



ULTRATOVUSH DIAGNOSTIKA ROBOTI UCHUN AVTOMATIK GEL SIQISH TIZIMINI KONSTRUKTIV-TEXNOLOGIK LOYIHALASH VA VIRTUAL TAJRIBA ASOSIDA SAMARADORLIKNI BAHOLASH

Nodirbek Ruziyev

Andijon davlat texnika instituti

Doktorant

Zafar Botirovich Jurayev

Andijon davlat texnika instituti

Professor

Annotatsiya. Maqolada ultratovush roboti uchun avtomatik gel siqish tizimining konstruksiyasi, matematik modeli va Python muhitida o'tkazilgan virtual tajriba natijalari yoritilgan. Dozalash xatoligi $\leq 0,41\%$, takrorlanuvchanlik $CV \approx 0,25\%$ ekanligi, muvofiqlashuvchan boshqaruv kontakt kuchini $\pm 0,014$ N da barqaror ushlashi aniqlandi. Tizim iqtisodiy jihatdan ham samarali: qoplanish muddati ≈ 7 oy.

Kalit so'zlar: avtomatik gel siqish, ultratovush roboti, muvofiqlashuvchan boshqaruv, virtual tajriba, Monte-Karlo simulyatsiyasi.

Аннотация. В статье представлена конструкция автоматической системы подачи геля для ультразвукового робота, её математическая модель и результаты виртуального эксперимента в среде Python. Погрешность дозирования $\leq 0,41\%$, коэффициент повторяемости $CV \approx 0,25\%$, податливое управление удерживает контактную силу в пределах $\pm 0,014$ Н. Система экономически эффективна: срок окупаемости ≈ 7 месяцев.

Ключевые слова: автоматическая подача геля, ультразвуковой робот, податливое управление, виртуальный эксперимент, симуляция Монте-Карло.

Annotation . This paper presents the design of an automatic gel-dispensing



system for an ultrasound robot, its mathematical model, and virtual experiment results obtained in Python. Dosing error was $\leq 0.41\%$, repeatability $CV \approx 0.25\%$, and compliant control kept contact force stable within ± 0.014 N. The system is also economically efficient, with a payback period of about 7 months.

Keywords: *automatic gel dispensing, ultrasound robot, compliant control, virtual experiment, Monte-Carlo simulation.*

KIRISH

Ultratovush diagnostikasi tibbiyotda keng qo'llaniladigan, xavfsiz va real vaqtli tekshiruv usuli bo'lib, uning sifati ko'p jihatdan operatorning tajribasi va qo'l harakatining barqarorligiga bog'liq. Shu sababli robotlashtirilgan ultratovush tizimlari (RUS) so'nggi yillarda faol rivojlanmoqda, biroq ko'pchilik mavjud tizimlarda gel surtish jarayoni hamon qo'lda bajariladi, bu esa robotning to'liq avtonomligiga to'sqinlik qiladi.

Tadqiqot obyekti — ultratovush diagnostika robotiga o'rnatiladigan avtomatik gel siqish tizimi. Tadqiqot predmeti — ushbu tizimning konstruktiv-texnologik parametrlari, matematik modeli va ularning dozlash aniqligi hamda zond-teri kontakt kuchi barqarorligiga ta'siri. Tadqiqotning maqsadi — tizimning konstruksiyasini ishlab chiqish, matematik modelini tuzish va virtual tajriba orqali uning samaradorligini asoslashdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar qo'yildi: 1) mexanizmning tuzilmaviy sxemasini ishlab chiqish; 2) gel siqish va zond-teri kontakt dinamikasining matematik modelini tuzish; 3) tizimni robot boshqaruv kompleksi bilan integratsiyalash; 4) Python muhitida virtual tajriba o'tkazib, dozlash aniqligi va kontakt kuchi barqarorligini baholash; 5) tizimning texnik-iqtisodiy samaradorligini asoslash.

