

ISSN 2010-7242

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR
VAZIRLIGI

**INFORMATIKA VA ENERGETIKA
MUAMMOLARI**
O'zbekiston jurnali

Узбекский журнал
**ПРОБЛЕМЫ
ИНФОРМАТИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

Uzbek Journal
**OF THE PROBLEMS OF
INFORMATICS AND ENERGETICS**

1

2025

FAN VA TEXNOLOGIYA

О‘ЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI FANLAR АКАДЕМИЯСИ
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
О‘ЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR
VAZIRLIGI
МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН

ИНФОРМАТИКА
VA ENERGETIKA
MUAMMOLARI

1·2025

ПРОБЛЕМЫ
ИНФОРМАТИКИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

*Журнал под таким названием издается с января 1992 г.
по 6 номеров в год*

Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi

ТАШКЕНТ– 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ш.Х. ФАЗЫЛОВ (*главный редактор*)
Х.М. МУРАТОВ (*зам. главного редактора*)
Б.М. АЗИМОВ (*ответственный секретарь*)
О.З. ТОИРОВ (*ответственный секретарь*)
Ф.Т. АДЫЛОВА
С.Ф. АМИРОВ
Р.А. ЗАХИДОВ
Х.З. ИГАМБЕРДИЕВ
М.А. ИСМАИЛОВ
О.Х. ИШНАЗАРОВ
А.В. КАБУЛОВ
М.М. КАМИЛОВ
А.Р. КАРПЕНКО
Н.М. МИРЗАЕВ
М.М. МУСАЕВ
В.Н. ОПАНАСЕНКО
С.А. САДУЛЛАЕВ
В.В. СТАРОВОЙТОВ
Л.Ф. СУЛЮКОВА
Г.Н. УЗАКОВ
С.С. ХАЛИКОВ
Р.Х. ХАМДАМОВ
А.А. ШАВАЗОВ

Адрес редакции:

100173, г.Ташкент, ул.Фозилтепа, 22б
Телефоны +998 90 927 72 13, +998 90 965 43 28
e-mail: informatika-energetika@mail.ru

*Редактор: Ш. Кушербоева
Технический редактор: А. Муйдинов
Компьютерная верстка: Ш. Миркосимова*

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006 г.
Регистрационный №0046. Изд. лиц. А1 №149, 14.08.09. Изд. №3-75. Сдано в набор 25.08.2025 Подписано в печать.
21.10.2025 Формат 60×84 1/8.
Гарнитура литературная. Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл-печ. л. . 12.11. Уч. - изд. л.8.28. Тираж 150. Заказ № ...
Цена договорная.

Издательство «Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi»: 100173, г.Ташкент, ул.Фозилтепа, 22б.
Отпечатано в типографии Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и
искусственного интеллекта при Министерстве цифровых технологий
Республики Узбекистан: 100125, Тошкент ш., Буз-2 мавзеси, 17А уй.

«Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi»

ТАШКЕНТ – 2025

УЎК 519.71(575.1)

Д.Т. МУХАМЕДИЕВА

ИНТЕЛЛЕКТУАЛ ТРАНСПОРТ ТИЗИМИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

Прогнозли транспорт моделининг асосий вазифаси транспорт оқимларини моделлаштириш ёки транспорт тармоғининг юкланишини моделлаштиришдир. Йўл ҳаракати иштирокчилари томонидан амалга ошириладиган барча турдаги ҳаракатлардан транспорт оқимлари шаклланади. Умуман олганда, транспорт оқими тушунчасини индивидуал транспорт оқимлари, йўловчилар оқими, пиёдалар оқими, юк оқимлари ва ҳатто ахборот оқимлари деб тушуниш мумкин. Транспортни моделлаштириш методологияси транспорт тизимини транспорт талаби ва транспорт таклифи баланси нуктаи назаридан ифодалашга асосланади. Транспорт тизимини аниқ шаклда моделлаштириш босқичлари муайян ҳудудга нисбатан батафсил шаклда транспорт талаби ва транспорт таклифи моделларини қуришни ўз ичига олади.

Калит сўзлар: транспорт, интеллектуал, эволюцион алгоритм, арилар колонияси алгоритми, модел.

Д.Т. Мухамедиева

Разработка интеллектуальной транспортной системы

Показано, что основной задачей прогнозной транспортной модели является моделирование транспортных потоков или загрузки транспортной сети. Отмечено, что транспортные потоки формируются из всех видов действий, совершаемых участниками дорожного движения. Установлено, что в общем случае под транспортным потоком можно понимать отдельные транспортные потоки, пассажиропотоки, пешеходные потоки, грузовые потоки и даже информационные потоки. Обосновано, что методология транспортного моделирования основана на выражении транспортной системы в терминах спроса на транспорт и баланса предложения на транспорте. Выявлено, что этапы моделирования транспортной системы в конкретном виде включают в себя построение моделей транспортного спроса и транспортного предложения в детализированном виде для конкретной местности.

Ключевые слова: транспорт, интеллектуальный, эволюционный алгоритм, алгоритм пчелиной колонии, модель.

D.T. Mukhamedieva

Development of an intelligent transport system

The main task of a predictive transport model is to model traffic flows or simulate the load of a transport network. Traffic flows are formed from all types of actions performed by road users. In general, traffic flow can be understood as individual traffic flows, passenger flows, pedestrian flows, freight flows, and even information flows. The transport modeling methodology is based on expressing the transport system in terms of transport demand and transport supply balance. The stages of modeling the transport system in a specific form include building models of transport demand and transport supply in a detailed form for a specific area.

Keywords: transport, intelligent, evolutionary algorithm, bee colony algorithm, model.

Кириш. Оптималлаштириш масалаларини жумладан, комбинаторли оптималлаштириш масалаларини ечишда кўпгина ҳолларда катта ҳажмли ҳисоблаш жараёнлари, ресурслар ва ҳисоблаш вақти талаб қилиниши мумкин. Бундай ҳолларда интуитив тарзда масала ечимини баҳолаш билан ҳар доим ҳам самарали натижаларга эришиб бўлмайди [1,2]. Ушбу масалани ечишда параллел ҳисоблаш технологиясидан фойдаланиб глобал ечимга яқин ечимга эришиш мумкин.

Кўйилган масалани ечиш учун параллел ҳисоблаш технологияларидан фойдаланиш асосида самарали натижаларга эришиш мумкин. Бунда бир нечта процессорлар ҳисоблаш жараёнида иштирок этиши мумкин. Аниқ бир оптималлаштириш масаласи учун бош процессорда нейрон тўрли тизим яратилади ва у қолган процессорларга параллел тарзда жўнатилади. Барча процессорларда олинган натижалар яна қайтадан бош процессорда тўпланади ва улар орасидан энг оптимал қийматга эга бўлгани ечим сифатида танланади. Кўриниб турибдики, процессорлар сони қанча кўп бўлса оптимал ечимга эришиш эҳтимоллиги юқори бўлиши мумкин. Аммо процессорлар сонини асосиз ортириб бориш ҳар доим ҳам самарали қарор ҳисобланавермайди [3].

Бугунги кунда параллел ҳисоблаш технологияларидан фойдаланиш учун бир қатор дастурлар ва библиотекабар ишлаб чиқилган. Ушбу воситаларда нарх/самарадорлик муносабатлари оптимал даражада йўлга қўйилган. Ишлаб чиқилган алгоритм асосида дастурий восита ишлаб чиқилган ва унда МРЖ кутубхонасидан фойдаланиш кўзда тутилган.

Ишлаб чиқилган алгоритмлар асосида бир қатор ҳисоблаш тажрибалари ўтказилди. Олинган натижалар таҳлили шуни кўрсатдики, таклиф этилаётган сунъий нейрон тўрли алгоритмларимиз натижалари Хопфилд нейрон тўри асосида қурилган алгоритмлари натижаларига нисбатан ишлаш тезлиги ва кам ҳисоблаш ресурсларини талаб қилиш хусусиятлари бўйича самаралироқ экан. Аммо, шуни таъкидлаш жоизки, масаланинг ҳажми жуда катта бўлган ҳолларда нейрон тўрли алгоритмлар самараси кўп ҳисоблашлар эвазига пасайиши мумкин. Одатда бундай ҳолларда кўп агентли эвристик алгоритмлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир.

Ечиш усуллари. Бугунги кунда фан ва техникада табиий тизимлар хусусиятларига асосланган алгоритмлар кенг доирада қўлланилмоқда. Булар сирасига генетик алгоритмлар, эволюцион алгоритмлар, сунъий нейрон тўрлар, арилар колонияси алгоритми, чумоли алгоритми ва шу каби бошқа алгоритмларни кўшишимиз мумкин [4-10].

Классик маълумотларни интеллектуал таҳлил қилиш назариясига кўра аниқ бир масала учун тизим қуриш деганда ушбу масала учун шундай интеллектуал тизим қуриш талаб этиладики, қурилаётган тизим масалани ечиш учун бевосита зарур бўлган барча ресурсларга эга бўлсин. Кўп агентли тизимлар назариясида ушбу ҳолатга қарама-қарши тамойил амал қилади. Бундай тизимларда бир агент ҳеч қачон глобал ечимни бера олмайди, шунинг учун бир нечта агентлар тўплами ташкил қилинади ва улар орасида самарали муносабат, боғланиш ўрнатилади. Демакки, ихтиёрий масаланинг ечими кўп агентли тизимдаги бир қатор оддий агентларнинг ўзаро ҳамкорликдаги “хизматлари” самараси сифатида олинади. Кўпгина олимлар, жумладан, Р.Брукс, Ж.Денебург, Л.Стиле ва бошқалар ушбу йўналишда қуйидаги ҳолатларга таянганлар [11]:

–кўп агентли тизим – бу оддий ва бир-бирига узвий боғлиқ бўлган агентлар жамоасидир;

–ҳар бир агент локал соҳада ўзининг мустақил ечимларини аниқлайди ва бошқа агентлар билан натижаларни алмашинади;

–агентлар ўртасидаги алоқалар горизонтал тарзда ташкил этилади, яъни бошқа агентларга таъсир кўрсатиши мумкин бўлган етакчи-агент мавжуд бўлмайди;

–агентнинг глобал хусусиятини аниқловчи аниқ бир қоида мавжуд эмас.

Бугунги кунда амалиётда жамоавий, кўп агентли тизимлар хусусиятларига асосланган алгоритмлар кенг қўлланилмоқда ва самарали натижалар бериб келмоқда. Бундай алгоритмлар сирасига чумоли алгоритмлари, арилар колонияси алгоритмлари ва бошқаларни олишимиз мумкин.

