



SIMSIZ ENERGIYA UZATISH.

БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ.

WIRELESS ENERGY TRANSMISSION.

O'sarova O'raloy Barat qizi

Uzaqova Dilafruz Toshturdi qizi

Termiz davlat pedagogika instituti

Tabiiy va aniq fanlar fakulteti

Fizika kafedrası

Fizika va Astronomiya ta'lim yo'nalishi talabasi.

Ilmiy rahbar: Oromiddinov Sardor Botirovich

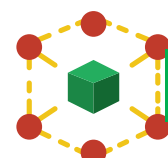
[Tel:+99888-841-05-12](tel:+99888-841-05-12)

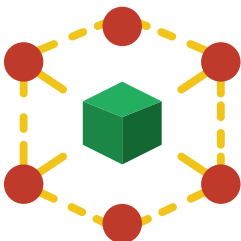
Аннотация

Simsiz energiya uzatish (Wireless Power Transfer-WPT) texnologiyasi elektr energiyasini jismoniy o'tkazgichsiz, elektromagnit maydoni yoki to'liqlar vositasida bir nuqtadan ikkinchisiga uzatish imkonini beradi. Ushbu maqola WPT ning asosiy turlari-induktiv birlashtirish, magnit rezonansli birlashtirish, radiofrekvensli, mikroto'liqli va lazer vositasidagi energiya uzatishni-ularning fizik asoslari, texnik parametrlari va qo'llanilish sohalari nuqtai nazaridan tahlil qiladi. Hozirda sanoat va iste'molchi elektronikasida keng qo'llanilayotgan induktiv usuldan tortib kosmik quyosh elektr stansiyalariga mo'ljallangan mikroto'liqli tizimlarigacha bo'lgan barcha yo'nalishlar ko'rib chiqiladi. Tibbiyot, transport, harbiy va kosmik sohalarda WPT ning istiqbolli tatbiqlari tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: simsiz energiya uzatish, WPT, induktiv birlashtirish, magnit rezonansli tizim, MCR-WPT, mikroto'liqli energiya uzatish, radiofrekvensli WPT, elektromobil zaryadlash, kosmik quyosh stansiyasi, IoT, bezsimli zaryadlash.

Аннотация: Технология беспроводной передачи энергии (WPT) позволяет передавать электрическую энергию без физического проводника-через электромагнитное поле или волны. В статье анализируются основные виды WPT: индуктивная связь, магнитно-резонансная связь, радиочастотная, СВЧ и лазерная передача энергии, рассматриваются их физические принципы, технические параметры и области применения.





Ключевые слова: беспроводная передача энергии, WPT, индуктивная связь, система магнитного резонанса, MCR-WPT, микроволновая передача энергии, радиочастотная WPT, зарядка электромобилей, космическая солнечная электростанция, IoT, беспроводная зарядка.

Abstract: Wireless Power Transfer (WPT) technology enables the transmission of electrical energy without a physical conductor through electromagnetic fields or waves. This article analyses the main types of WPT-inductive coupling, magnetic resonance coupling, radio-frequency, microwave and laser power transmission-from the perspective of their physical principles, technical parameters and fields of application.

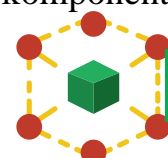
Key word: wireless power transfer, WPT, inductive coupling, magnetic resonance system, MCR-WPT, microwave power transmission, radiofrequency WPT, electric vehicle charging, space solar power station, IoT, wireless charging