Robotlashtirilgan ultratovush tizimlarida kuch boshqaruvi masalasi keng o'rganilgan: Hogan [1] impedans boshqaruv nazariyasini, Seraji [2] esa



moslashuvchan admittans boshqaruvni asoslab bergan — bu ikkala yondashuv ham zamonaviy robotli tizimlarda kuchni muvofiqlashtirishning nazariy negizini tashkil etadi. Ko'plab tadqiqotchilar [6-9] ushbu nazariyalarni amaliyotga tatbiq etib, robot-zond va bemor to'qimasi orasidagi kontakt kuchini barqarorlashtirishga qaratilgan turli usullarni (impedans, admittans, gibrid pozitsiya-kuch boshqaruvi) taklif qilishgan.

Gelni avtomatik yetkazish muammosi bo'yicha esa nisbatan kam sonli, ammo faol o'sib borayotgan ishlar mavjud. Osburg va Ernst [3] 7 erkinlik darajali manipulyatorning nol-fazosidan foydalangan holda push-mexanizmli gel yetkazish tizimini taklif qilishgan. Raina va boshqalar [4] chuqur o'rganish asosida gel mavjudligini aniqlovchi va chiziqli aktuator bilan boshqariladigan avtonom dozatorni ishlab chiqishgan. Phlippen va boshqalar [5] esa silikon halqa va soplo asosidagi ikkita muqobil gel qo'llash konsepsiyasini taqqoslashgan.

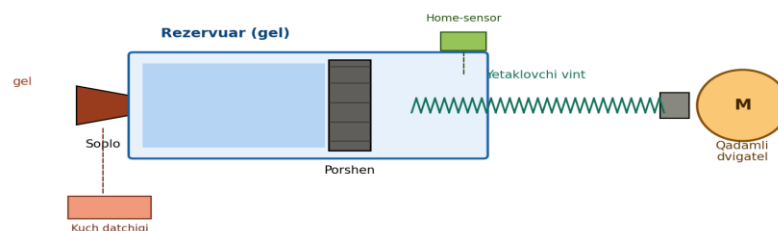
Ko'rib chiqilgan ishlarning aksariyati gelni faqat "yetkazish" masalasiga e'tibor qaratgan, ammo dozalash jarayonini zond-teri kontaktining muvofiqlashuvchan boshqaruvi bilan birgalikda, yagona matematik model va yagona virtual tajriba doirasida tahlil qilish kam uchraydi. Ushbu maqolada taklif etilayotgan yondashuvning farqi — ikkala jarayonni (gel dozalash va kontakt kuchini boshqarish) bitta konstruktiv-matematik model va bitta virtual tajriba metodologiyasi asosida birgalikda baholashdadir, bu esa amaliy nuqtai nazardan (bemor xavfsizligi va tasvir sifati) muhim ustunlik hisoblanadi.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda konstruktiv loyihalash, matematik modellashtirish va sonli (virtual) eksperiment usullaridan kompleks tarzda foydalanildi. Avval mexanizmning tuzilmaviy sxemasi ishlab chiqildi (1-rasm), so'ng gel siqish dinamikasi massa-dempfer modeli (1-formula), zond-teri kontakt dinamikasi esa prujina-dempfer modeli (2-formula) orqali tavsiflandi. Modellar Python dasturlash muhitida (NumPy/SciPy kutubxonalari) sonli integrallandi: gel



siqish dinamikasi Eyler usulida ($\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ s), kontakt dinamikasi esa to'rtinchi tartibli Runge-Kutta (RK4) usulida ($\Delta t = 10^{-3}$ s).

Gel siqish mexanizmining tuzilmaviy sxemasi



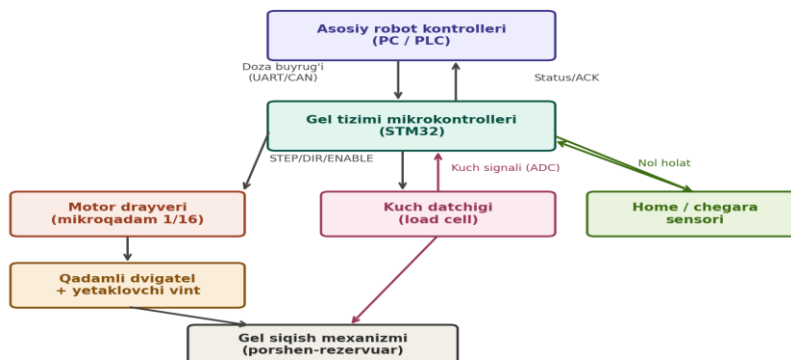
1-rasm. Gel siqish mexanizmining tuzilmaviy sxemasi