Ҳаётнинг турли соҳаларида кўплаб оптималлаштириш масалаларини ечишга дуч келиш мумкин. Аксарият ҳолларда бирор–бир қидирув соҳаси доирасида ўзгарувчиларнинг ўрнини алмаштириш, аниқ бир метрика ёки қоидалар тўплами киритиш асосида оптимал ечимга эришиш ҳолларини кузатиш мумкин. Яна шундай бир оптимал ечимни қидириш усули борки, унда ечим чекли тўпламлардан олинган уникал компоненталар комбинациясидан танланади. Бунда асосий мақсад компоненталарнинг оптимал комбинациясини қидиришдан иборатдир. Одатда бундай оптималлаштириш масалалари комбинаторли оптимизация масалалари деб аталади.

Комбинаторли оптималлаштириш – бу амалий математикадаги оптималлаш назариясининг бир қисми ҳисобланади. У амалларни тадқиқ қилиш, алгоритмлар назарияси ва мураккаб ҳисоблашлар назариялари билан узвий боғлиқдир. Комбинаторли оптималлаштириш масаласининг асосий вазифаси чекли сондаги объектлар тўплами орасидан оптимал объектни қидиришдан иборатдир.

Комбинаторли оптималлаштириш масалалари XVIII асрнинг иккинчи ярмидан бошлаб тадқиқ этила бошланган. Комбинаторли оптималлаштириш масалалари сифатида интеллектуал транспорт тизими масаласини, графлар қуриш масаласини, транспорт масаласи каби масалаларни олишимиз мумкин. Одатда бундай масалаларни аниқ ёки тахминий ечимини топиш учун мураккаб алгоритм ишлаб чиқишга тўғри келади.

Шундай мураккабликка эга бўлган масалани ечишда эвристик усуллардан бири бўлган, кўп агентли алгоритмлар сирасига кирувчи – арилар колонияси алгоритмидан фойдаланиш жараёнини кўриб ўтамиз. Ушбу масаласини арилар колонияси алгоритми ёрдамида ечишда глобал оптимум ечимни олиш жараёнини тезлаштириш мақсадида параллел дастурлаш технологиясидан фойдаланилди.

Интеллектуал транспорт тизими масаласи мураккаб, қийин ечилувчи комбинаторли оптималлаштириш масалаларидан бири ҳисобланади. Умумий ҳолда интеллектуал транспорт тизими масаласи (traveling salesman problem, TSP) [12] қуйидагича таснифланиши мумкин: аниқ бир ҳудудда бир нечта (n та) тугунлар ва уларни боғлаб турувчи йўллар берилган. Шу йўллар орқали барча тугунга бориш кетма-кетлиги шундай ташкил этилсинки, босиб ўтилган йўл бошқа вариантдаги кетма-кетликда босиб ўтилган йўлларга нисбатан энг қисқа масофани ташкил этсин. Бутун йўналиш мобайнида ҳар бир тугунга фақат ва фақат бир марта кириш мумкин. Йўналиш якуни албатта дастлабки тугунга қайтиш билан тугалланиши керак.

Интеллектуал транспорт тизими масаласини ечишни арилар колонияси алгоритми асосида ечиш масаласини кўриб ўтамиз. Таъкидлаш жоизки, ушбу алгоритм оптимал ечимга эришиш жараёнини сезиларли даражада тезлаштиради. Масалани ечиш натижасида борилиши керак бўлган тугунларнинг кетма-кетлигини тузиш талаб этилади, шунингдек, якуний функция эса улар орасидаги масофа, йўлларнинг умумий йиғиндисини ифодаласин.

Одатда арилар колониясида (масалан: *Apis mellifera* маҳаллий асалари) арилар ўз ҳаёти мобайнида турли вазифаларни бажарадилар [13]. Хусусий ҳолда бир ари инида 5000 тадан 20000 тагача ари бўлиши мумкин. Қоидага кўра катта ёшли арилар (20 кунликдан 40 кунлик ёшга эга бўлган) асосий ишчи, захира ғамловчи (фуражирлар – foragers) арилар ҳисобланади. Ушбу ишчи арилар вақти-вақти билан қуйидаги уч вазифадан бирини бажарадилар: фаол ишчилар, кузатувчи ишчилар ва фаол бўлмаган ишчилар. Арилар инидаги умумий ариларнинг фаол, кузатувчи ва фаол бўлмаган ариларнинг миқдори тахминан 75% фаол, 10% фаол бўлмаган ва 15% кузатувчи арилар каби тарзда тақсимланади.

Маълумки арилар колониясида арилар уч гуруҳга бўлинади: фаол арилар, кузатувчи арилар ва фаол бўлмаган арилар. Дастлаб кузатувчи арилар атрофни кузатган ҳолда яқин атрофда жойлашган нектарлар ва уларнинг сифати ҳақидаги маълумотларни фаол ариларга етказишади. Фаол ишчи арилар нектар тўплаш учун манбагача учиб борадилар, ён – атрофдаги нектарларни ўрганадилар, нектар тўплайдилар ва уяга қайтадилар. Кузатувчилар уя атрофидаги (50 квадрат миль гача ёки 80 км квадратгача бўлган ҳудудни) янги нектарлар манбаини қидириш билан шуғулланадилар.

Исталган вақтда бир қанча ишчи арилар фаол бўлмаслиги мумкин. Улар ин кириши атрофида кутиб турадилар. Сифатли нектар олдида келаётган фаол ёки кузатувчи арилар шу кутиб турган фаол бўлмаган арилар олдида махсус рақсга (waggledance) тушадилар. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, арилар шу махсус рақси ёрдамида нектар манбаи ва унинг сифати ҳақида фаол бўлмаган арилар билан маълумот алмашинар экан. Фаол бўлмаган арилар шу рақс асосида нектар ҳақида маълумотларни олади ва фаол бўлмаганлик ҳолатини фаоллик ҳолати билан алмаштириши мумкин. Ўз навбатида, бир нечта фаол ишчи арилар фаол бўлмаган арилар билан ўрин алмашиши мумкин. Махсус рақснинг давомийлигини D_i қуйидаги формула асосида ифодалаш мумкин [14]:

$$D_i = d_i A,$$

бу ерда, A – масштаблаштириш коэффициентини; d_i – рақс тушаётган; i – агент томонидан топилган нектарнинг нисбий фойдалилиги, сифати ва миқдорини кўрсатувчи катталиқ.

Умумий ҳолда интеллектуал транспорт тизими масаласида i – агент томонидан топилган нектарнинг абсолют фойдалилик миқдорини, коэффициентини қуйидаги $PA_i = \frac{1}{F_i}$ ифода орқали ҳисоблаш мумкин, бу ерда,

F_i – i – агент йўлидаги мақсад функцияси.

Арилар инидаги барча ариларнинг абсолют фойдалилик миқдорини билган ҳолда умумий колониянинг ўртача фойдалилик коэффициентини PA_{col} ҳисоблаб топиш мумкин:

$$PA_{col} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n PA_j,$$

Бунда, n – айна вақтда рақс тушаётган арилар сони.

Рақс тушаётган арилар сони бир нечта бўлиб, улардан ихтиёрий бири бераётган маълумот асосида бошқа ишчи арилар навбатдаги янги йўналишини танлайдилар. i – агент томонидан берилаётган маълумотни бошқа ишчи арилар танлаш эҳтимоллигини қуйидагича формула асосида ифодалаш мумкин [5 – 19]:

$$P_i = \begin{cases} 0.6, & \text{агар } PA_i < 0.9 \cdot PA_{col}; \\ 0.2, & \text{агар } 0.9 \cdot PA_{col} \leq PA_i < 0.95 \cdot PA_{col}; \\ 0.02, & \text{агар } 0.95 \cdot PA_{col} \leq PA_i < 1.15 \cdot PA_{col}; \\ 0, & \text{агар } 1.15 \cdot PA_{col} \leq PA_i. \end{cases}$$

Керакли нектар танлаб бўлингач, ишчи ари шу нектар томонга учишни бошлайди. Бунда, нектарга олиб борувчи йўл бир нечта узелларни ўз ичига олади. i – узелда турган фаол арини j – узелни танлаш эҳтимоллиги куйидаги формула асосида ҳисобланади [14]:

$$P_{ij} = \frac{\rho_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{j \in J^k} \rho_{ij}^{\alpha} d_{ij}^{-\beta}}, \quad (1)$$

бу ерда, ρ_{ij} – i ва j узеллар орасидаги йўлнинг баҳоси, нархи; d_{ij} – i ва j узеллар орасидаги йўлнинг эвристик масофаси; $\alpha, \beta \in [0;1]$ – экспериментал танланувчи коэффициентлар; J^k – i узелдан ўтилиши мумкин бўлган барча узеллар тўплами.

(1) формуладаги ρ_{ij} параметр қийматини куйидаги формула асосида ҳисоблаб топиш мумкин:

$$\rho_{ij} = \frac{1 - m\alpha}{k - m},$$

бу ерда, k – i узелдан ўтилиши мумкин бўлган барча узеллар сони; m – йўлнинг афзаллик, қулайлик коэффициенти бўлиб, унинг қиймати 0 ёки 1 бўлиши мумкин. Дастлабки итерацияда барча йўллар учун $m=0$ бўлади.

Умуман, фаол ишчи арилар аниқ бир нектар манбаидан токи нектар тамом бўлгунига қадар нектар ташийди. Шундан сўнг ушбу ари фаол бўлмаган арига айланади.

Арилар колониясидаги арилар ҳаракати хусусиятлари асосида интеллектуал транспорт тизими масаласини ечиш учун “Арилар колонияси” алгоритми ишлаб чиқилди. Ушбу алгоритмни куйидаги кетма-кетликлар асосида ифодалаш мумкин.

1-қadam. Инициализациялаш. totalNumberBees – арилар сони, numberInactive – фаол бўлмаган арилар сони, numberScout – кузатувчи арилар сони, maxNumberVisits – ҳар бир тугунга киришлар сони, maxNumberCycles – такрорланишлар сони.

2-қadam. Кузатувчи арилар томонидан дастлабки яқин атрофдаги нектарларни қидириб топиш. Бунда яқин атрофдаги тугунларнинг координаталари аниқланади ва топилган натижалар BS матрицага сақланади.

3-қadam. Waggle dance – кузатувчи ариларнинг рақси. Бунда аниқланган тугунлар орасидан энг оптималлари (ёки энг яқин масофадагилари) BS матрицадан WG матрицага ўтказилади.

Waggle dance давомийлиги $D_i = d_i A$ формула асосида ҳисобланади. Бу ерда, A – масштаблаштириш коэффициенти; d_i – рақс тушаётган i – кузатувчи ари томонидан топилган нектарнинг нисбий фойдалилиги, сифати ва микдорини кўрсатувчи катталиқ.

Ушбу масалада i –кузатувчи ари томонидан топилган тугуннинг абсолют фойдалилик микдори коэффициенти $PA_i = \frac{1}{F_i}$ ифода орқали ҳисобланади, бу ерда, F_i – i – ари йўлидаги мақсад функцияси.