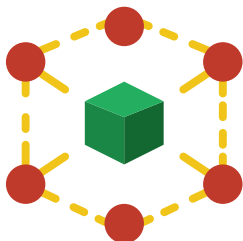
Kirish

Insoniyat tarixida elektr energiyasini uzatish doimo simlar va kabellar orqali amalga oshirilib kelindi. Biroq XIX asrning oxirida serb-amerikalik muhandis Nikola Tesla simsiz energiya uzatish kontseptsiyasini ilgari surdi va 1899-yilda Kolorado-Springsdagi tajribalari bilan fazo orqali elektr energiyasi uzatilishi mumkinligini amaliy ko'rsatdi. Tesla Wardenclyffe minorasini qurib, global simsiz energiya tarmog'ini yaratishni mo'ljallagan edi. Garchi u o'z vaqtida moliyaviy qo'llab-quvvatlanmagan bo'lsa-da, uning g'oyalari XXI asrda zamonaviy WPT texnologiyasiga asos bo'ldi. 2007-yilda MIT olimlari Marin Soljacic boshchiligida magnit rezonansli birlashtirish (MCR-WPT) texnologiyasini namoyish etishdi: ular 2 metr masofaga 60 W elektr energiyasini 40% dan ortiq samaradorlik bilan uzatishdi. Bu kashfiyot zamonaviy WPT tadqiqotlariga turtki bo'ldi va o'sha paytdan boshlab fan ushbu sohadagi yutuqlar misli ko'rilmagan darajada tezlashdi. Bugungi kunda simsiz zaryadlash smartfonlar, quloqchinlar va smart soatlarda kundalik hayotning bir qismiga aylangan. Qi standarti bo'yicha ishlaydigan qurilmalar soni 2023-yil oxiriga kelib 4 milliarddan oshdi. Elektromobillar uchun simsiz zaryadlash tizimlari yo'llarga o'rnatilmoqda. Tibbiyotda esa simsiz energiya yurak stimulyatorlari va boshqa implantlarga batareya almashinuvini yo'q qilib qo'ymoqda. Kosmik dasturlar esa Yerga qaytariladigan quvvatni terawatt darajasiga ko'tarish niyatida mikroto'lqinli WPT ni sinovdan o'tkazmoqda. Ushbu maqolada WPT ning barcha asosiy texnologik yo'nalishlari-fizikasi, texnik parametrlari, afzalliklari va cheklovlari, hamda jahondagi va O'zbekistondagi qo'llanilish imkoniyatlari ketma-ket tahlil qilinadi.

Asosiy qism

Simsiz energiya uzatishning zamonaviy texnologiyalari ikki katta guruhga bo'linadi: yaqin maydonga (near-field) va uzoq maydonga (far-field) asoslangan tizimlar. Yaqin maydon texnologiyalari-induktiv birlashtirish va magnit rezonansli tizimlar-o'tkazuvchi komponentlar





orasidagi to'liq to'lqin uzunligiga nisbatan qisqa masofada ishlaydi. Uzoq maydon tizimlari-radiofrekvensli, mikroto'lqinli va lazer vositasidagi WPT-energiyani kilometrlar va undan ham uzog'iga yo'naltirilgan to'lqin sifatida uzatadi. Induktiv birlashtirish Faradey elektromagnit induksiya qonuniga asoslanadi. Ikki g'altak o'zaro magnit maydon orqali ta'sirlashadi: birlamchi g'altakda o'zgaruvchan tok magnit maydon hosil qiladi, bu maydon ikkilamchi g'altakda EMK (elektr yurituvchi kuch) ni induksiyalaydi. Energiya uzatish samaradorligi ikkala g'altakning birlashish koeffitsienti k va sifat omili Q ga bog'liq:

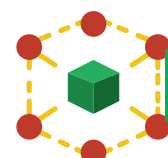
$$\eta \approx k^2 \times Q_1 \times Q_2 / (1 + k^2 \times Q_1 \times Q_2).$$

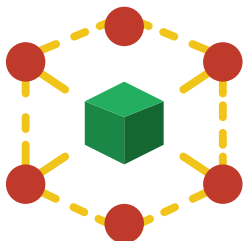
Amalda bu texnologiya 0.01–0.5 m masofada 85–95% samaradorlikka erishadi. Magnit rezonansli birlashtirish (MCR-WPT) induktiv texnologiyaning evolyutsiyasi bo'lib, ikkala g'altak bir xil rezonans chastotasiga sozlanadi. Bu holat energiya yo'qotilishini sezilarli kamaytiradi va masofani induktiv usulga nisbatan 10 baravar oshirish imkonini beradi. MIT tadqiqotchilari birinchi marta 2 metr masofada 40% samaradorlikni ko'rsatgan bo'lsa, hozirda sanoat tizimlari 5 metrgacha 85% samaradorlikka erishmoqda.

1-jadval. Simsiz energiya uzatish usullari taqqoslash jadvali¹

Uzatish usuli	Masofa (m)	Samaradorlik (%)	Quvvat diapazoni	Asosiy qo'llanishi
Induktiv birlashtirish (WPT)	0.01 – 0.5	85 – 95	1 W – 20 kW	Smartfon, EV zaryadlash
Rezonansli WPT (MCR)	0.1 – 5	70 – 90	100 W – 50 kW	Elektromobil, tibbiyot
Radiofrekvensli (RF)	1 – 1000	10 – 50	μ W – 10 W	IoT, sensor tarmoqlari
Mikroto'lqin (MPT)	100 – 50 000	30 – 70	kW – GW	Kosmik quyosh stansiyasi

¹ IEEE Wireless Power Transfer Conference (WoW) 2023 ma'lumotlari asosida tuzilgan.





