

НАСОС ТИЗИМЛАРИНИНГ ЭНЕРГИЯ САМАРАДОР ИШ РЕЖИМЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

Шавазов А.А., Д. А. Ишанова

ЎзР ФА Энергетика муаммолари институти

Аннотация: Насос станциясида электр энергияси сарфи ускунанинг техник тавсифлари билан бирга сувга бўлган талаб ва танланган иш режимига ҳам боғлиқ. Мақолада насос тизимларини математик моделлаштириш ҳамда уларнинг энергия самарадор режимларини оптималлаштириш усуллари таҳлил қилинган. Физик, имитацион, эмпирик ва маълумотларга асосланган моделларнинг вазифалари ёритилган; математик дастурлаш, генетик ва заррачалар тўдаси алгоритмлари, машинали ўқитиш ҳамда моделга асосланган прогнозли бошқарув имкониятлари кўриб чиқилган. Ушбу воситаларни рақамли эгизак таркибида бирлаштириш учун ўлчов маълумотлари, модель ва бошқарув ўртасидаги боғланишлар таклиф этилган. Иш обзор ва концептуал таҳлил хусусиятига эга бўлиб, унда муайян насос станцияси учун тажрибада тасдиқланган энергия тежамкорлиги натижалари келтирилмайди.

Калит сўзлар: насос тизими, математик модель, энергия самарадорлиги, солиштирма энергия сарфи, оптималлаштириш, частотавий ростлаш, генетик алгоритм, машинали ўқитиш, рақамли эгизак.

1 Кириш

Шаҳар ва саноат сув таъминоти, оқова сувларни чиқариш ҳамда суғориш тизимларида насос агрегатлари ўзгарувчан юкламада ишлайди. Сув истеъмоли камайган вақтда насоснинг аввалги режимда ишлаши ортиқча напор ҳосил қилиши мумкин. Оқимни дросселлаш орқали чеклашда эса напорнинг бир қисми маҳаллий гидравлик қаршиликни енгишга сарфланади. Шу сабабли энергия тежаш масаласини фақат насос ёки электр двигателни

алмаштириш билан чеклаб бўлмайди: агрегатнинг иш нуқтасини тармоқ эҳтиёжига мослаштириш ҳам зарур.

Иш режимини танлашда насос тавсифи, қувур тармоғининг қаршилиги, сувга бўлган талаб ва электр юритманинг фойдали иш коэффициенти биргаликда ҳисобга олинади. Математик модель мазкур боғланишларни ифодалайди, оптималлаштириш алгоритми эса берилган чекловлар доирасида мақбул бошқарувни излайди. Насос тизимларига бағишланган обзорларда анъанавий математик дастурлаш билан бир қаторда интеллектуал усуллар ҳам кўриб чиқилган [1, 2].

Ишнинг мақсади насос тизимларини моделлаштириш ва оптималлаштириш усуллариининг қўлланиш соҳаларини таққослаш ҳамда уларни рақамли эгизак асосидаги бошқарув тизимига бирлаштириш йўллариини белгилашдан иборат.

2 Насос тизимларини математик моделлаштириш

Насос тизимининг модели гидравлик жараёнлар, насос агрегати ва электр юритма ўртасидаги ўзаро таъсирни акс эттириши керак. Тизимнинг чиқиш кўрсаткичлари умумий кўринишда қуйидагича ифодаланади:

$$y = f(x, u, p). \quad (1)$$

Бу ерда x — тизим ҳолатини ифодаловчи ўзгарувчилар; u — бошқарув таъсирлари; p — модель параметрлари; y — чиқиш кўрсаткичлари. Ушбу ифода умумлаштирилган боғланиш бўлиб, динамик жараёнларни ҳисоблашда тегишли ҳолат тенгламалари билан тўлдирилади.