Арилар индаги барча рақс тушаётган ариларнинг абсолют фойдалилик миқдорини билган ҳолда умумий колониянинг ўртача фойдалилик коэффициенти PA_{col} ҳисобланади:

$$PA_{col} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n PA_j,$$

бунда, n – айна вақтда рақс тушаётган арилар сони.

4-қadam. i – кузатувчи ари бераётган маълумотни бошқа ишчи арилар томонидан танланиш эҳтимоллигини қуйидаги формула асосида ҳисоблаш мумкин:

$$P_i = \begin{cases} 0.6, & \text{агар } PA_i < 0.9 \cdot PA_{col}; \\ 0.2, & \text{агар } 0.9 \cdot PA_{col} \leq PA_i < 0.95 \cdot PA_{col}; \\ 0.02, & \text{агар } 0.95 \cdot PA_{col} \leq PA_i < 1.15 \cdot PA_{col}; \\ 0, & \text{агар } 1.15 \cdot PA_{col} \leq PA_i. \end{cases}$$

Керакли тугун танлаб бўлингач, ишчи ари шу тугун томонга учини бошлайди. Бунда, тугунга олиб борувчи йўл бир нечта тугунлардан ўтишни тақозо этади. i – тугунда турган фаол арини j – тугунга ўтиш йўлини танлаш эҳтимоллиги (1) формула асосида ҳисобланади.

Кузатувчи арилардан олинган WG матрица асосида ишчи арилар нектарни ташийди ва шу нектар атрофидаги янги нектарлар (параметрлар қийматлари) қидириб топади. Топилган маълумотлар NW матрицага киритилади.

5-қadam. Кузатувчи арилар WG маълумотлари асосида нектарларни ташийди ва энг оптимал қийматларни берувчи натижани аниқлаб best ўзгарувчига ўзлаштириш. Олинган натижалар NB матрицага сақланади.

6-қadam. Мавжуд NW, NB, WG матрицалар асосида янги WG ечимлар архивини шакллантириш.

7-қadam. АГАР аниқлик E қийматгача етса ёки ўрнатилган maxNumberCycles қадамлар сони бажарилса, у ҳолда WG дан энг яхши, оптимал йўл аниқлаб олинади ва олинган натижа асосида тугунлар кетма-кетлиги босмага чиқарилади,

АКС ҲОЛДА эса алгоритм 2-қadamдан бошлаб яна такрорланади.

Бу ерда BS – кузатувчи ариларнинг тасодифий матрицаси, WG – ечимлар матрицаси, best – энг оптимал ечимлар матрицаси, NW – ечимлар матрицаси асосида ишчи арилар томонидан шакллантирилувчи янги ечимлар матрицаси, NB – кузатувчи арилар томонидан шакллантирилувчи ва best ечимлар асосида шакллантирилувчи ечимлар матрицаси.

Интеллектуал транспорт тизими масаласини арилар колонияси алгоритми асосида ечишда бошланғич A тугун арилар ини ҳисобланади ва қолган тугунлар нектар ёки озуқалар манбаи ҳисобланади. Ушбу алгоритмда ҳар бир нектаргача бўлган энг қисқа йўллар кетма-кет ҳисоблаб борилади ва индан охириги топилган нектаргача бўлган энг қисқа масофа йиғиндиси топилади. Ушбу итерацион жараён токи мавжуд бўлган барча тугунлар, нектарлар манбалари кўриб чиқилмагунча давом этади. Ушбу шарт интеллектуал транспорт тизими масаласидаги гамилтон циклини топиш масаласи билан тенг кучли ҳисобланади.

Арилар колонияси алгоритми ёрдамида интеллектуал транспорт тизими масаласини параллел алгоритм асосида ечишни таклиф этиш мумкин. Амалий жиҳатдан олганда баъзи ҳолларда параллел ҳисоблаш технологиялари асосида ечилган масалалар натижаларнинг самарадорлиги пастроқ бўлиши мумкин. Жуда катта масалаларни бир нечта мустақил параллел қисмларга ажратган ҳолда уларни

ҳисоблашни турли процессорларга юклаш масалани ечиш учун сарф бўладиган вақтни камайтириш имконини беради.

Олинган натижалар. Арилар колонияси алгоритми ёрдамида комбинаторли оптималлаштириш масаласини ечишни параллел ҳисоблаш технологиялари асосида ечиш, катта ҳажмли оптималлаштириш масалаларини ушбу алгоритм ёрдамида ечиш етарлича тез ва самарали натижа беришини кўрсатди.

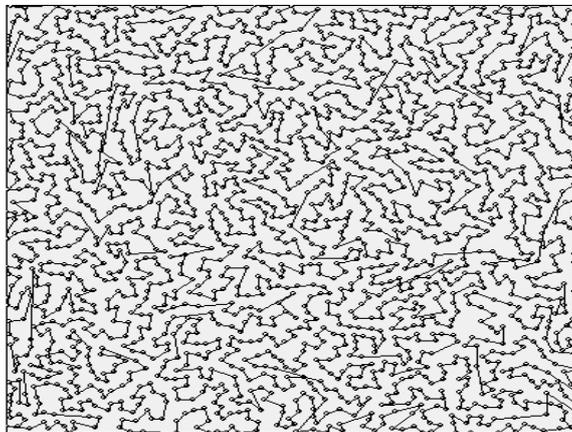
Юқорида кўриб ўтилган масалада тугунлар сонининг ортиши оптимал ечимга эришиш жараёнини мураккаблаштириши мумкинлигини кўриб ўтдик. Бундай ҳолларда Хопфилд тўридан фойдаланиш етарлича самарали натижаларни бермаслиги, яъни ҳисоблаш учун жуда катта вақт ва ресурс талаб қилиши мумкин. Бундай ҳолларда кўп агентли эвристик алгоритмлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлиши мумкин.

Комбинаторли оптималлаштириш масаласини тугунлар сони жуда катта бўлган ҳолати учун арилар колонияси алгоритмидан фойдаланган мақсадга мувофиқ бўлиши мумкин.

Глобал оптимум қийматга эришиш жараёнини тезлаштириш мақсадида аниқ бир оптималлаштириш масаласи, интеллектуал транспорт тизими масаласини ечиш алгоритмини бир вақтнинг ўзида N та процессорга юклаймиз. Ушбу процессорлар бир-биридан мустақил равишда ўз оптимал (локал) ечимларини оладилар. Олинган барча натижалар бош процессорда тўплангани ва улар орасидан энг кичик (\min) қийматга эга бўлган тугунлар кетма-кетлигини оптимал ечим сифатида танлаймиз. Бунда процессорлар сонининг ортиши оптимал ечимни топилиш эҳтимolini ошириши билан бир қаторда, ҳисоблаш вақтини ошишига ҳам олиб келади.

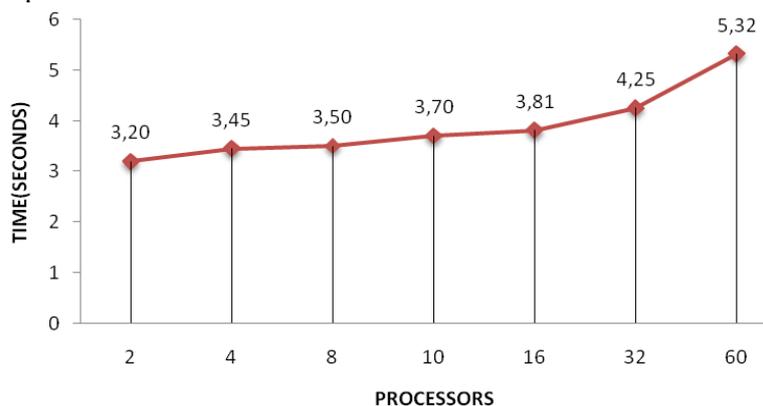
Арилар колонияси алгоритми асосида ҳисоблаш экспериментларини 1000 та тугун (координаталар $X, Y \in [1, 2000]$) ўртасидаги энг қисқа йўлни аниқлаш масаласида олиб борамиз. Бунда тахминан 2000 та вариантдаги йўналишлар бўлиб, барча вариантларни кўриб чиқиш ҳолати жуда катта ҳисоблаш вақти ва ресурс талаб қилади. Айтиб ўтганимиздек, ушбу ҳолатда Хопфилд нейрон тўри самара бермайди (1-расм).

Кузатув таҳлиллар натижалари шуни кўрсатдики, ушбу масалани ечишда процессорлар сони ортиб борган сари қидирилаётган ечим яхшиланиб борди. Аммо процессорлар сони 32 та бўлганида ечимдаги минимум қиймат бир оз ортиб бориши кузатилди. Процессорлар (жараёнлар) сони 60 та бўлганда ишлаш вақти 5.32 секунд – максимум қийматга эришганлигига қарамай, бу ҳолатда оптимал йўналишнинг минимал қиймати энг кичик – 49581.42 га тенг бўлган самарали натижага эришди.

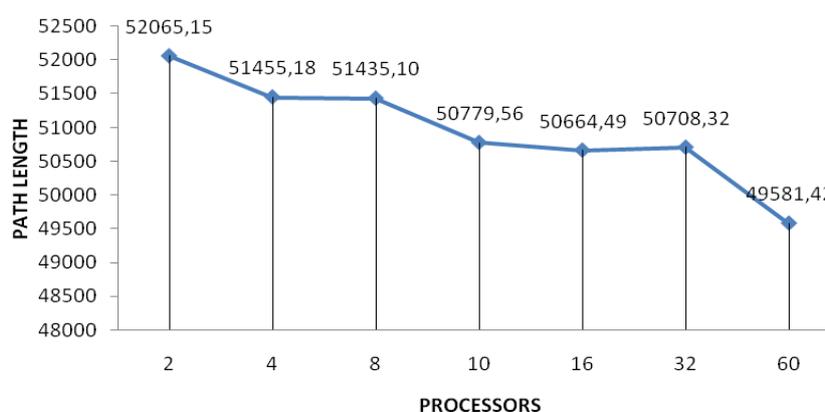


1-расм. Интеллектуал транспорт тизими масалаларини ечиш.

Куйида ҳисоблаш эксперименти натижалари график кўринишида (2,3-расмлар) келтирилган.



2-расм. Процессорлар сонини ҳисоблаш вақтига боғлиқлик динамикаси.



3-расм. Процессорлар сонини оптимал қийматларни топишга боғлиқлик графиги.

