasiga asosiy e’tibor qaratilmagan.

SAE International tomonidan ishlab chiqilgan SAE J2951_202504 “Drive Quality Evaluation for Chassis Dynamometer and On-Road Testing” standartida transport vositasining berilgan harakat sikliga qanchalik aniq amal qilishini baholash usullari keltirilgan [5]. Mazkur standart chassis dynamometer va real-road testing sharoitlarida harakat sifatini baholash uchun qo‘llaniladi. Ushbu yondashuv avtomobil modelida olingan tezlik profilini belgilangan driving cycle bilan taqqoslash va modelning harakatni qay darajada to‘g‘ri ifodalashini baholash uchun muhim ahamiyatga ega. Biroq standartning asosiy yo‘nalishi modelning forward va backward arxitekturalarini qiyosiy tahlil qilish emas, balki harakat sifatini baholash metodologiyasini belgilashdan iborat.

Umuman olganda, yuqorida ko‘rib chiqilgan adabiyotlar avtomobil dinamikasi, forward va backward modellashtirish, akkumulyator tizimlarini modellashtirish, kuch uzatmasi komponentlarini baholash hamda transport vositasining harakat sifatini aniqlashning alohida jihatlarini qamrab oladi [1–5]. Mavjud tadqiqotlarda mazkur masalalarning har biri ma’lum bir yo‘nalish doirasida chuqur o‘rganilgan bo‘lsa-da, avtomobilning asosiy ekspluatatsion xususiyatlarini forward va backward modellashtirish yondashuvlari asosida bir xil harakat sharoitlarida kompleks baholash va ularning natijalarini o‘zaro taqqoslash masalasi alohida tadqiqot sifatida yetarlicha yoritilmagan.

Shundan kelib chiqib, mazkur tadqiqotning o‘ziga xosligi avtomobilning ekspluatatsion xususiyatlarini forward va backward modellashtirish usullari asosida baholash, ikki yondashuvda olingan natijalarni bir xil harakat sikli va bir xil avtomobil parametrlari asosida taqqoslash hamda ularning qo‘llanish xususiyatlarini aniqlashdan iborat. Tadqiqotda avtomobil harakati, tortish kuchi, tezlanish, quvvat talabi va harakat profili kabi asosiy ko‘rsatkichlarga e’tibor qaratiladi. Bu esa turli modellashtirish yondashuvlarining avtomobil ekspluatatsion xususiyatlarini baholashdagi imkoniyatlarini tizimli ravishda tahlil qilish imkonini beradi.

Tadqiqot metodologiyasi. Mazkur tadqiqotda avtomobilning ekspluatatsion xususiyatlarini baholash uchun modellashtirish, qiyosiy taqqoslash, tahlil qilish va natijalarni baholash usullaridan foydalanildi. Tadqiqotning asosiy metodologik yondashuvi avtomobilning forward va backward modellarini bir xil boshlang‘ich shartlar va bir xil harakat sikli asosida shakllantirish hamda olingan natijalarni o‘zaro taqqoslashga asoslangan.

Tadqiqotning dastlabki bosqichida avtomobilning asosiy texnik va ekspluatatsion parametrlari, jumladan, avtomobil massasi, g‘ildirak radiusi, aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti, dumalash qarshiligi, uzatish tizimi parametrlari va harakat tezligi profili aniqlandi. Har ikkala modelda ham bir xil avtomobil parametrlari va bir xil harakat sharoitlaridan foydalanildi. Bu esa forward va backward modellaridan olingan natijalarni o‘zaro obyektiv taqqoslash imkonini berdi.

Backward modellashtirish usulida tadqiqot uchun berilgan tezlik profili boshlang‘ich ma’lumot sifatida qabul qilindi. Avtomobilning belgilangan tezlik bo‘yicha harakatlanishi uchun zarur bo‘lgan tortish kuchi va quvvat talabi aniqlandi. Hisoblash jarayoni g‘ildiraklardan kuch uzatmasi va energiya manbai tomon teskari yo‘nalishda olib borildi. Bunda dumalash qarshiligi, aerodinamik qarshilik va avtomobilning tezlanishi natijasida yuzaga keladigan qarshiliklar hisobga olindi. Shu orqali berilgan harakat siklini amalga oshirish uchun zarur bo‘lgan quvvat talabi baholandi.