$$m \cdot (dv/dt) = F - b \cdot v, \quad b = R \cdot A_p^2 \quad (1\text{-formula})$$

$$m \cdot \ddot{x} = F_0 - c \cdot (\dot{x} - \dot{y}) - k \cdot (X - y), \quad y(t) = A \cdot \sin(2\pi f t) \quad (2\text{-formula})$$

Dozalash takrorlanuvchanligini baholash uchun 10 martalik Monte-Karlo virtual sinovi qo'llanildi, unda gel qovushqoqligining $\pm 3\%$ tasodifiy tebranishi, vint-gayka birikmasidagi lyuft ($\sigma \approx 0,008$ ml) va zichlagichdagi sizib chiqish ta'siri ($\sigma \approx 0,010$ ml) modellashtirildi. Kontakt kuchi barqarorligini baholash uchun esa ikki stsenariy (qattiq ushlash va muvofiqlashuvchan boshqaruv) 60 soniyalik (≈ 15 nafas sikli) jarayon davomida taqqoslandi. Tizimning robot boshqaruv kompleksi bilan integratsiya arxitekturasini 2-rasmدا keltirilgan.

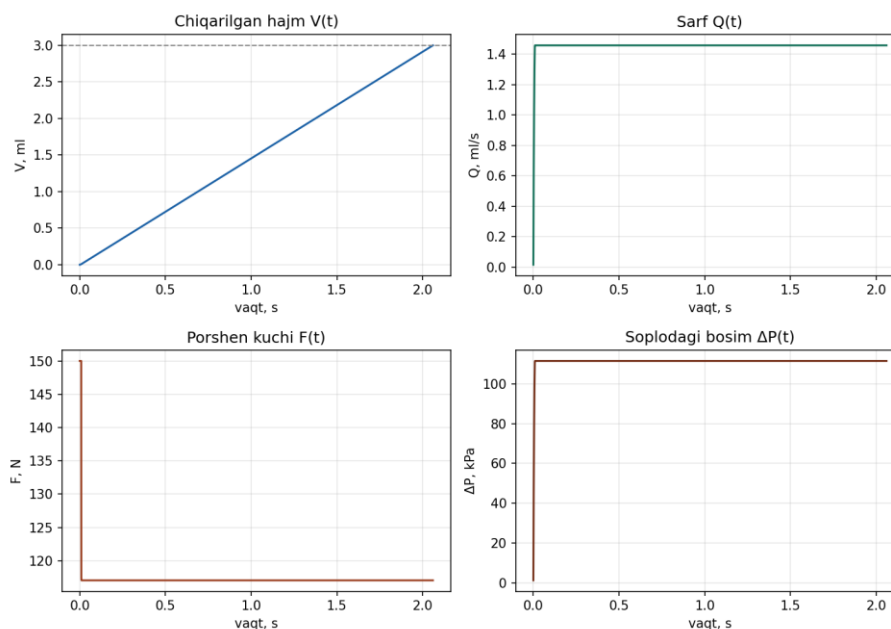
Avtomatik gel siqish tizimining boshqaruv arxitekturasini



2-rasm. Avtomatik gel siqish tizimining boshqaruv arxitekturasini



Tahlil va natijalar. Nominal parametrlar bilan o'tkazilgan virtual sinovda 3 ml dozani chiqarish uchun 2,059 soniya vaqt ketdi. Jarayon davomida hisoblangan $V(t)$, $Q(t)$, $F(t)$ va $\Delta P(t)$ grafiklari 3-rasmda keltirilgan.