Хулоса. Транспорт моделларини ишлаб чиқишда транспорт тармоғининг асосий тугунларида йўналишларнинг тўлиқ миқёсли тадқиқотлари ўтказилди. Кузатишларнинг бир қисми автотransпорт воситаларини рўйхатга олиш детекторлари ёрдамида автоматик режимда олинган. Кузатишларнинг қолган қисмини тўплаш учун бир неча вақт оралиғида маълум тармоқ тугунларини (графикнинг чўққилари) видео суратга олиш амалга оширилди. Шундан сўнг, видеолар қўлда қайта ишланди, натижалар “маршрутни кузатиш модели” бўйича олинган. Сўров учун тармоқнинг энг инфор­мацион тугунлари танланган. Аниқ чизиқли мақсад функцияни максималлаштириш ёки камай­тиришдир. Аммо кўп амалий ҳолатларда, қарор қабул қилувчининг мақсади ва/ёки чеклаш функцияларини аниқ белгилаш имкони бўлмаслиги мумкин, балки уларни “ноаниқ маънода” кўрсатиши мумкин. Бундай ҳолларда, моделлаштиришнинг ноаниқ чизиқли дастурлаш туридан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир. Бу ноаниқ чизиқли дастурлаш муаммосининг турли моделларини ўрганишга мўлжалланган ва бўлимлардан, яъни ноаниқ муҳитда қарор қабул қилиш ва ноаниқ чизиқли дастурлаш, ноаниқ тенгсизликлар ва аниқ мақсадли функцияли чизиқли дастурлаш муаммоларидан иборат.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Якимов М.Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. – М.: Логос, 2013, 188 с.

2. Фальфушинский В.В. Параллельная обработка данных в многокомпонентных системах наблюдений // Кибернетика и системный анализ. Международный научно-теоретический журнал. –Украина. № 2. 2002.
3. Quinn M.J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. – New York: NY: McGraw-Hill, 2004.
4. Курейчик В.М., Кажаров А.А. О некоторых модификациях муравьиного алгоритма// Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 4 (81). С. 7 – 12.
5. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы //Математика в приложениях. 2004. №4(4). С. 70 – 75.
6. МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов. – М.: Техносфера, 2004, 368 с.
7. Курейчик В.В., Полупанова Е.Е. Эволюционная оптимизация на основе алгоритма колонии пчёл // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №12 (101). С. 41 – 46.
8. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
9. Гришин А.А., Карпенко А.П. Исследование эффективности метода пчелиного роя в задаче глобальной оптимизации // Наука и образование. 2010. № 08.
10. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of IEEE International conference on Neural Networks. 1995. P. 1942 – 1948.
11. Ротштейн А. П. Нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2009. № 3. С. 51 – 55.
12. Костевич Л. С. Математическое программирование: Информ. технологии оптимальных решений: Учеб. пособие. – Минск.: Новое знание, 2003. С. 150.
13. James McCaffrey. Use Bee Colony Algorithms to Solve Impossible Problems // MSDN Magazine: сайт. 2011. Режим доступа: <http://msdn.microsoft.com/en-us/magazine/gg983491.aspx>.
14. Субботин С.А., Олейник А.А. Мультиагентная оптимизация на основе метода пчелиной колонии // Межд. научно-теорет. журнал «Кибернетика и системный анализ». – Киев, 2009. №2. С. 15 – 25.
15. Nakrani S., Tovey C. On honey bees and dynamic allocation in an internet server colony // Adaptive Behavior. 2004. №12. P. 223 – 240.
16. Muhamedieva D.T., Mirzaraxmedova A.H, Hasanov U. Multi-Agent system for assessing the status of weakly formalized systems // International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020, 2020, 9351510. 4-6 november.DOI: 10.1109/ICISCT50599.
17. Muhamediyeva D., Sotvoldiyev D., Mirzaraxmedova S., Fozilova M. Approaches to handwriting recognition // International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020, 2020, 9351505. 4-6 november.DOI: 10.1109/ICISCT50599.2020.
18. Farmonov Sh.R., Bekmuratov T.F., Muhamedieva D.T. About the dodges plans of the continuous selective control // International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020, 2020, 9351415. 4-6 november.DOI: 10.1109/ICISCT50599.
19. Mirzayan K., Dilnoz M., Barno S. The Problem of Classifying and Managing Risk Situations in Poorly Formed Processes // Aliev R.A., Yusupbekov N.R., Kasprzyk J., Pedrycz W., Sadikoglu F.M. (eds). 11th World Conference

“Intelligent System for Industrial Automation” (WCIS-2020). WCIS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol 1323. Springer, Cham. 2021. P.280 – 286. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68004-6_36.

Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини
механизациялаш муҳандислари институти
Миллий тадқиқот университети

17.04.2024 й.
қабул қилинган

UO*K 573.6.086.83.001.26

U.S. FAYZULLAYEV

BIOTEXNOLOGIK JARAYONLARNING HOLATINI ANIQLASH VA OPTIMALLASHTIRISH USULINI ISHLAB CHIQISH

Ushbu maqolada biotexnologik jarayonlarning holatini aniqlash va optimallashtirish usulini ishlab chiqish keltirilgan. Tadqiqot matematik modellashtirish, analitik usullar va ilg'or optimallashtirish algoritmlari orqali jarayon samaradorligi va mahsulot sifatini oshirishga qaratilgan. Taklif etilayotgan yondashuv jarayonni boshqarish va avtomatlashtirishni takomillashtirishda uning samaradorligini ko'rsatuvchi eksperimental natijalar asosida baholandi. Natijalar biotexnologik jarayonlarning rivojlanishiga hissa qo'shib, sanoat uchun yangi imkoniyatlar yaratadi.

Kalit so'zlar: biotexnologik, faktor, maqsad funksiya, substrat, konsentratsiya, temperatura, Pareto.

У.С. Файзуллаев

Разработка метода определения и оптимизации состояния биотехнологических процессов

В данной статье представлена разработка метода определения состояния и оптимизации биотехнологических процессов. Исследование сосредоточено на повышении эффективности процесса и качества продукции с помощью математического моделирования, аналитических методов и современных алгоритмов оптимизации. Предложенный подход был оценен на основе экспериментальных результатов, демонстрирующих его эффективность в улучшении контроля и автоматизации процесса. Обосновано, что полученные результаты будут способствовать развитию биотехнологических процессов, предоставляя новые возможности для промышленности.

Ключевые слова: биотехнологический, фактор, целевая функция, субстрат, концентрация, температура, Парето.

U.S. Fayzullaev

Development of a method for determining and optimizing the status of biotechnological processes

This paper presents the development of a method for determining the state and optimization of biotechnological processes. The study focuses on improving the process efficiency and product quality using mathematical modeling, analytical methods, and modern optimization algorithms. The proposed approach was evaluated based on experimental results demonstrating its effectiveness in improving process control and automation. The results contribute to the development of biotechnological processes, offering new opportunities for the industry.

Keywords: biotechnological, factor, objective function, substrate, concentration, temperature, Pareto.

Kirish. Biotexnologik jarayonlarning holatini aniqlash usulini ishlab chiqish. Zamonaviy sanoat miqyosidagi texnologik jarayonlar bir necha boshqaruv faktorlarga ega bo'lgan apparat va agregatlar majmuasidan iborat bo'lgan murakkab boshqaruv obyekti hisoblanadi. Ushbu obyektlarni birida bo'lgan o'zgarish boshqalariga ham ta'sir qilib, butun bir sanoat miqyosidagi texnologik jarayonlarda o'rnatilgan faktorlarini o'zgarishiga olib keladi [1].

Biotexnologik jarayonlar holati bir nechta faktorlarga (x_1, x_2, \dots, x_k) bog'liq bo'lib, ularning o'zgarish sohalari $(x_i \in [X_i^H, X_i^K]; i = 1 - k)$ va o'z navbatida mos ravishda $f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_k(x_k)$, maqsad funksiyalariga ega bo'lsin. Bu yerda aniqlanish sohasi $(x_i \in [X_i^H, X_i^K]; i = 1 - k)$ ning chegaraviy nuqtalardagi funksiyalarning qiymatlari ham hisobga olinadi. Bu funksiyalar orqali, argumenti parametrlardan iborat yagona

$$F(x_1, x_2, \dots, x_k) = f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_k(x_k) \quad (1)$$

biotexnologik jarayonni tanlangan faktordagi holatini aks ettiruvchi funksional yaratiladi va u quyidagi shartlarni qanoatlantirsin:

$f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_k(x_k)$, - barchasi qabariq, uzluksiz va hosilaga ega bo'lgan funksiyalardan iborat bo'lsin.

Funksional (1)dagi $f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_k(x_k)$, maqsad funksiyalari o'zaro har qanday ko'rinishda: ko'paytma, nisbat kabi bo'lsa ham, ifodani logarifmlash orqali (1) ko'rinish olib kelinadi. Funksional argumentining o'zgarish sohasi faktorlarning o'zgarish sohasalarining kesishmasidan - $Z \cap [X_i^H, X_i^K]; i = (1 - k)$ iborat bo'lib va quyidagi ko'rinishga keladi:

$$F(z_1, z_2, \dots, z_k) = f_1(z_1), f_2(z_2) \dots f_k(z_k); \quad z \in Z \cap [X_i^H, X_i^K]. \quad (2)$$

Funksional $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ning argumentining o'zgarish sohasi;

$Z \cap [X_i^H, X_i^K]; i = (1 - k)$ umuman bo'sh to'plam bo'lishi mumkin, chunki funksiyalarning aniqlanish sohalari umuman kesishmasligi mumkin. Shuning uchun quyidagi o'zgartirishlarni kiritamiz. Funksiyalarning argumentlarini o'zgarish sohalari $(x_i \in [X_i^H, X_i^K]; i = 1 - k)$ bo'lsa, ularning eng kichik qiymatini - funksional $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ning o'zgarish sohasining boshlang'ich nuqtasi Z_i^H hisoblaymiz:

$$Z_i^H = \min_{i=1-k} (X_i^H).$$

Odatda barcha biologik jarayonlar dastlabki vaqtda monoton ko'rinishda rivojlangani uchun boshlang'ich nuqta sifatida $Z_i^H = 0$ deb qaralsa bo'ladi.

$$f_i(x_i^{**}) = \max[f_1(x_1^*), f_2(x_2^*), \dots, f_k(x_k^*)] \quad x_i^* \in [X_i^H, X_i^K]; i = 1 - k. \quad (3)$$

$$x_i^{**} = \arg(f_i(x_i^{**}))$$

Bu x_i^{**} nuqtada $f_i(x_i^{**})$ maqsad funksiyasi o'zining eng yuqori qiymatiga erishadi, lekin boshqa funksiyalar bu nuqtada maksimal qiymatiga erishmasligi mumkin. Barcha funksiyalar o'zlarining murosali qiymatlariga shu nuqtada erishmoq uchun quyidagi o'zgartirishlarni kiritamiz:

$$z_i = x_i^* + (x_m^* - x_i);$$

Bu o'zgartirishlarda $(x_m^* - x_i)$ qiymati musbat yoki manfiy bo'ladi. Bunday o'zgartirishlardan so'ng funksional $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ga maksimal qiymatini beruvchi $(z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*)$ nuqtada barcha $f_1(x_1), f_2(x_2) \dots f_k(x_k)$ funksiyalar o'z maksimal qiymatlariga erishadilar. Haqiqatda, $z_i = x_i^* + (x_m^* - x_i)$ o'zgartirishlarda $x_i = x_m^*$ bo'lgan taqdirda z_i qiymati

$$z_i = x_i^* + (x_m^* - x_m^*) = x_i^*$$

bo'lib, $f_i(x_i)$ funksiyasi o'zining maksimum qiymatiga erishadi. Argumentlarning o'zgarish sohasining yuqori chegaraviy qiymati

$$Z_i^K = \max_{i=1-k} (x_i^* + (x_m^* - X_i^K));$$

bo'lib qoladi.