Forward modellashtirish usulida esa hisoblash jarayoni energiya manbai va dvigateldan boshlanib, kuch uzatish tizimi orqali g‘ildiraklargacha bo‘lgan tabiiy energiya oqimi yo‘nalishida

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

amalga oshirildi. Dvigatel yoki elektr motorining hosil qilgan momenti, transmissiya parametrlari va yo‘lga ta’sir qiluvchi qarshilik kuchlari asosida avtomobilning haqiqiy tezligi va tezlanishi aniqlandi. Shu sababli forward model avtomobilning berilgan boshqaruv ta’siriga nisbatan dinamik javobini baholash imkonini berdi.

Backward avtomobil modellashtirishi. Model yo‘l bo‘ylab bir o‘lchamli harakatni ifodalaydi. Avtomobil qattiq jism sifatida qaraladi, shinaning sirpanishi hisobga olinmaydi, g‘ildirak radiusi o‘zgarmas deb olinadi, transmissiya yo‘qotishlari esa samaradorlik koeffitsiyentlari bilan ifodalanadi. Yo‘l nishabi θ burchak orqali modelga kiritilishi mumkin. Ushbu farazlar dastlabki energiya va ekspluatatsion tahlillar uchun mos, biroq yuqori aniqlikdagi prognozlar uchun ular tajribada kalibrlangan xaritalar bilan almashtirilishi lozim.

1-rasmda backward modeldagi axborot oqimi ko‘rsatilgan. Strelkalar fizik energiya uzatilish yo‘nalishini emas, hisoblash yo‘nalishini bildiradi.



1-rasm. Backward modelda hisoblash ketma-ketligi, muallif ishlanmasi

Backward usul avtomobil berilgan tezlik profiliga amal qiladi, degan farazga asoslanadi. Tezlanish tezlikning vaqt bo‘yicha hosilasi orqali aniqlanadi:

$$a(t) = dv(t)/dt \tag{1}$$

bu yerda v – avtomobil tezligi (m/s), t – vaqt (s), a – bo‘ylama tezlanish (m/s²). O‘lchangan ma’lumotlarda sonli differensiallashdan oldin filtrlash bajarilishi kerak, chunki shovqin hosila olish jarayonida kuchayadi.

Bo‘ylama kuchlar balansi shina va yo‘l tutashuvida talab qilinadigan tortish kuchini beradi:

$$F_{tr} = m \cdot a + mg \sin\theta + C_{rr} \cdot mg \cos\theta + \frac{1}{2}\rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \tag{2}$$

bu yerda m – avtomobil massasi (kg), g – erkin tushish tezlanishi (9,81 m/s²), θ – yo‘l nishabi burchagi, C_{rr} – g‘ildirash qarshiligi koeffitsiyenti, ρ – havo zichligi (kg/m³), C_d – aerodinamik qarshilik koeffitsiyenti, A – avtomobilning frontal yuzasi (m²). Birinchi had inertsiya kuchini, ikkinchi had yo‘l nishabi qarshiligini, uchinchi had g‘ildirash qarshiligini, to‘rtinchi had esa aerodinamik qarshilikni ifodalaydi.

$$T_w = F_{tr} \cdot R_w + T_{loss} \tag{3}$$

bu yerda T_w – g‘ildirakdagi burovchi moment (N·m), R_w – samarali g‘ildirak radiusi (m), T_{loss} esa podshipnik, shina va o‘qdagi yo‘qotishlar momentidir. G‘ildirakning burchak tezligi quyidagicha hisoblanadi:

$$\omega_w = \frac{v}{R_w} \tag{4}$$

Rim diametri dr, nominal shina eni b va profil nisbati α berilganida, yuklanmagan shinaning taxminiy radiusi $R0 = dr/2 + b{\cdot}\alpha$ ko‘rinishida aniqlanadi. Shina deformatsiyasi va yuklama ta’sirida samarali radius kamayadi. Shu sababli birinchi darajali baholashda kalibrlash