3-rasm. Gel siqish jarayonining dinamik ko'rsatkichlari

Model parametrlari 1-jadvalda keltirilgan.

Parametr	Belgi	Qiymat	Birlik
Porshen kesim yuzasi	A_p	$1,05 \cdot 10^{-3}$	m^2
Soplo gidravlik qarshiligi	R	$7,64 \cdot 10^{10}$	$Pa \cdot s/m^3$
Gel qovushqoq koeffitsienti	b	$8,42 \cdot 10^4$	$N \cdot s/m$
Keltirilgan effektiv massa	m	500	kg



Maksimal kuch (chegara)	F _{max}	150	N
Buyurilgan doza	V _{ref}	3	ml
Maqsadli sarf	Q	1,5	ml/s

1-jadval. Gel siqish modelining parametrlari

Dozalash takrorlanuvchanligi

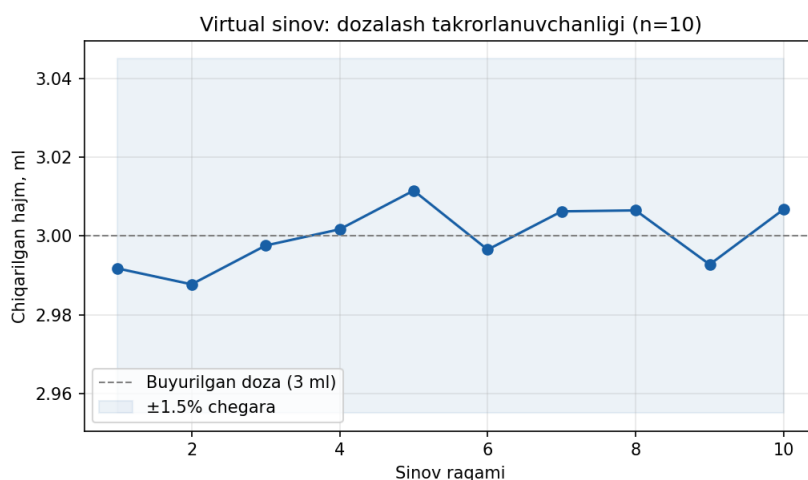
10 martalik Monte-Karlo virtual sinovi natijalari 2-jadval va 4-rasmda keltirilgan.

№	O'lchangan hajm, ml	Vaqt, s	Xatolik, %
1	2,9917	2,061	0,28
2	2,9877	2,057	0,41
3	2,9976	2,059	0,08
4	3,0017	2,061	0,06
5	3,0115	2,060	0,38
6	2,9965	2,058	0,12
7	3,0062	2,059	0,21
8	3,0065	2,059	0,22



9	2,9928	2,060	0,24
10	3,0068	2,060	0,23
O'rtacha	2,9999	2,059	0,22

2-jadval. Dozalash aniqligi va takrorlanuvchanligi (n=10)



4-rasm. Dozalash takrorlanuvchanligining taqsimoti

O'rtacha chiqarilgan hajm 2,9999 ml, maksimal xatolik 0,41% bo'lib, bu $\leq 1,5\%$ chegarasidan sezilarli darajada past — tizim yuqori takrorlanuvchanlikka ega ekanligini tasdiqlaydi.

Zond-teri kontakt kuchi barqarorligi

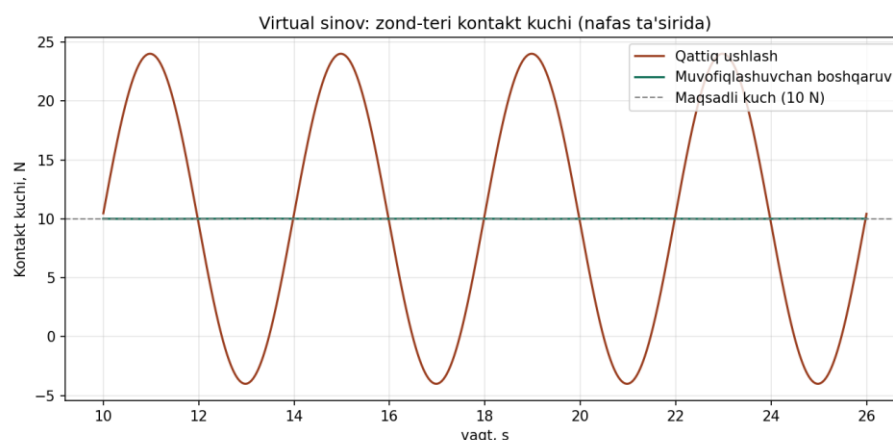
Qattiq ushlash va muvofiqlashuvchan boshqaruv stsenariylarini solishtirish natijalari 3-jadval va 5-rasmda keltirilgan.