Misol tariqasida mikroorganizmni yetishtirishda uning o'sish ($f_1(x_1) = \mu(x_1)$) substratning konsentratsiyasi (x_1) va temperatura (x_2)ning ($f_2(x_2) = T(x_2)$) ta'siri grafiklarini olaylik. Amaliyotda ularning analitik ko'rinishi quyidagi formulalar orqali ifodalansin[1]:

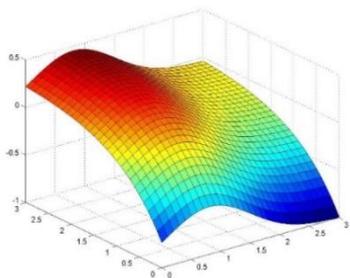
$$\mu(x_1) = \exp(x_1 - 0.8)^2 / 2$$

$$T(x_2) = -\exp(x_2)$$

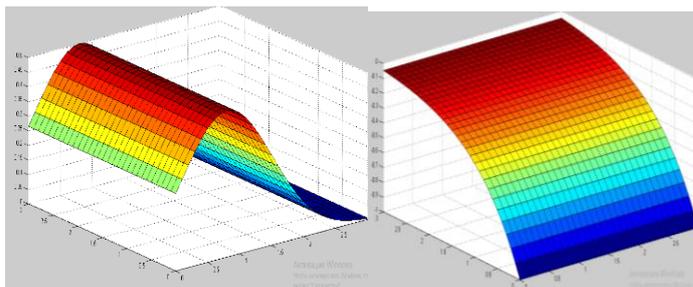
$F(x_1, x_2)$ funksionalning ko'rinishi

$$F(x_1, x_2) = \mu(x_1) + T(x_2) = \exp(-(x_1 - \lambda)^2 / 2\sigma^2) - \exp(-x_2)$$

bo'lib, uning MatLab amaliy dastur paketi orqali olingan grafigi (1-rasm) keltirilgan. Funksional $F(x_1, x_2)$ ning proyeksiyalari mos ravishda $\mu(x_1) = 0$ (2-rasm) va $T(x_2) = 0$ holatlarda aniqlanadi (3-rasm).



1-rasm. Tanlangan faktordagi holatni aks ettiruvchi funksional



2-rasm. Tanlangan faktordagi holatni aks ettiruvchi funksionalning XOZ tekisligidagi proyeksiyasi

3-rasm. Tanlangan faktordagi holatni aks ettiruvchi funksionalning YOZ tekisligidagi proyeksiyasi

Funksionalning sirtidagi har bir nuqta jarayonning shu nuqtadagi holatini aniqlaydi va shu nuqtadagi faktorlarning aktivlik darajasini aniqlash imkoniyatini beradi [2].

Funksionalning o'zgarish sohasiga ($Z \cap [X_i^H, X_i^K]$) tegishli biror nuqtani sirtning boshlang'ich nuqtasi $M(0; 0) = M(f_1(z_1^*), f_2(z_2^*))$ deb qabul qilib ikki o'lchamli funksional sirtning tomonlari kichik son $\Delta_{KB} > 0$ bo'lgan sirtlarga - kubiklarga (*kubik-2 o'lchamli fazoda tekislik, 3 o'lchamli fazoda kub, 4 o'lchamli fazoda 4 o'lchamli giperkubik va h.k.*) tugun nuqtalarning koordinatalari $M(\pm m_1; \pm m_2)$ ($m_1, m_2 \in N$ – natural sonlar to'plami) bo'lgan kubiklarga bo'lib chiqiladi.

0- qatlamda 1 ta nuqta - $M(0; 0)$;

1- qatlam $M(0; 0)$ nuqtani o'rab turuvchi qatlam 4 ta kubiklardan (kvadratdan) iborat bo'lib (4-rasm), tugun nuqtalarning soni – 9 ta, bulardan 8 tasi tashqi va 1 tasi esa ichki hisoblanadi, koordinatalari:

$$M(-1; -1), M(-1; 0), M(-1; +1), M(0; -1), M(0; 0),$$

$$M(0; +1), M(+1; -1), M(+1; 0), M(+1; +1).$$

2- qatlamda 12 ta kubik hosil bo'ladi va ularning tugun nuqtalari soni 16 taga va koordinatalari:

$$M(-2; -2), M(-2; -1), M(-2; +1), M(+2; -2), M(-1; -2), M(+2; +1),$$

$$M(+1; -2), M(+1; +1), M(+2; -2), M(+2; -1), M(+1; +2), M(+2; +2);$$

3- qatlamda 20 ta kubik hosil bo'ladi va ularning tugun nuqtalari 24 taga, koordinatalari:

$M(-3; -3), M(-3; -2), M(-3; -1), M(-3; +1), M(-3; +2), M(-3; -3),$
 $M(-2; -3), M(+2; -2), M(-1; -3), M(-1; -3), M(+1; -3), M(+1; +3),$
 $M(+2; -3), M(+2; +3), M(+3; -3), M(+3; -2), M(+3; -1), M(+3; +1),$
 $M(+3; +2), M(+3; +3);$

4- qatlamda 28 ta kubik hosil bo‘ladi va tugun nuqtalari 32 ta.

Quyidagi ta’rif “Takrorlashsiz almashtirishlar soni–barcha berilgan L ta elementdan tashkil topgan barcha mumkin bo‘lgan s tadan tartiblangan namunalardir”.

Soni – $A_L^s = L^s$. n - qatlamdagi kubiklarning soni ($\tau_2(n)$)

$$\tau_2(n) = (2n)^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \tau_2(i-1) \quad (n = 1, 2, \dots - \text{qatlamlar tartibi})$$

va tugunlar soni ($\rho_2(n)$) esa $\rho_2(n) = A_L^2 - A_{(L-2)}^2$ (L - Tugun nuqta koordinatalarining argumentlar soni $L = (1, 3, 5 \dots)$)ni aniqlash rekurrent formulalari orqali topiladi.

5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	4	3	3	3	3	3	3	4	5
5	4	3	2	2	2	2	3	4	5
5	4	3	2	1	1	2	3	4	5
5	4	3	2	1	1	2	3	4	5
5	4	3	2	2	2	2	3	4	5
5	4	3	3	3	3	3	3	4	5
5	4	4	4	4	4	4	4	4	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

4-rasm. Nuqtani o‘rab turuvchi qatlam.

Quyida keltirilgan 1-jadvalda formula orqali hisoblangan sonlar keltirilgan. Fazo o‘lchami 0 bo‘lgan kubik nuqta hisoblanadi.

Funksional (1) ning sirtini ikki o‘lchamli kubiklarda taqsimlash quyidagi tenglama bajarilganda to‘xtatiladi:

$$(2n)^2 * \Delta_{KB}^2 = \cap [X_i^H, X_i^K]; (i = 1 - k) \quad (4)$$

Ixtiyoriy $M(\pm m_1; \pm m_2)$ nuqtadagi faktorlar miqdorini aniqlash uchun

$$x_1 = \text{arg}F(f_1(\pm m_1, 0))$$

$$x_2 = \text{arg}F(0, f_2(\pm m_2)) \quad (5)$$

tenglamalarni yechish orqali qiymatlari topiladi. Faktorlarning aniqlik darajasi Δ_{kv} qiymatiga bog‘liq bo‘lib, qancha kichik olinsa, shuncha aniqlikka erishiladi.

Faktorlar soni $k = 3$ ga teng bo‘lsa, ya’ni uch o‘lchovli fazoda qatlamlardagi kubiklar soni va tugunlar sonini aniqlash formulalari

$$\tau_3(n) = (2n)^3 - \tau_3(n-1) \quad \text{va} \quad \rho_3(n) = (2n)^3 - \rho_3(n-1)$$

rekurrent formulalari bilan hisoblanib natijalari jadvalda keltirilgan.

Rekkurent formulalari bilan hisoblab olingan natijalar

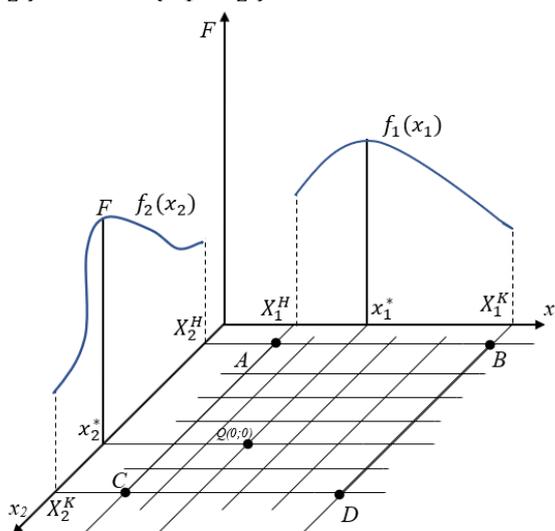
№	2 o‘lchovli sfera			3 o‘lchovli sfera			L
	2	3	4	5	6	7	
1							8
n	Qatlamlardagi kubiklar soni – $Qos=(2n)^2 -$	Tugun nuqtalar soni –	Tugun nuqtalarning koordinatalari	$\tau_3(n)$	$\rho_3(n)$		

Bu yerda $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ni jarayon maqsad funksiyasi sifatida qabul qilinishi mumkin. Maqsad funksional $F(z_1, z_2, \dots, z_k)$ ni maksimal qiymatini beruvchi $(z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*)$ nuqtani

$$F(z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*) = \max_{z_i \in Z = \cap [X_i^H, X_i^K]} F(z_1, z_2, \dots, z_k) \quad (6.1)$$

topish usulini ishlab chiqishga qaratilgan.