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

koeffitsiyenti kr dan foydalanish mumkin: *Rw = kr·R0*. Radial shinalar uchun kr odatda 0,92–0,98 oralig‘ida bo‘ladi.

$$P_w = F_{tr} \cdot v = T_w \cdot \omega_w \quad (5)$$

G‘ildirak quvvati tortish vaqtida musbat, tormozlash vaqtida esa manfiy bo‘ladi. Samaradorligi ηd bo‘lgan transmissiya uchun tortish rejimida dvigatel yoki elektr dvigatelga talab qilinadigan quvvat taxminan $P_{pt} = \frac{P_w}{\eta d}$ orqali aniqlanadi. Regenerativ tormozlashda qayta tiklanadigan quvvat elektr dvigatel, invertor va akkumulyatorning zaryadlash samaradorligi bilan cheklanadi.

Elektr avtomobil uchun akkumulyatorning soddalashtirilgan ekvivalent elektr zanjiri quyidagicha ifodalanadi:

$$P_b = U_{oc} \cdot I - R_b.I^2 \quad (6)$$

$$I = \frac{v_{oc} - \sqrt{v_{oc}^2 - 4R_b \cdot P_b}}{2R_b} \quad (7)$$

U_{oc} – ochiq zanjir kuchlanishi,R_b. – ichki qarshilik, I – akkumulyator toki, P_b esa akkumulyatorning klemmalardagi quvvatidir. Fizik jihatdan maqbul ildiz tok yo‘nalishi va ish rejimiga mos holda tanlanadi. Zaryad holati kulon hisoblash usuli orqali yangilanadi:

$$SOC_{(t+\triangle t)} = SOC_{(t)} - \frac{\eta_c \cdot I \cdot \triangle t}{Q_{nom}} \quad (8)$$

bu yerda Q_{nom}– akkumulyatorning nominal sig‘imi (amper-soat), η_c esa zaryadlash va razryadlashni hisobga oluvchi tuzatish koeffitsiyentidir. Ushbu tenglama sodda va hisoblash uchun qulay, biroq harorat, eskirish, gisterezis va tok tezligiga bog‘liqlikni ifodalash uchun batafsilroq akkumulyator modeli talab etiladi [3].

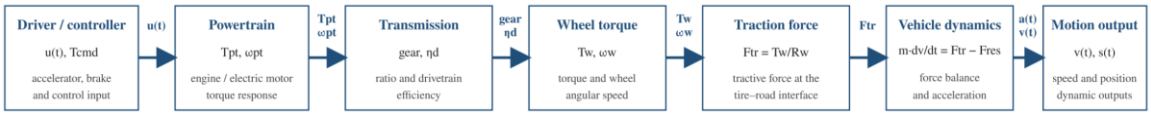
Forward avtomobil modellashtirishi. Forward modellashtirishda haydovchi modeli yoki boshqaruv qurilmasi burovchi moment, tezlanish yoki gaz pedalining holati kabi boshqaruv buyruqlarini shakllantiradi. Ushbu buyruqlar kuch qurilmasiga uzatiladi va dvigatel yoki elektr dvigatelning haqiqiy ish rejimi aniqlanadi. Keyin hosil bo‘lgan burovchi moment transmissiya orqali g‘ildiraklarga uzatiladi. G‘ildiraklardagi burovchi moment tortish kuchiga aylantiriladi va ushbu kuch avtomobilning harakatga qarshilik qiluvchi kuchlarga nisbatan natijaviy kuchini belgilaydi. Avtomobilning tezlanishi, tezligi va bosib o‘tgan masofasi vaqt bo‘yicha ketma-ket hisoblash hamda sonli integrallash orqali aniqlanadi:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_{tr} - F_{res} \quad (9)$$