Насос агрегатининг асосий кўрсаткичлари сув сарфи Q , напор H , айланиш частотаси n , қувват P ва фойдали иш коэффициенти η ҳисобланади. Бир хил насоснинг ўхшаш иш нуқталари учун айланиш частотаси ўзгаришининг таъсири ўхшашлик қонунлари орқали тахминан баҳоланади:

$$Q_2 / Q_1 \approx n_2 / n_1; \quad (2)$$

$$H_2 / H_1 \approx (n_2 / n_1)^2; \quad (3)$$

$$P_2 / P_1 \approx (n_2 / n_1)^3. \quad (4)$$

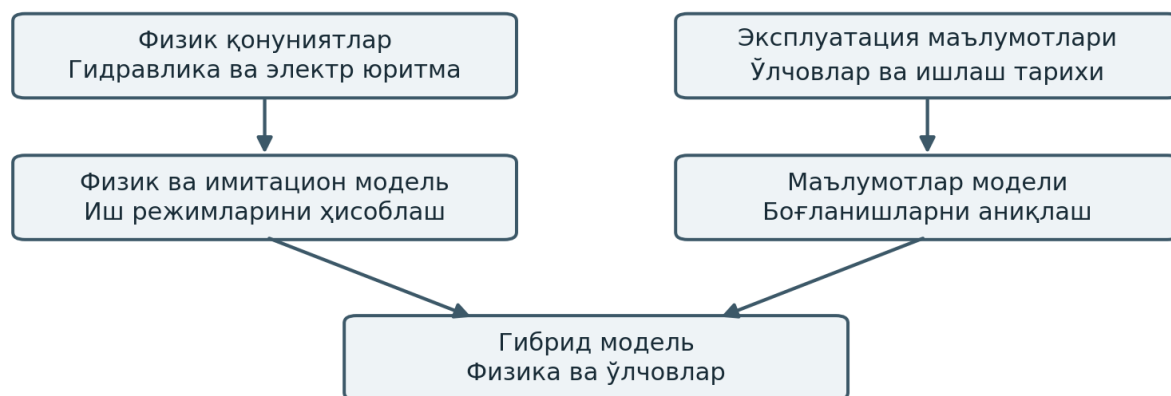
Бу муносабатларда P насос валидаги қувватни англатади. Уларни қўллашда насос геометрияси ва суюқлик хусусиятлари ўзгармаслиги, фойдали иш коэффициенти эса яқин қийматларда қолиши назарда тутилади. Электр тармоғидан истеъмол қилинадиган қувватни баҳолашда двигатель ва частота ўзгартиргичдаги йўқотишлар ҳам ҳисобга олинади. Статик напори сезиларли бўлган тармоқда амалдаги иш нуқтаси насос ва тармоқ тавсифларининг кесишиши билан аниқланади; шунинг учун электр энергияси тежалишини фақат кубик боғланиш орқали белгилаш етарли эмас.

Турли иш режимларини таққослаш учун солиштирма энергия сарфидан фойдаланиш қулай:

$$e = E / V. \quad (5)$$

Бу ерда e — солиштирма электр энергияси сарфи, кВт·соат/м³; E — ҳисоб даврида истеъмол қилинган электр энергияси, кВт·соат; V — шу даврда узатилган сув ҳажми, м³. Ушбу кўрсаткични таққослашда талаб этилган напор ва сув етказиб бериш шартлари ҳам инобатга олиниши лозим.

Физик моделлар гидравлика, механика ва электротехника қонунларига таянади. Имитацион моделлаштириш улар ёрдамида турли иш сценарийларини ҳисоблаш имконини беради. Эмпирик ва маълумотларга асосланган моделлар эса эксплуатация маълумотларидан аниқланган боғланишлардан фойдаланади. Бундай боғланишлар регрессия, нейрон тармоқ ёки бошқа машинали ўқитиш усуллари билан қурилиши мумкин. Гибрид ёндашувда физик модель ўлчов натижалари асосида аниқлаштирилади [5, 6].