Shunday funksional yaratilganda, jarayonni avtomatlashtirish loyihasini yaratish sharoitida boshqarishning optimal ko‘rinishini yagona funksional orqali yechish imkoniyati hosil bo‘ladi. Aniqlik uchun 2 faktorli funksional $F(z_1, z_2) = f_1(z_1) + f_2(z_2)$ berilgan bo‘lib, argumentlarning o‘zgarish sohasi $(z_i \in Z = \cap [X_i^H, X_i^K]; i = 1 - 2)$ iborat bo‘lsin. Bu soha to‘rtburchak $(ABCD)$ shaklida bo‘lib (6 - rasm), chegaraviy nuqtalarning koordinatlari quyidagilardan iborat bo‘ladi: $A = A(X_1^H, X_2^H)$; $B = B(X_1^K, X_2^H)$; $C = C(X_1^H, X_2^K)$; $D = D(X_1^K, X_2^K)$.



6-rasm. O‘zgarish sohasi.

Edjvorta-Pareto prinsipiga asosan ko‘p maqsad funksiyali biotexnologik jarayonlarning eng yaxshi (kompromiss) yechimlarni izlash, faqat Pareto to‘plami doirasida amalga oshirilishi kerak [1, 4]. Har qanday ko‘p mezonli masalani hal qilishda birinchi zarur qadam, Pareto to‘plamini yaratishdan iborat. Faktorlar o‘zgarish sohasida boshqa yechim hukmron bo‘lmagan yechimlar to‘plami Pareto to‘plami deyiladi. Pareto to‘plamining chegarasi – bu barcha maqsad funksiyalar o‘rtasidagi kompromiss yechimlar to‘plamidir. Pareto to‘plami nafaqat yagona optimal yechimni ta‘minlamaydi, balki maqsad funksiyalar uchun turli darajadagi faktorlar afzalliklariga ega bo‘lgan kompromiss yechimlar to‘plamini anglatadi.

Ko‘p maqsad funksiyali jarayonlarni boshqarish algoritmlari odatda an’anaviy boshqaruv algoritmlarga qaraganda murakkabroq bo‘lib, ularni amalga oshirish va tushunish qiyin, shuningdek, hisoblash jarayoni katta vaqt va mablag‘ sarf qilishni talab qiladi [5].

Shu munosabat bilan izlanishlar Pareto bo‘yicha optimal yechimni aniqlash usulini ishlab chiqarishga qaratilgan [6]. Pareto to‘plamini aniqlash, faktorlar o‘zgarish sohasida $(ABCD)$ biror ixtiyoriy nuqta (M, N) tanlanib va shu nuqtadan xayoliy $U(f_1(x_1^*), f_2(x_2^*), \dots, f_k(x_k^*))$ nuqta sari intilishga qaratilgan bo‘lib, faktorlar o‘zgarish sohasining chegaraviy nuqtalaridan koordinata o‘qlariga parallel o‘tkazilgan urinmalar orasidagi chegaraviy soha hisoblanadi [3,4]. Pareto bo‘yicha optimal yechim (6.1)ni qanotlantiradigan $(z_1^*, z_2^*, \dots, z_k^*)$ nuqta hisoblanadi. Pareto bo‘yicha optimal yechimni

aniqlash uchun quyidagi usul tavsiya etiladi (ko'rgazmali bo'lishi uchun faktorlar soni ikkita (z_1 va z_2) olindi):

- faktorlar o'zgarish sohasida $z_i^{\wedge\wedge} = \arg(\max(f_i(z_i)))$ aniqlanadi;
- bu nuqtadagi funksiya qiymatlari hisoblanadi $f_1(z_1^{\wedge\wedge})$ va $f_2(z_1^{\wedge\wedge})$;
- faktorlar o'zgarish sohasida ikkita ($z_1^{\wedge\wedge}; z_2^{\wedge\wedge}$) va ($z_2^{\wedge\wedge}; z_1^{\wedge\wedge}$) nuqtalardagi mos ravishda funksiyalarning qiymatlari hisoblanib, $M_1(f_1(z_1^{\wedge\wedge}), f_2(z_2^{\wedge\wedge}))$ va $M_2(f_1(z_2^{\wedge\wedge}), f_2(z_1^{\wedge\wedge}))$ nuqtalar aniqlanadi;
- $M_1(f_1(z_1^{\wedge\wedge}), f_2(z_2^{\wedge\wedge}))$ va $M_2(f_1(z_2^{\wedge\wedge}), f_2(z_1^{\wedge\wedge}))$ nuqtalardan o'tuvchi to'g'ri chiziq o'tkaziladi.

Fazodagi $M'_1(x_1, y_1, z_1)$ va $M'_2(x_2, y_2, z_2)$ nuqtalardan o'tuvchi to'g'ri chiziqning tenglamasi [2,3]

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}$$

bo'lib, 1 va 2-hadlardan

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

2 va 3-hadlardan

$$\begin{aligned} z &= z_1 + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} * (z_2 - z_1) = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1} * \left[y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) - y_1 \right] = \\ &= z_1 + \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) \end{aligned}$$

Fazodagi $M_1(z_1^{\wedge\wedge}, z_2^{\wedge\wedge}, f_1(z_1^{\wedge\wedge}))$ va $M_2(z_2^{\wedge\wedge}, z_1^{\wedge\wedge}, f_2(z_2^{\wedge\wedge}))$ nuqtalardan o'tuvchi to'g'ri chiziqning tenglamasi esa

$$f_2(z_2) = f_1(z_1^{\wedge\wedge}) + \frac{f_2(z_2^{\wedge\wedge}) - f_1(z_1^{\wedge\wedge})}{z_1^{\wedge\wedge} - z_2^{\wedge\wedge}} * (z_1^{\wedge\wedge} - z_2^{\wedge\wedge}). \quad (6.2)$$

Yaratilgan to'g'ri chiziqning koordinatalar bosh nuqtasi ($z_1^{\wedge\wedge}; z_2^{\wedge\wedge}$) faktorlarning o'zgarish sohasiga tegishli bo'lib ($z_1^{\wedge\wedge}; z_2^{\wedge\wedge}$) $\in ABCD$, agar $z_2^{\wedge\wedge} > X_1^K$ yoki $z_2^{\wedge\wedge} < X_1^H$ bo'lsa, ($z_2^{\wedge\wedge}; z_1^{\wedge\wedge}$) nuqta umuman $ABCD$ tegishli bo'lmaydi. Fazodagi ikki $M_1(f_1(z_1^{\wedge\wedge}), f_2(z_2^{\wedge\wedge}))$ va $M_2(f_1(z_2^{\wedge\wedge}), f_2(z_1^{\wedge\wedge}))$ nuqtalardan o'tuvchi to'g'ri chiziqning tenglamasi:

$$f_2(z_2) = f_2(z_2^{\wedge\wedge}) + \frac{(f_1(z_1) - f_1(z_1^{\wedge\wedge})) * (f_2(z_1^{\wedge\wedge}) - f_2(z_2^{\wedge\wedge}))}{f_1(z_2^{\wedge\wedge}) - f_1(z_1^{\wedge\wedge})}. \quad (6.3)$$

Bu to'g'ri chiziq funksional $F(z_1, z_2)$ ning ostidan o'tadi, chunki $M_1(f_1(z_1^{\wedge\wedge}), f_2(z_2^{\wedge\wedge}))$ va $M_2(f_1(z_2^{\wedge\wedge}), f_2(z_1^{\wedge\wedge}))$ nuqtalar koordinatalari ($f_1(z_1^{\wedge\wedge}), f_2(z_2^{\wedge\wedge}), f_1(z_2^{\wedge\wedge}), f_2(z_1^{\wedge\wedge})$) barchasi mos ravishda shu nuqtadagi funksionalning $F(z_1, z_2)$ qiymatlaridan kichikdir. Haqiqatdan

$$f_1(z_1^{\wedge\wedge}) \leq f_1(z_1^{\wedge\wedge}) + f_2(z_2^{\wedge\wedge}) = F(z_1^{\wedge\wedge}, z_2^{\wedge\wedge}), \text{ chunki } f_2(z_2^{\wedge\wedge}) \geq 0$$

To'g'ri chiziqning koordinata o'qlariga nisbatan yo'nalishi $z_1^{\wedge\wedge}$ va $z_2^{\wedge\wedge}$ nuqtalarning qiymatlarining o'zaro munosabatlariga $z_1^{\wedge\wedge} \leq z_2^{\wedge\wedge}$ yoki $z_1^{\wedge\wedge} \geq z_2^{\wedge\wedge}$ bo'lishiga bog'liq bo'ladi. Funksional

$$F(z_1^*, z_2^*) = \max_{z_i \in Z = \cap [X_i^H, X_i^K]} F(z_1, z_2) \quad (6.4)$$

Pareto bo'yicha optimal yechimi shu to'g'ri chiziqda yotadi. Haqiqatdan, to'g'ri chiziqda (6.3) yotmaydigan biror nuqtaning koordinatalari ($z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta, z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta$) va mos ravishda ($f_1(z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta), f_2(z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta)$) nuqtani beradi ($\Delta > 0$ kichik son). O'z navbatida $f_1(z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta) \leq f_1(z_1^{\wedge\wedge})$ va $f_2(z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta) \leq f_2(z_2^{\wedge\wedge})$ bo'lgani uchun

$$\begin{aligned} F(z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta, z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta) &= F(f_1(z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta), f_2(z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta)) = f_1(z_1^{\wedge\wedge} \pm \Delta) + f_2(z_2^{\wedge\wedge} \pm \Delta) \leq \\ &f_1(z_1^{\wedge\wedge}) + f_2(z_2^{\wedge\wedge}) = F(z_1^{\wedge\wedge}, z_2^{\wedge\wedge}) \end{aligned} \quad (6.5)$$

va

$$F(z_2^{\wedge} \pm \Delta, z_1^{\wedge} \pm \Delta) = F(f_1(z_2^{\wedge} \pm \Delta), f_2(z_1^{\wedge} \pm \Delta)) = f_1(z_2^{\wedge} \pm \Delta) + f_2(z_1^{\wedge} \pm \Delta) \leq f_1(z_2^{\wedge}) + f_2(z_1^{\wedge}) = F(z_2^{\wedge}, z_1^{\wedge}) \quad (6.5)$$

Demak, Pareto bo'yicha optimal yechimi shu to'g'ri chiziqda yotadi.