Fres yo‘l nishabi, g‘ildirash, aerodinamik va boshqa qarshilik kuchlarining yig‘indisini bildiradi. Agar model ma’lum harakatlanish sikliga amal qilishi kerak bo‘lsa, forward usul tarkibida haydovchi modeli yoki tezlikni kuzatish rostlagichi bo‘lishi lozim. Bunday rostlagich berilgan tezlik bilan modelda hosil bo‘lgan haqiqiy tezlikni taqqoslaydi va xatolik asosida gaz yoki tormoz buyruqlarini yangilaydi. Shu sababli rostlagichning kuchaytirish koeffitsiyentlari, ijro mexanizmlari cheklovlari, uzatmalarni almashtirish mantiqi, dvigatelning burovchi moment chegarasi va momentning shakllanish vaqti natijaga bevosita ta’sir qiladi [2]. Forward modelning muhim afzalligi shundaki, u avtomobilning berilgan tezlik profilini qanchalik aniq kuzata olishini, quvvat cheklovlari yoki tormozlash talablari yuzaga kelganda qanday javob berishini ko‘rsatadi. Hisoblash qadami ham alohida ahamiyatga ega: katta qadam tezlik va masofa hisobidagi xatoni oshirishi mumkin, juda kichik qadam esa hisoblash vaqtini uzaytiradi. Shuning uchun vaqt qadami

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

avtomobil dinamikasi va boshqaruv tizimidagi eng tez jarayonlarni yetarlicha aks ettiradigan qilib tanlanadi.



2-rasm. Forward modelda hisoblash ketma-ketligi, muallif ishlanmasi

Forward va backward modellashtirishni taqqoslash (1-jadval).

1-jadval

Backward va forward modellashtirish usullarining taqqoslanishi, muallif ishlanmasi

Mezon	Backward model	Forward model
Boshlang‘ich nuqta	Berilgan tezlik va nishab grafigi	Haydovchi yoki rostlagich kirishi
Avtomobil tezligi	Kirish ma’lumoti va aniq kuzatiladi	Dinamik chiqish
Asosiy afzallik	Energiya sarfi va komponent o‘lchamlarini tez tahlil qilish	Boshqaruv va o‘tkinchi jarayonlarni ifodalash
Asosiy cheklov	Haydovchi va dinamik boshqaruv ta’siri cheklangan	Kalibrlangan rostlagich va ko‘proq hisoblash talab etiladi
Odatdagi qo‘llanish	Sikl energiyasi, yoqilg‘i sarfi, qiyosiy tadqiqotlar	Avtomobil boshqaruvi, harakatlanish qulayligi, o‘tkinchi tekshiruv

Ushbu farq natijalarni talqin qilishda muhim ahamiyatga ega. Backward model harakatlanish sikliga amal qilish uchun zarur bo‘lgan nazariy energiyani baholaydi, biroq real haydovchi, rostlagich yoki ijro mexanizmi ushbu siklni amalda takrorlay olishini isbotlamaydi. Forward model bunday imkoniyatni ifodalashi mumkin, lekin uning natijasi rostlagich sozlamalari va komponentlarning dinamik xususiyatlariga bog‘liq. Shuning uchun bu ikki usul bir-birini to‘ldiruvchi yondashuvlar sifatida qaralishi, ammo o‘zaro to‘liq almashtirilmasligi kerak [2,4].

Modelni tekshirish va cheklovlar. Modelni tekshirish bir necha bosqichda amalga oshirilishi kerak. Birinchi bosqichda kuchlar balansi tenglamasi tekis yo‘lda o‘zgarmas tezlik bilan harakatlanish kabi analitik holatlar bilan solishtiriladi. Ikkinchi bosqichda g‘ildirak quvvati mustaqil hisoblash jadvali yoki laboratoriya o‘lchovi bilan taqqoslanadi. Uchinchi bosqichda forward modelning tezlikni kuzatish xatosi belgilangan mezon asosida hisoblanadi. Simulyatsiya va o‘lchangan harakatlanish sikllarini taqqoslashda standartlashtirilgan haydash sifati ko‘rsatkichlaridan foydalanish mumkin [5]. Yakunda akkumulyatorning zaryad holati va energiya sarfi turli boshlang‘ich zaryad holatlarida bir nechta sikl bo‘yicha tekshirilishi lozim.