1-расм. Насос тизимининг гибрид моделини шакллантириш манбалари

1-расмда моделларнинг ўзаро тўлдирувчи вазифалари кўрсатилган. Уларни мажбурий кетма-кет босқичлар сифатида қараш тўғри эмас: физик модель ҳам, маълумотларга асосланган модель ҳам алоҳида қўлланиши мумкин. Рақамли эгизакни шакллантиришда эса танланган модель реал объект маълумотлари билан мунтазам янгиланиб бориши керак.

3 Энергия самарадор режимларни оптималлаштириш усуллари

Насос тизими учун оптималлаштириш масаласи умумий ҳолда мақсад функциясининг энг кичик қийматини топишга келтирилади:

$$\min J(x, u), \quad (6)$$

$$g_i(x, u) \leq 0; \quad h_j(x, u) = 0. \quad (7)$$

Бу ерда J — мақсад функцияси; g_i ва h_j — тенгсизлик ҳамда тенглик кўринишидаги чекловлар. Мақсад сифатида электр энергияси сарфи, унинг қиймати ёки бир нечта мезоннинг вазнли йиғиндиси танланиши мумкин. Сув сарфи ва напорга қўйилган талаблар, айланиш частотасининг рухсат этилган оралиғи, резервуарлардаги сув сатҳи ҳамда ускунанинг ишлаш чекловлари ечимнинг амалий жиҳатдан мақбуллигини белгилайди.

3.1 Математик дастурлаш усуллари

Чизиқли дастурлаш (LP), ночизиқли дастурлаш (NLP), аралаш бутун сонли чизиқли ва ночизиқли дастурлаш (MILP ва MINLP), шунингдек, динамик дастурлаш насосларнинг иш жадвалини тузишда қўлланади.

Масалан, агрегатни ёкиш ёки ўчириш дискрет ўзгарувчи билан, айланиш частотаси эса узлуксиз ўзгарувчи билан ифодаланади. Ушбу усуллар чекловларни масала таркибида аниқ ёзиш имконини беради. Бироқ тармоқ катталаниши ва нозизиқли боғланишлар кўпайиши ҳисоблаш ҳажмини оширади; натижанинг оптималлиги танланган модель ва ечиш усулига боғлиқ [2].

3.2 Эволюцион ва метаэвристик усуллар

Генетик алгоритмда (GA) ечимлар тўплами шакллантирилиб, саралаш, чапиштириш ва мутация амаллари орқали янгиланади. Насос станцияси учун ечим насосларнинг ишлаш жадвали, агрегатлар комбинацияси ёки частота топшириқларидан тузилиши мумкин. Бундай алгоритм мураккаб мақсад функциялари билан ишлашга мос, аммо унинг самараси ечимни кодлаш, чекловларни ҳисобга олиш ва параметрларни танлашга боғлиқ [3].

Заррачалар тўдаси усулида (PSO) ҳар бир зарра эҳтимолий ечимни ифодалайди ва қидирув давомида ўзининг ҳамда тўданинг энг яхши натижаларига таяниб ҳаракатланади. Шунингдек, чумолилар колонияси усули (ACO), дифференциал эволюция (DE), имитацион тоблаш (SA), кулранг бўри алгоритми (GWO), гармоник қидирув ва гибрид алгоритмлардан фойдаланилади [4, 7]. Метаэвристик усуллар учун глобал оптимумни топиш умумий ҳолда кафолатланмайди. Шу боис натижани баҳолашда чекловларнинг бажарилиши, ҳисоблаш вақти ва такрорий ишга туширишларда ечимнинг барқарорлиги текширилади.