Pareto bo'yicha optimal yechimni aniqlash uchun faktorlar o'zgarish sohadagi $M_3(z_1^{\wedge}, z_2^{\wedge})$ va $M_4(z_2^{\wedge}, z_1^{\wedge})$ nuqtalardan o'tuvchi to'g'ri chiziqning koordinatalarga nisbatan tenglamasi

$$z_1 = z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2; \quad z_2 = z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1$$

bo'lib, funksionalning ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$\max F(z_1, z_2) = \max F(f_1(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2), f_2(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1)) = \max (f_1(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2) + f_2(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1)) \quad (6.6)$$

Bu funksionalning z_1 va z_2 bo'yicha maksimal qiymatini topish uchun o'zgaruvchilar bo'yicha xususiy hosilalarini olib nolga tenglashtiriladi.

$$\begin{cases} \frac{dF(z_1, z_2)}{dz_1} = \frac{df_1(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2)}{dz_1} + \frac{df_2(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1)}{dz_1} \\ \frac{dF(z_1, z_2)}{dz_2} = \frac{df_1(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2)}{dz_2} + \frac{df_2(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1)}{dz_2} \end{cases} \quad (6.7)$$

Tenglamalar tizimining birinchi tenglamaning biringchi hadi z_1 ga, shuningdek ikkinchi tenglamaning ikkinchi hadi z_2 bog'liq emas, shuning uchun hadlar nolga teng bo'ladi va (6.8) quyidagi ko'rinishni oladi:

$$\begin{cases} \frac{df_2(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_1)}{dz_1} = 0 \\ \frac{df_1(z_2^{\wedge} + z_1^{\wedge} - z_2)}{dz_2} = 0 \end{cases}$$

Tenglamalar tizimining yechimi Pareto bo'yicha optimal yechim hisoblanadi.

Faktorlar soni k ta bo'lsa, $M_1(z_1^{\wedge}, z_2^{\wedge}, \dots, z_k^{\wedge})$ va $M_2(z_k^{\wedge}, z_1^{\wedge}, z_2^{\wedge}, \dots, z_{k-1}^{\wedge})$ nuqtalar bilan yuqorida keltirilgan tartibda ish bajariladi.

Xulosa. Ushbu ishda biotexnologik jarayonlarning holatini aniqlash va optimallashtirish usuli ishlab chiqilgan va tahlil qilingan. Yondashuv jarayonlar samaradorligini oshirish va mahsulot sifatini yuqori darajada ta'minlashga qaratilgan matematik modellashtirish, analitik usullar va zamonaviy optimallashtirish usullariga asoslangan. Taklif etilayotgan usul biotexnologik jarayonlarning hozirgi holatini aniqroq baholash imkonini beradi, samarali boshqaruv va qarorlar qabul qilishni osonlashtiradi.

Taklif etilgan eksperimental tavsif ishlab chiqilgan usulni biotexnologik ishlab chiqarishning hozirgi sharoitida qo'llashning ishonchliligi va amaliyligini ko'rsatdi. Tadqiqot natijalari shuni tasdiqlaydiki, ushbu tavsiyadan foydalanish jarayon barqarorligini oshirishga, resurs xarajatlarini kamaytirishga va biotexnologiyalarni umumiy optimallashtirishga yordam beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Yusupbekov N.R., Ibragimov X.Z. Texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish asoslari. – T.: TATU bosmaxonasi, 2007.
2. <https://studfile.net/preview/4229189>. P.:3.
3. Островский Г.М.и др. Технические системы в условиях неопределенности. – М.: Изд-во БИНОМ, М. 2015, 320 с.
4. Ногин В.Д. Множество и принцип Парето. Спб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022.

5. https://ya.ru/neurum/c/nauka-i-obrazovanie/q/pochemu_vazhno_stroit_mnozhestvo_pareto_pri_7888f1c7.
6. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. Изд. 2. М., 1975.

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti

18.03.2025-y.
qabul qilingan

УДК 519.71(575.1)

А.А. ЕРМАКОВ, С.С. САДЫКОВ, И.Р. САМАНДАРОВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В статье приведены модель и алгоритм синтеза полосового образа в дефектоскопических изображениях с варьированием кривизны и масштаба. Рассмотрены метод и алгоритм выделения полос прямоугольного профиля на основе интегрального преобразования по сегменту полосы. Проанализированы методика и результаты оценки качества разработанного алгоритма выделения полос на тестовых изображениях. Изучены технология обработки и результаты анализа капиллярных дефектоскопических изображений.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, дефектоскопические изображения, неразрушающий контроль, капиллярный контроль, качество изделий, геометрические и статистические признаки, интегральное преобразование полосы.

A.A.Yermakov, S. S. Sodiqov, I. R. Samandarov

Kapillary nuqsonlarni aniqlashda nuqsonlarni aniqlash tasvirlarini qayta ishlash va tahlil qilishning matematik modeli va algoritmlari

Maqolada egrilik va masshtabning o'zgarishi bilan defektoskopik tasvirlarda chiziqli tasvirni sintez qilish modeli va algoritmi, chiziqli segment bo'yicha integral transformatsiyaga asoslangan to'rtburchaklar profili, chiziqni tanlash usuli va algoritmi, sinov tasvirlarida ishlab chiqilgan chiziqli ajratish algoritmining sifatini baholash metodologiyasi va natijalari, kapillary nuqsonlarni aniqlash tasvirlarini qayta ishlash va tahlil qilish texnologiyasi keltirilgan.

Kalit so'zlar: raqamli tasvirni qayta ishlash, nuqsonlarni aniqlash, buzilmaydigan nazorat, mahsulot sifatini kapillary nazorat qilish, chiziqni geometrik va statistik xususiyatlari, integrallik ifodalash.

A.A. Yermakov, S.S. Sadykov, I.R. Samandarov

Mathematical model and algorithms for processing and analyzing defects in capillary defects

The article presents a model and algorithm for synthesizing a strip image in defectoscopy images with varying curvature and scale, a method and algorithm for extracting rectangular profile strips based on integral transformation over a strip segment, a method and results for evaluating the quality of the developed algorithm for extracting strips on test images, and a technology for processing and analyzing capillary defectoscopy images.

Keywords: digital image processing, defectoscopy images, non-destructive testing, capillary quality control of products, geometric and statistical features, integral strip transformation.

Введение. В связи с усложнением новой техники и повышением требований к ее надежности трудоемкость контрольных операций в промышленности резко увеличивается. Практика показывает, что усовершенствование методов неразрушающего контроля позволяет повысить надежность и качество продукции, предотвращает аварии сложных агрегатов и дает производству огромные экономические преимущества.

Существующие методы неразрушающего контроля качества дефектопических снимков базируются, в основном, на визуальных возможностях человека. Однако возникают сложности, связанные с наличием субъективизма и ограниченных возможностей зрения человека. В связи с этим возникает необходимость автоматического контроля для объективной и более точной оценки качества.

Так как многие методы контроля на выходе дают изображения дефектов, в последнее время наблюдается тенденция внедрения систем технического зрения в дефектоскопию. Такие системы намного превышают возможности человеческого глаза, а в некоторых случаях и самого человека как анализатора изображений. Цифровой анализ обеспечивает быстрое обнаружение, измерение и классификацию образов дефектов для обеспечения неразрушающего контроля различных материалов и изделий. Сообразно с этим в области компьютерной обработки изображений существуют работы, связанные с анализом дефектоскопических снимков различной природы. Известны труды Д. Мери, Р. Силвы, М. Карраско, Н. Насреддина, Н.Г. Федотова, С.С. Садыкова, А.М. Секерина и др. В работах, опубликованных в соавторстве, представлены: в [1,2] – модели и алгоритмы синтеза полосовых образов, в [3 – 6] – методы и алгоритмы выделения полос, в [7,8,9] – методика и результаты исследования алгоритмов выделения полос, в [10 – 18] – применение научных результатов для обработки и анализа капиллярных дефектоскопических изображений.

Однако многие дефекты имеют особые специфичные сложные образы. Например, очень распространены дефекты-трещины, риски, царапины, имеющие протяженную линейчатую форму в виде полосы. Такие дефекты часто выявляются капиллярным методом. Применяемые в дефектоскопии системы технического зрения используют, в основном, достаточно простые методы цифровой обработки изображений и не позволяют выполнить более детальный разбор таких сложных по форме дефектов.

Математическая модель полосового образа. Введем понятия области полосы, образующей линии полосы, полосы с переменной шириной, изображения полосы, профиля полосы.

Определение 1. Множество точек, расположенных вдоль кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$ на расстоянии, не превышающем значение σ (рис.1),

$$S = \{(x_0, y_0) \mid (x_0 - x(t))^2 + (y_0 - y(t))^2 \leq \sigma^2\}$$

назовем **областью полосы** (или просто полосой), заданной этой кривой.

Определение 2. Кривую $x = x(t)$, $y = y(t)$ будем называть **образующей кривой** (или просто образующей) полосы S .

Определение 3. Если значение σ является функцией $\sigma = \sigma(t)$, то полосу S будем называть **полосой с переменной шириной**, так что $2\sigma(t)$ – ширина этой полосы, изменяющаяся по образующей кривой $x = x(t)$, $y = y(t)$.

Определение 4. **Изображением полосы** (или образом полосы) назовем сцену, заданную характеристической функцией $\chi : R^2 \rightarrow \{0, 1\}$,

$$\chi(x_0, y_0) = \begin{cases} 1, & (x_0, y_0) \in S, \\ 0. & \end{cases}$$

Определение 5. Профилем полосы S в точке (x, y) будем называть сечение поверхности $z = \chi(x, y)$ нормальной плоскостью в пространстве R^3 к образующей кривой $x = x(t), y = y(t)$ в точке (x, y) .

Таким образом, полоса характеризуется профилем и рассматривается как область переменной ширины, построенная вокруг образующей линии полосы. Далее дано определение сегменту полосы, анализируются его параметры. Рассмотрено интегральное преобразование изображения по сегменту полосы (ИПСП).

Определение 6. Прямоугольник, аппроксимирующий часть полосы, называется **сегментом полосы**.

Обозначим полуширину (или масштаб) сегмента как σ , полудлину – l , а угол наклона сегмента (который равен углу наклона нормали к образующей полосы) – θ (рис.1).

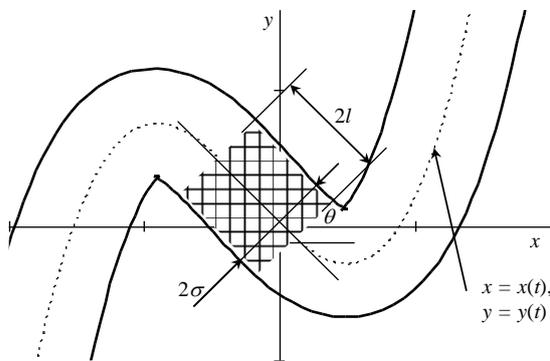


Рис.1. Область и сегмент полосы

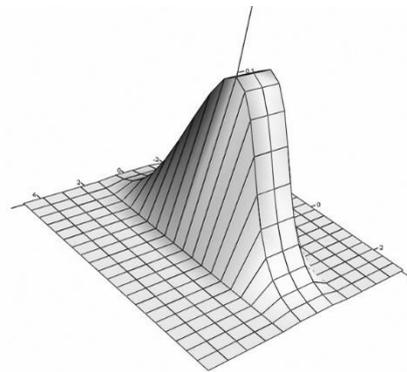


Рис.2. Детектор сегмента полосы прямоугольного профиля

На основе ИПСП вычисляются признаки сегмента (позиция, масштаб ориентация).