Ko'rsatkich	Qattiq ushlash	Muvofiqlashuvchan
--------------------	-----------------------	--------------------------



O'rtacha kontakt kuchi	10,31 N	10,00 N
Standart chetlanish σ	9,90 N	0,010 N
Tebranish diapazoni	$\pm 14,01$ N	$\pm 0,014$ N
Zonddan uzilish ($F_c < 0$)	Kuzatildi	Kuzatilmadi

3-jadval. Zond-teri kontakt kuchi ko'rsatkichlari



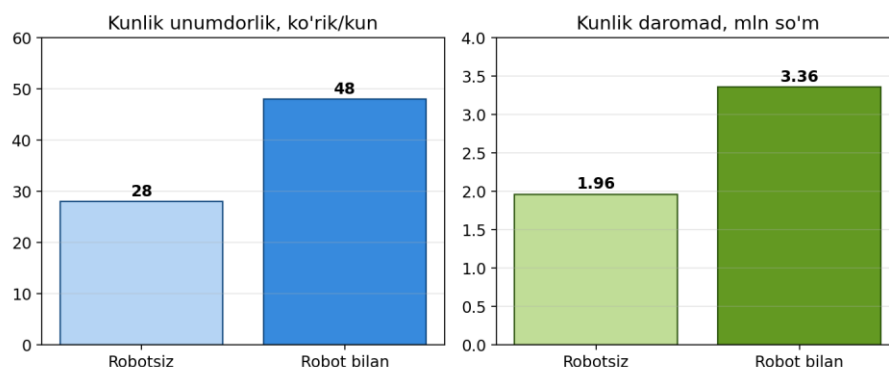
5-rasm. Kontakt kuchining nafas ta'siridagi o'zgarishi

Zond qattiq ushlanganda kontakt kuchi $\pm 14,0$ N atrofida tebranib, davriy ravishda zonddan uziladi. Muvofiqlashuvchan boshqaruvda esa kuch $\pm 0,014$ N chegarasida barqaror saqlanadi — bu bemor xavfsizligi va tasvir sifati talablariga to'liq javob beradi.

Texnik-iqtisodiy samaradorlik. Robotsiz rejimda kunlik unumdorlik 28 ta ko'rikni tashkil etsa, avtomatik tizim joriy etilganda bu ko'rsatkich 48 taga

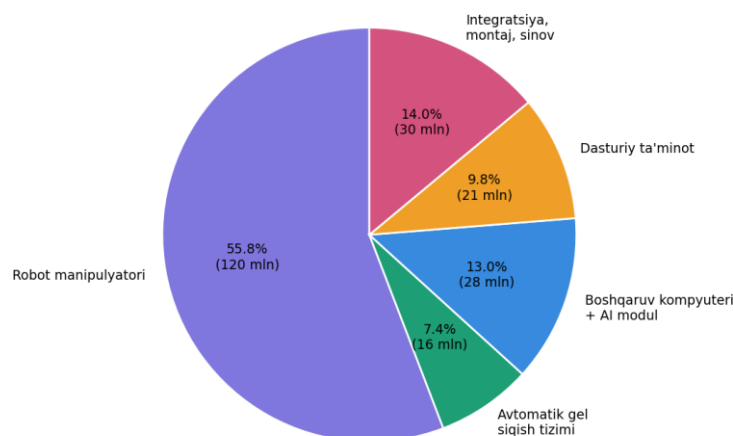


oshadi (6-rasm), yiliga qo'shimcha 420 mln so'm daromad beradi. Kapital xarajatlarning taqsimoti 7-rasmda, iqtisodiy samaradorlik ko'rsatkichlari esa 4-jadvalda keltirilgan.