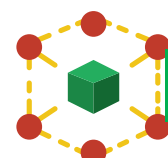
Uzatish usuli	Masofa (m)	Samaradorlik (%)	Quvvat diapazoni	Asosiy qo'llanishi
Lazer (optik) WPT	10 – 10 000	20 – 60	W – MW	UAV, kosmik tizimlar
Ultratovush (akustik)	0.01 – 1	25 – 50	mW – W	Tibbiy implantlar

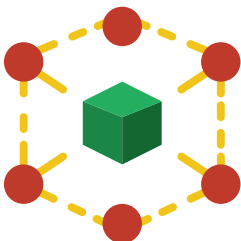
Radiofrekvensli WPT (RF-WPT) signal generatori, antenna va qabul qiluvchi antennadan iborat. Uzatuvchi antenna elektromagnit to'liqin tarqatadi, qabul qiluvchi esa ushbu to'liqin energiyasini to'g'rilagich (rectenna-rectifier + antenna) vositasida to'g'ridantokka aylantiradi. RF-WPT ning asosiy ustunligi-muvofiqlashtirilmagan vaziyatda ham ishlashi va past quvvatli qurilmalar (IoT sensorlar) ni metrlardan kilometrlargacha masofadan quvvatlash imkoniyati. Samaradorligi past (10–50%) bo'lgani sababli, asosan past quvvatli tizimlar uchun maqbul. Elektromobil (EV) zaryadlash sanoati simsiz WPT texnologiyasining eng tez rivojlanayotgan yo'nalishlaridan biridir. Simli zaryadlash tizimlari konnektorlarni ulanish zarurati va qo'lda boshqarish kabi qulaysizliklar tug'diradi. SAE J2954 standarti 2020-yilda qabul qilinib, 85 kHz chastotada 3.7 dan 22 kW gacha simsiz zaryadlash uchun xalqaro mezon belgiladi. Ushbu standart bo'yicha ishlayotgan tizimlar 85% dan yuqori samaradorlikka erishadi.

2-jadval. Elektromobil simsiz zaryadlash standartlari va texnik tavsifi²

Standard	Chastota (kHz)	Quvvat (kW)	Samaradorlik (%)	Holati
SAE J2954	85	3.7 – 22	≥85	Qabul qilingan (2020)
IEC 61980	81.38 – 90	3.7 – 50	≥80	Amalda joriy etilmoqda
ISO 19363	85	3.7 – 11	≥85	Xalqaro standart

² SAE International, IEC va ISO rasmiy hujjatlari asosida tuzilgan (2024).

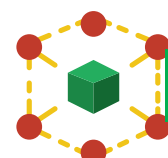


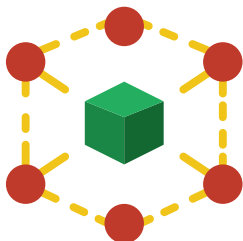


Standard	Chastota (kHz)	Quvvat (kW)	Samaradorlik (%)	Holati
WiTricity DRIVE 11	85	11	93	Tijorat mahsuloti

Dinamik simsiz zaryadlash (DWPT-Dynamic Wireless Power Transfer) texnologiyasi harakatdagi transport vositasini yo‘l osti rezonatorlari orqali to‘xtatmasdan zaryadlash imkonini beradi. Janubiy Koreyadagi KAIST universiteti ishlab chiqqan OLEV (On-Line Electric Vehicle) tizimi 60 kW quvvat bilan yo‘lda harakat qilayotgan avtobuslarga energiya uzatadi. 2020-yilda boshlab Gumi shahrida ushbu texnologiya asosida ishlaydigan ommaviy transport yo‘nalishlari muvaffaqiyatli ishlayapti. BloombergNEF prognoziga ko‘ra, 2030-yilga kelib EV uchun simsiz zaryadlash bozori 6 milliard dollardan oshadi. Tibbiy implantlar uchun simsiz energiya uzatish hayot-o‘lim masalasiga aylanishi mumkin: batareyani almashtirish uchun tana ochiladigan operatsiya infeksiya va travma xavfini oshiradi. Zamonaviy yurak kardiostimulatorlari, neyrostimulyatorlar va koklear implantlar induktiv yoki MCR-WPT texnologiyasidan keng foydalanadi. Medtronic kompaniyasining zamonaviy batareyasiz yurak ritmini moslashtiruvchi qurilmasi (leadless pacemaker) tananing tashqarisidan simsiz zaryadlanish imkoniyatiga ega. Boston Scientific kompaniyasi esa 2023-yilda teri ostiga o‘rnatiladigan neyrostimulyatorni sinab ko‘rdi, bunda teri orqali ultratovush yordamida energiya uzatish amalga oshirildi. Ultratovush WPT chuqur to‘qimalarga (10–20 sm) energiya uzatishda radiofrekvensli to‘lqinlardan samarali, chunki yuqori chastotali EM to‘lqinlari biologik to‘qimalarda kuchli so‘riladi.