3.3 Машинали ўқитиш ва прогнозли бошқарув

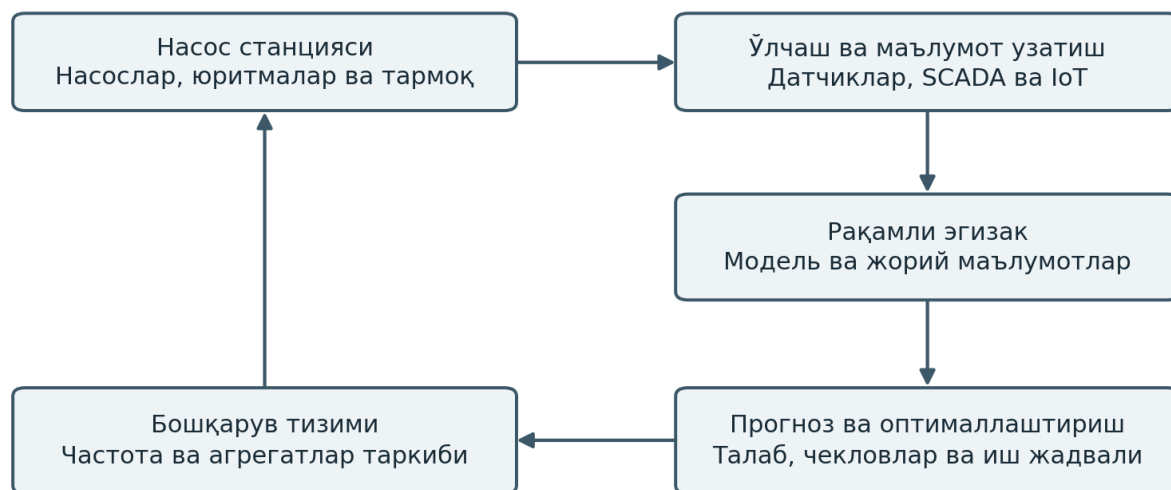
Сунъий нейрон тармоқлар, регрессия моделлари, тасодифий ўрмон (Random Forest), таянч векторлар усули (SVM) ва чуқур ўқитиш сув истеъмолини прогнозлаш ёки ускуна ҳолатини баҳолашда қўлланиши мумкин. Мустаҳкамлаш орқали ўқитишда (reinforcement learning) бошқарув сиёсати мукофот функцияси асосида шакллантирилади. Уни реал объектга татбиқ этишдан олдин хавфсизлик чекловлари ва турли режимлардаги хатти-ҳаракатлари текширилиши зарур.

Моделга асосланган прогнозли бошқарув (MPC) эса келгуси вақт оралиғи учун режимни ҳисоблаб, топилган бошқарувнинг дастлабки қадамини амалга оширади. Кейин янги ўлчовлар асосида масала қайта ечилади. Машинали ўқитиш бу тизимда талаб прогнозини ёки модель параметрларини аниқлаштириши мумкин; оптималлаштириш блоки эса технологик чекловларга мос бошқарувни танлайди.

4 Рақамли эгизак асосида моделлаштириш

Рақамли эгизак (Digital Twin) — реал объектнинг маълумотлар билан янгиланиб боровчи рақамли ифодасидир. Насос тизимида у гидравлик ва энергетик моделларни ўлчовлар, ускунанинг ишлаш тарихи ва ҳисоблаш модуллари билан боғлайди. Шу асосда жорий ҳолатни баҳолаш, кейинги режимни прогнозлаш ва бошқарув вариантларини текшириш мумкин [5, 6, 8].

Маълумот алмашинувининг тузилиши 2-расмда келтирилган. Датчиклардан олинган маълумотлар SCADA ёки IoT воситалари орқали йиғилади, текширилади ва модель параметрларини янгилаш учун ишлатилади. Прогноз ва оптималлаштириш натижаси бошқарув тизимида частота топшириғи ёки насослар комбинацияси кўринишида берилади.



2-расм. Энергия самарадор насос тизими рақамли эгизагининг концептуал архитектураси

Таклиф этилаётган архитектурада ахборот икки йўналишда ҳаракатланади: объектдан моделга ўлчовлар узатилади, моделдан бошқарув

тизимига эса ҳисобланган топшириқ берилади. Бу ёпиқ контурни амалга ошириш учун ўлчовларнинг ишончлилиги, маълумотларнинг вақт бўйича мувофиқлиги ва бошқарув буйруқларини текшириш тартиби белгиланиши лозим. Рақамли эгизакнинг мавжудлиги ўз-ўзидан энергия тежалишини таъминламайди; натижа модель аниқлиги ва танланган режимнинг объектга мослиги билан белгиланади.