Ushbu formulatsiyada yonlama dinamika, shina sirpanishi, issiqlik o‘tkinchi jarayonlari, uzatmalarni almashtirishning batafsil hodisalari, akkumulyator harorati, akkumulyatorning eskirishi va tasodifiy transport oqimi hisobga olinmagan. Ushbu cheklovlar modelning mo‘ljallangan birinchi darajali tahlildan tashqaridagi aniqligini pasaytiradi. Shunga qaramay, keltirilgan tenglamalar kalibrlangan samaradorlik xaritalari, yo‘l nishabi ma’lumotlari, yordamchi yuklamalar va tajribada o‘lchangan harakatlanish sikllari yordamida kengaytirilishi mumkin bo‘lgan takrorlanuvchi asosni ta’minlaydi.

Xulosa. Forward va backward avtomobil modellarini yagona yondashuv asosida ifodalovchi tizim ishlab chiqildi. Backward yondashuv ma’lum tezlik profili yoki harakatlanish siklidan kelib chiqib, avtomobilning tezlanishi, yo‘l qarshilik kuchlari, g‘ildirakdagi burovchi moment, aylanish tezligi, transmissiya quvvati va energiya talabini ketma-ket hisoblaydi. Shu

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.18

sababli ushbu yondashuv energiya sarfini baholash, yoqilg‘i tejamkorligini tahlil qilish, elektr avtomobillarda akkumulyatorning zaryad holatini aniqlash, komponentlarning dastlabki o‘lchamlarini belgilash va turli avtomobil konfiguratsiyalarini taqqoslash uchun samarali hisoblanadi. Biroq backward model avtomobilning berilgan tezlik profiliga ideal tarzda amal qiladi, deb faraz qilgani sababli haydovchi xatti-harakati va real boshqaruv cheklovlarini to‘liq ifodalay olmaydi. Forward yondashuv esa haydovchi yoki boshqaruv qurilmasi kirishlaridan avtomobil harakatini aniqlaydi. Unda dvigatel yoki elektr dvigatel burovchi momenti, transmissiya ishlashi, g‘ildirakdagi tortish kuchi, qarshilik kuchlari, tezlanish, tezlik va bosib o‘tilgan masofa o‘zaro bog‘liq holda hisoblanadi. Ushbu model boshqaruv tizimini ishlab chiqish, avtomobilning harakatlanish qulayligini baholash, tezlikni kuzatish aniqligini tekshirish va o‘tkinchi rejimlarni tahlil qilish uchun maqsadga muvofiqdir. Asosiy amaliy xulosa shundan iboratki, model turi tadqiqot savoliga mos tanlanishi kerak: tezlik profili asosidagi energiya masalalari uchun backward modellashtirish, boshqaruv yoki dinamik harakat xususiyatlariga asoslangan masalalar uchun esa forward modellashtirish afzal hisoblanadi. Ikki yondashuvni birgalikda qo‘llash model natijalarining ishonchliligini oshiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1 Gillespie, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International, 1992.

2 Pettersson, P., Jacobson, B., Bruzelius, F., Johannesson, P., & Fast, L. (2020). Intrinsic differences between backward and forward vehicle simulation models. *IFAC-PapersOnLine*, *53*(2), 14292-14299.

3 Plett, G. L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Artech House, 2015.

4 Longo, S., et al. Comparative analysis of forward-facing models versus backward-facing models in powertrain component sizing. SAE Technical Paper, 2014.

5 SAE International. SAE J2951_202504: Drive Quality Evaluation for Chassis Dynamometer and On-Road Testing. SAE International, 2025.