Mikroto‘lqinli energiya uzatish (MPT) eng katta potensial quvvatga ega uzoq masofali WPT texnologiyasidir. Fizik asosi: energiya 2.45 GHz yoki 5.8 GHz chastotada yo‘naltirilgan mikroto‘lqin nuri sifatida uzatiladi, qabul qiluvchi tarafda esa rectenna matritsasi to‘lqin energiyasini to‘g‘ridantokka aylantiradi. Ushbu texnologiyani eng katta tatbiqi-kosmik quyosh elektr stansiyasi (Space Solar Power Station-SSPS) kontseptsiyasidir. Yaponiya JAXA agentligi 2015-yilda 1.8 kW quvvatni 55 m masofaga 83% samaradorlik bilan uzatuvchi MPT tizimini sinovdan o‘tkazdi. 2023-yilda esa Kaltex tadqiqotchilari 100 metr masofaga 1.6 W quvvat bilan kosmosda MPT sinovini amalga oshirishdi-bu kosmik WPT sohasidagi muhim qadam hisoblanadi. JAXA 2025–2035 yillar oralig‘ida 1 GW quvvatli orbit quyosh stansiyasini sinash rejasini tuzgan. Lazer WPT (Laser Power Beaming) esa yuqori yo‘naltirilgan nurning afzalliklaridan foydalanadi. Infraqizil lazer (800–1600 nm) yoki ko‘rinadigan yorug‘lik diodlari energiyani uzatadi, fotovoltaik panel esa ushbu nurni elektr energiyasiga aylantiradi. Lazer WPT tizimlar xavfsiz ishlash uchun avtomatik nur uzilish (beam safety) tizimlariga ega bo‘lishi majburiy. U turli mamlakatlarda pilotlanmagan havo apparatlari (UAV, dronlar) ni havoda zaryadlash uchun ishlatilmoqda.





3-jadval. Simsiz WPT tizimlarining qiyosiy texnik parametrlari³

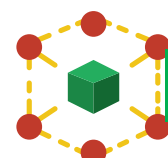
Parametr	Induktiv WPT	MCR-WPT	RF-WPT	MPT
Uzatish masofasi	< 20 cm	< 5 m	< 1 km	< 50 km
Chastota diapazoni	1–1000 kHz	1–100 MHz	300 MHz–3 GHz	2.45 / 5.8 GHz
O'tkazish samaradorligi	85–95%	70–90%	10–50%	30–70%
Nominal quvvat	1 W–20 kW	100 W–50 kW	μ W–10 W	kW–GW
Siljish bardoshliligi	Past (± 1 cm)	O'rta (± 30 cm)	Yuqori	Juda yuqori
Tijorat tayyorligi	Yuqori (keng)	Yuqori (EV)	O'rta (IoT)	Past (R&D)

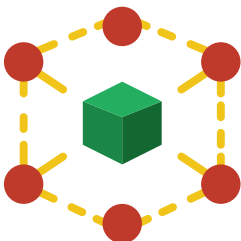
Jadval ma'lumotlaridan ko'rinib turibdiki, har bir WPT texnologiyasi o'zining muayyan tatbiq sohasiga mos keladi. Induktiv va MCR usullari yuqori samaradorligi bilan kWdan o'nlab kW gacha quvvat uzatishda ustundir va hozirda tijorat bozorida eng keng tarqalgan. Radiofrekvensli WPT past quvvatli (μ W – W) qurilmalarda uzoq masofaga energiya uzatish imkoniyati bilan IoT tizimlar uchun yagona maqbul yechimdir. Mikroto'lqinli va lazer tizimlari esa hali ko'proq ilmiy-tadqiqot bosqichida bo'lib, ulkan quvvat va uzoq masofali uzatishda kelajakda alohida o'rin egallashi kutilmoqda.