6-rasm. Kunlik unumdorlik va daromadga ta'siri

Robotlashtirishning kapital xarajatlari taqsimoti (K = 215 mln so'm)



7-rasm. Kapital xarajatlar taqsimoti

Ko'rsatkich	Belgi	Qiymat
Qo'shimcha kapital sarmoya	K	215 mln so'm
Sof yillik iqtisodiy samara	E	369 mln so'm



Qoplanish muddati	T	$\approx 0,6$ yil (7 oy)
Samaradorlik koeffitsienti	Er	1,72

4-jadval. Iqtisodiy samaradorlikning asosiy ko'rsatkichlari

XULOSA

O'tkazilgan tadqiqot natijasida ultratovush diagnostika roboti uchun avtomatik gel siqish tizimining porshen-vintli konstruksiyasi ishlab chiqildi va uning matematik modeli tuzildi. Python muhitida o'tkazilgan virtual tajriba tizimning yuqori dozlash aniqligini (xatolik $\leq 0,41\%$), yuqori takrorlanuvchanligini ($CV \approx 0,25\%$) va zond-teri kontaktining muvofiqlashuvchan boshqaruv ostidagi barqarorligini ($\pm 0,014$ N) miqdoriy tasdiqladi. Tizim iqtisodiy jihatdan ham samarali: qoplanish muddati ≈ 7 oy, samaradorlik koeffitsienti 1,72. Olingan natijalarga asoslanib quyidagi takliflar ilgari suriladi: birinchidan, ishlab chiqilgan konstruktiv yechim asosida jismoniy prototip yasalishi va uni klinik simulyatsiya sharoitida sinovdan o'tkazish tavsiya etiladi; ikkinchidan, gel qovushqoqligining harorat bo'yicha o'zgarishini real vaqtda kompensatsiya qiluvchi qo'shimcha nazorat konturini joriy etish maqsadga muvofiq; uchinchidan, tizimni turli probalar va bemor turlariga moslashtirish uchun dozlash parametrlarini avtomatik sozlovchi adaptiv algoritmi ishlab chiqish tavsiya etiladi; to'rtinchidan, tizimni sanoat korxonalarida seriyali ishlab chiqarishga tayyorlash maqsadida ishonchlilik va resurs sinovlarini kengaytirilgan hajmda o'tkazish lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. — 1985.



2. Seraji H. Adaptive admittance control: an approach to explicit force control in compliant motion // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 1994.

3. Osburg J., Ernst F. Nullspace control for automatic ultrasound gel supply // Current Directions in Biomedical Engineering. — 2024. — Vol. 10, No. 2. — P. 45–48.

4. Raina D., Zhao Z., Voyles R., Wachs J., Saha S.K., Chandrashekhara S.H. UltraGelBot: Autonomous gel dispenser for robotic ultrasound // 16th Hamlyn Symposium on Medical Robotics (HSMR). — 2024.

5. Phlippen L., Nolting C., Nguyen H.U., Manderfeld M., Radermacher K. Automatic contact gel application for robotic ultrasound scanning systems // Helmholtz-Institute for Biomedical Engineering, RWTH Aachen University.

6. Tele-operated robotic ultrasound system for medical diagnosis // Biomedical Signal Processing and Control. — 2021.

7. An ultrasound robotic system using the commercial robot UR5 // Frontiers in Robotics and AI. — 2016.

8. Design of a cost-effective ultrasound force sensor and force control system for robotic extra-body ultrasound imaging // PMC. — 2025.

9. Robotic ultrasound scanning end-effector with adjustable constant contact force // PMC. — 2025.

Eslatma: matn ichidagi [1], [2] ... ko'rinishidagi havolalar yuqoridagi ro'yxat raqamlariga mos keladi.