5 Рақамли воситаларнинг вазифаларини таққослаш

1-жадвалда асосий рақамли воситаларнинг вазифалари таққосланган. Жадвалдаги имкониятлар муайян дастурий маҳсулотнинг тайёр функцияларини эмас, тегишли ёндашувнинг тизимда бажариши мумкин бўлган вазифасини ифодалайди.

1-жадвал. Насос тизимини таҳлил қилиш ва бошқариш воситалари

Восита	Асосий вазифа	Реал вақт маълумотлари	Бошқарувдаги ўрни
Математик модель	Физик боғланишларни ҳисоблаш	Шарт эмас	Режимни ҳисоблаш учун асос
Имитацион модель	Иш сценарийларини текшириш	Шарт эмас	Бошқарувни олдиндан синаш
SCADA	Кузатиш ва диспетчерлик бошқаруви	Одатда мавжуд	Буйруқларни қабул қилиш ва узатиш
IoT	Ўлчовларни йиғиш ва узатиш	Қурилма ва алоқага боғлиқ	Маълумот билан таъминлаш
Машинали ўқитиш	Прогноз ва ҳолатни баҳолаш	Шарт эмас	Прогноз ёки бошқарув сиёсати
GA ва PSO	Мақбул ечимни излаш	Шарт эмас	Режим ва иш жадвалини танлаш
MPC	Прогноз асосида оптималлаштириш	Ҳар бир ҳисоб қадамида	Чекловлар доирасида бошқариш

Восита	Асосий вазифа	Реал вақт маълумотлари	Бошқарувдаги ўрни
Рақамли эгизак	Модель ва объект маълумотларини боғлаш	Мунтазам янгиладиди	Интеграцияга қараб тавсия ёки бошқарув

Кўриниб турибдики, бу воситалар бир-бирини тўлиқ алмаштирамайди. SCADA ва IoT маълумот алмашинувини таъминлайди, математик модель режимларни ҳисоблайди, GA ёки PSO ечим излайди. MPC ушбу ҳисобларни такрорий бошқарув жараёнига боғлайди. Рақамли эгизакда эса мазкур вазифалар объектнинг жорий ҳолатига мос ҳолда бирлаштирилади.

6 Энергия самарадор бошқарувни ташкил этиш

Насос станцияси учун таклиф этилаётган бошқарув жараёни сув сарфи, напор, электр қуввати ва айланиш частотасини ўлчашдан бошланади. Техник ҳолатни баҳолаш вазифаси қўйилганда босим ва ҳарорат каби қўшимча кўрсаткичлар ҳам қайд этилади. Маълумотлар текширилгандан сўнг модель калибрланади ва станциянинг жорий ҳолати баҳоланади.

Кейинги босқичда сувга бўлган талаб прогноз қилиниб, белгиланган вақт оралиғи учун насослар таркиби ва частота топшириқлари ҳисобланади. Топилган ечим сув етказиб бериш талаблари ва ускуна чекловларига мослиги бўйича текширилади. Рухсат этилган топшириқ автоматлаштирилган бошқарув тизими орқали электр юритмага узатилади. Янги ўлчовлар олинган, ҳисоблаш цикли такрорланади (3-расм).



3-расм. Насос станцияси режимини ҳисоблаш ва бошқаришнинг ёпиқ контури

Ушбу ёндашувни баҳолашда модель ҳисоблари ўлчанган Q , H ва P қийматлари билан таққосланиши керак. Энергетик натижа эса бир хил сув етказиб бериш талабларида базавий ва таклиф этилган режимларнинг электр энергияси сарфи орқали аниқланади. Сув истеъмоли, напор ёки ҳисоб даври ўзгарган бўлса, уларнинг таъсирини энергия тежалишидан ажратиш лозим. Мазкур ишда объектга оид тажриба маълумотлари берилмагани учун тежалиш фоизи ва иқтисодий самара ҳисобланмаган.