Adabiyotlar taxlili

Kurs va boshqlar tomonidan chop etilgan «Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances» maqolasi zamonaviy WPT ilmining asoschilik asari hisoblanadi. Science jurnalida e'lon qilingan bu ish 2 metr masofada 60 W energiya 40% samaradorlik bilan uzatilganini ko'rsatdi. O'sha paytdan boshlab ushbu asar 10 000 dan ortiq ilmiy ishlarda iqtibos keltirildi. Tesla va Sarmah (2018) «A Review of Wireless Power Transfer Technology» tadqiqotida induktiv va resonansli WPT

³ IEEE Transactions on Power Electronics (2023) va WiTricity texnik hujjatlari asosida.





texnologiyalarining sifat omili Q ning samaradorlikka ta'siri tahlil qilindi. Ular yuqori Q (>100) g'altaklar bilan MCR-WPT tizimlarida samaradorlik 90% dan oshishi mumkinligini nazariy va tajribaviy asoslab berdi.

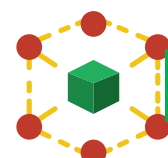
Hui, Zhong va Lee esa «A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer» nomli asarida o'rta masofali WPT tizimlarining o'tkazish samaradorligi, muvofiqlashtirish muammolari va biologik xavfsizlik masalalarini batafsil tahlil qildi. Mualliflar 10 MHz dan past chastotalarda inson tanasi uchun SAR (specific absorption rate) ko'rsatkichi ICNIRP xavfsizlik chegarasidan past ekanligini isbotladi. IEC va SAE xalqaro standartlashtirish tashkilotlari nashr etgan hujjatlar (2020–2024) EV simsiz zaryadlash tizimlarining xavfsizlik talablari va interoperabellik mezonlarini belgilaydi. SAE J2954 standarti ko'ra, 85 kHz chastotada ishlaydigan 11 kW tizimlarda elektromagnit emissiya CISPR 11 me'yorlaridan 6 dB past bo'lishi talab qilinadi. Rodenbeck va boshqlar «Microwave and Millimeter Wave Power Beaming» maqolasida 5.8 GHz da 500 W quvvat uzatuvchi prototipni 20 m masofada 70% samaradorlik bilan sinovdan o'tkazishdi. Bu natija MPT ning kelajakda amaliy tatbiqini yana bir qadam yaqinlashtirdi.

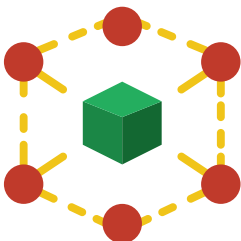
Xulosa

Simsiz energiya uzatish texnologiyasi, menimcha, keyingi o'n yillikning eng muhim muhandislik yutuqlaridan biriga aylanadi. Nikola Tesla bir asr oldin orzu qilgan narsa-simlar va kabellardan ozod bo'lgan dunyo-bugun asta-sekin haqiqatga aylanmoqda. Ayniqsa meni hayratlantiradigan narsa shuki, bu texnologiya bir vaqtning o'zida ham oddiy turmush qulayligini (smartfon zaryadlash), ham global energetika muammolarini (kosmik quyosh stansiyalari) hal qilish potensialiga ega. Boshqa ko'p texnologiyalardan farqli ravishda, WPT mikroduyo bilan makroduyo o'rtasidagi ko'priklardan biridir. O'zbekiston uchun esa bu texnologiyaning amaliy ahamiyati juda katta deb hisoblayman. Mamlakatimiz elektromobillar sohasiga qadamlar qo'ymoqda-aynan shu bosqichda simsiz zaryadlash infratuzilmasini loyihalashga kirishish kerak, chunki keyinchalik qayta qurishdan ko'ra boshidanoq to'g'ri qurish osonroq va arzonroq. Bundan tashqari, keng yoyilgan qishloq hududlaridagi IoT sensorlar va monitoring tizimlari uchun simsiz quvvatlash amaliy yechim bo'lishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J.D., Fisher, P., Soljacic, M. "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances." *Science*, 317(5834), 83–86, 2007.
2. Tesla, N. "System of Transmission of Electrical Energy." U.S. Patent 645,576, 1900.
3. Hui, S.Y.R., Zhong, W., Lee, C.K. "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer." *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(9), 4500–4511, 2014.





4. Tesla, T.F., Sarmah, P. "A Review of Wireless Power Transfer Technology." International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 6(3), 2018.
5. Rodenbeck, C.T., et al. "Microwave and Millimeter Wave Power Beaming." IEEE Journal of Microwaves, 1(1), 229–259, 2021.

Onlayn manbalar:

6. <https://www.wirelesspowerconsortium.com>
7. IEEE Wireless Power Transfer Conference (WoW) 2023. Proceedings. IEEE, 2023.