7 Хулоса

Насос тизимининг энергия самарадор иш режимини танлаш гидравлик тармоқ, насос ва электр юритмани ягона ҳисоблаш объекти сифатида қарашни талаб этади. Физик ва имитацион моделлар жараёнларнинг асосий боғланишларини очиб беради, эксплуатация маълумотлари эса ушбу моделларнинг реал шароитга мослигини аниқлаштиришга хизмат қилади.

Оптималлаштириш усули масаланинг тузилишига қараб танланади. Математик дастурлаш чекловларни формал ифодалаш учун қулай; метаэвристик алгоритмлар мураккаб ечимлар фазосида қидирувни ташкил этади. Машинали ўқитиш талаб ва ҳолат прогнозини тайёрлашда, МРС эса прогноз асосида режимни мунтазам қайта ҳисоблашда қўлланиши мумкин.

билан боғлаш имконини беради. Кейинги тадқиқотларда гидравлик модель, частотавий ростланувчи электр юритма тавсифлари ва сув истеъмоли прогнозини бирлаштирган гибрид модель ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ. Унинг амалий самараси аниқ насос станциясида ўлчовлар ва базавий режим билан таққослаш орқали тасдиқланиши лозим.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Wang et al. Application of intelligent methods in energy efficiency enhancement of pump system: A review. *Energy Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 11592–11606. DOI: 10.1016/j.egy.2022.09.016.
2. Brás M., Moura A., Andrade-Campos A. Cost efficiency in water supply systems: An applied review on optimization models for the pump scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2025, Vol. 323, Issue 1. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.07.039.
3. Mambretti S., Orsi E. Optimizing Pump Operations in Water Supply Networks Through Genetic Algorithms. *Journal AWWA*, 2016, Vol. 108, Issue 2, pp. E119–E125. DOI: 10.5942/jawwa.2016.108.0025.
4. Ying K.-C., Pourhejazy P., Huang K.-L. Tracing the evolution of Particle Swarm Optimization in scheduling: A systematic review using main path analysis. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2026, Vol. 100, 102239. DOI: 10.1016/j.swevo.2025.102239.
5. Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review. *Water*, 2025, 17, 2957. DOI: 10.3390/w17202957.
6. Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review. *Engineering*, 2024, Vol. 36, pp. 21–35. DOI: 10.1016/j.eng.2024.04.012.
7. Bouach et al. Management of a Water Pumping Schedule by an HGMA Optimization Algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2023. DOI: 10.1007/s40996-023-01201-y.
8. Zhou S.-W., Guo S.-S., Xu W.-X., et al. Digital Twin-Based Pump Station Dynamic Scheduling for Energy-Saving Optimization in Water Supply System.

- Water Resources Management, 2024, Vol. 38. DOI: 10.1007/s11269-024-03791-2.
9. Liu Y., Cheng L., Liu K., et al. Digital twin optimization of water supply pump stations considering energy use, water hammer, and lifespan. Scientific Reports, 2026. DOI: 10.1038/s41598-026-57786-7.
10. Nikou N.S.R., Gill L., Ghaani M.R. Digital twins in wastewater treatment: A review of multiscale applications for process optimization, resource recovery, and policy compliance. Journal of Water Process Engineering, 2026, Vol. 90, 110352. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.110352.
11. Engineering-Practice-Oriented Digital Twins for Smart Water Management: Framework, Enabling Technologies, and Future Directions. Water Research, 2026, 126762. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126762.
12. Analysis of Digital Twin Applications in Energy Efficiency: A Systematic Review. Sustainability, 2025, 17(8), 3560. DOI: 10.3390/su17083560.