Рассмотрим разработанный метод многомасштабной фильтрации одномерных сигналов на основе фильтра воспроизведения полезного сигнала и построенный метод и алгоритм воспроизведения двумерного полезного сигнала на основе одномерной многомасштабной фильтрации и преобразования по сегменту полосы. Для осуществления воспроизведения двумерного полезного сигнала сформированы два преобразования: воспроизводящее интегральное преобразование по сегменту полосы и преобразование для воспроизведения полосы (рис.2).

Теорема. Многомасштабное воспроизведение одномерного сигнала обеспечивает фильтр, спектр Фурье которого

$$\Psi(\omega) = \frac{\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)]}{\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)] + W_n(\omega)},$$

где $\mathbf{M}_\sigma[W_s(\sigma\omega)] = \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} W_s(\sigma\omega) d\sigma$; \mathbf{M}_σ – оператор среднего по масштабу

σ ($\sigma \in [\sigma_1, \sigma_2]$); $W_s(\omega), W_n(\omega)$ – энергетические спектры полезного сигнала и помех соответственно; σ_1, σ_2 – минимальное и максимальное значение масштаба соответственно.

Многомасштабное воспроизведение дает возможность фильтрации сигнала заданного вида в некотором диапазоне масштаба.

Пусть $S(\omega, \nu)$, $N(\omega, \nu)$, $F(\omega, \nu)$ – Фурье-спектры детектора сегмента полосы (двумерного полезного сигнала см. рис.2), функции шума и исходного изображения $f(x, y)$ соответственно, $\mathbf{Rot}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ – матрица вращения на угол θ .

Определение 7. Преобразование $\mathbf{H}_\theta[\cdot]$, выполняющее фильтрацию по масштабу в пределах $[\sigma_1, \sigma_2]$ функции $f(x, y)$ вдоль каждого направления θ , формируя спектральную функцию $g(x, y, \theta)$, по правилу

$$G(\omega, \nu, \theta) = F(\omega, \nu) \cdot \frac{M_s}{M_s + |N(\omega, \nu)|^2},$$

где $G(\omega, \nu, \theta)$ – изображение; $F(\omega, \nu, \theta)$ – Фурье-спектр функции $g(x, y, \theta)$ соответственно

$$M_s = \frac{1}{\sigma_2 - \sigma_1} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} |S(\mathbf{Rot}_\theta(\sigma\omega, l\nu))|^2 d\sigma,$$

назовем воспроизводящим интегральным преобразованием по сегменту полосы (ВИПСП).

Определение 8. Преобразование исходного изображения $f(x, y)$ на основе ВИПСП в изображение $g(x, y)$, так что

$$g(x, y) = \max_{\theta} \mathbf{H}_\theta[f(x, y)],$$

назовем воспроизведением полосы (ВП).

ВП находит максимумы в откликах ВИПСП, тем самым среди сегментов разной ориентации определяется сегмент, который наилучшим образом повторяет часть полосы.

Алгоритм воспроизведения полосовых образов построим следующим образом.

- 1) Формирование Фурье-спектра $F(\omega, \nu)$ исходного изображения $f(x, y)$.
- 2) Вычисление спектра шума $N(\omega, \nu)$ по области изображения, которая не содержит полезный сигнал.

- 3) Выполнение воспроизводящего интегрального преобразования

$$G(\omega, \nu, \theta) = \mathbf{H}_\theta[F(\omega, \nu)].$$

- 4) Обратное преобразование Фурье спектра $G(\omega, \nu, \theta)$ для каждого значения θ в функцию $g(x, y, \theta)$.

- 5) Поиск максимумов в функции $g(x, y, \theta)$:

$$g(x, y) = \max_{\theta} g(x, y, \theta).$$

Приведенный алгоритм позволяет выделять на полутоновом изображении полосы прямоугольного профиля, различного масштаба и кривизны.

Построена модель фона и образа полосы на исходных изображениях. Разработаны способ и алгоритм синтеза образующей линии полосы и изображения полосы.

Анализ фона реальных капиллярных изображений показывает, что спектр фона очень хорошо аппроксимируется гиперболой: тестирование разработанного алгоритма фильтрации показывает целесообразность применения фильтрации при наличии помех на изображении: **практическое применение.** приведены

результаты практического применения разработанного алгоритма фильтрации для обработки и анализа изображений в капиллярной дефектоскопии. выполнен статистический анализ капиллярных снимков. отмечено, что дефекты на всех взятых снимках представляют линейчатые образы прямоугольного профиля со случайно варьируемой шириной. для оценки уровня шума на данных дефектоскопических снимках проведены исследования, которые позволяют определить значения параметров, характеризующих спектр фона. результаты аппроксимации усредненного по множеству направлений фурье-спектра исходного изображения гиперболой приведены в табл.1.

$$\text{таблица 1 } |z(w)| = \frac{a}{w - b}.$$

Для синтеза фона будем генерировать гиперболический спектр и исказить его добавлением случайной комплексной составляющей:

$$z_1(w) = z(w) + U + iW,$$

где U, W – стандартные гауссовские случайные величины.

Складывая изображение полосы и фона, мы наносим шум на образ полосы. Интенсивность такого шума будет характеризоваться параметрами a и b . Чем больше значение a , тем больше искажается полоса. По графику спектра видно, что параметр b должен быть отрицательным. Чем ближе он к нулю, тем больше низкочастотных шумов, которые отображаются в виде пятен.

Образующая полоса синтезируется **по алгоритму**:

1. Синтез случайного спектра Z .
2. Обратное преобразование Фурье Z (получение последовательности кривизны $K = \{k_i\}$).
3. Вычисление последовательности единичных векторов:

$$v_i = \mathbf{Rot}_{k_{i-1}\Delta s} \cdot v_{i-1},$$

где Δs – расстояние между двумя соседними точками синтезируемой кривой; v_0 – единичный касательный вектор в начале дуги кривой.

4. Определение координат синтезируемой кривой:

$$p_i = p_{i-1} + v_{i-1}\Delta s.$$

Синтез изображения полосы осуществляется по алгоритму:

1. Синтезировать образующую кривую.
2. Получить функцию изменения ширины $\Delta\sigma(t)$.
3. Найти $\sigma = \sigma_{\text{ср}} + \Delta\sigma$.
4. Определить характеристическую функцию полосы $\chi(x, y)$.
5. Наложить ее на фон $\gamma(x, y)$: $f(x, y) = \gamma(x, y) + \chi(x, y)$.

Алгоритм синтеза полосы позволяет сгенерировать различного вида линейчатые образы с заданным профилем, переменной кривизной и масштабом.

Исследование алгоритмов на тестовых изображениях. Исследован разработанный алгоритм фильтрации на тестовых изображениях. Показана точность алгоритма.

Проведены эксперименты синтеза тестовых изображений фоновых и полосовых образов. Выполнена аппроксимация полос на реальных изображениях.

На рис.3 приведены результаты этапов синтеза и обработки изображения полосы. На основе модели полосы и алгоритма синтеза полосовых образов построены тестовые изображения с различными значениями параметров. Показано видоизменение образа полосы при варьировании некоторых параметров, что дает возможность генерировать линейчатые изображения специфического вида.

Осуществлена оценка качества фильтрации полос. Для оценки разработаны алгоритмы, основанные на корреляционном сравнении и сравнении геометрических характеристик образов полос.

Оценка на основе коэффициента корреляции выполнялась **по алгоритму**:

1. Для $a = 0, h, 2h, \dots, a_{\max}$ выполнение шагов 2 – 8.
2. Генерация m тестовых изображений полосы без помех.
3. Зашумление всех m сгенерированных изображений полосы с уровнем шума a .
4. Вычисление коэффициента корреляции между незашумленным и зашумленным изображениями для каждой m пар.
5. Определение среднего значения коэффициента корреляции по m полученным значениям на шаге 3.
6. Фильтрация всех m тестовых изображений исследуемым алгоритмом.
7. Вычисление коэффициента корреляции между незашумленным и фильтрованным изображениями для каждой m пар.
8. Определение среднего значения коэффициента корреляции по m полученным значениям на шаге 3.

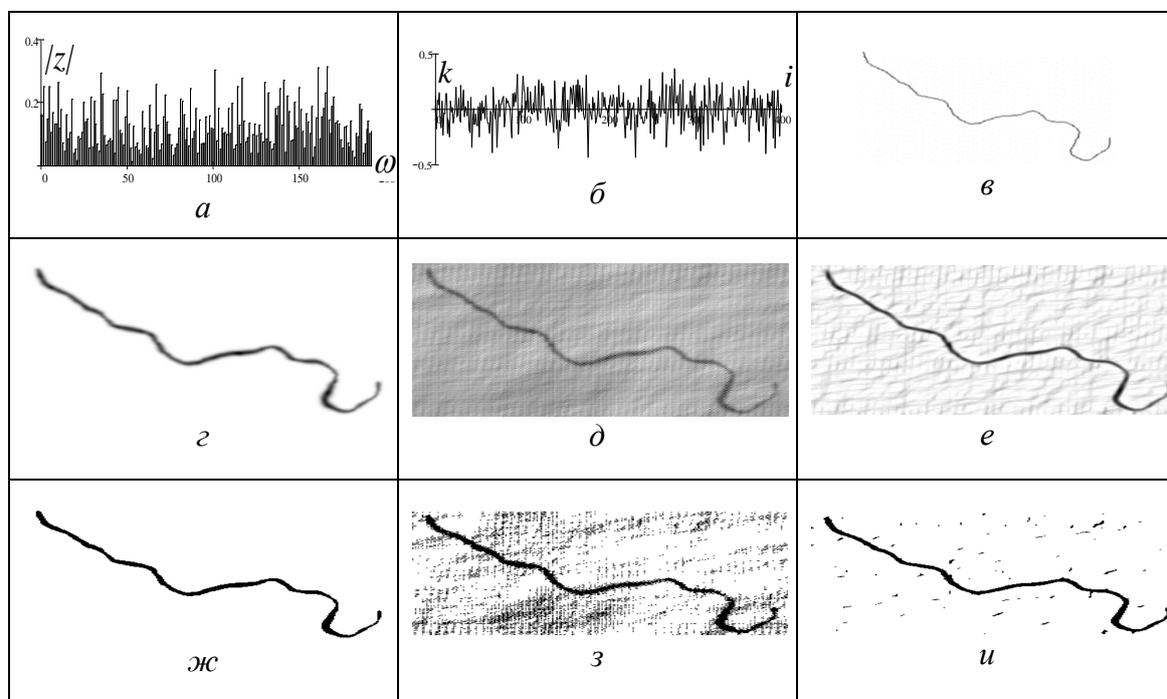


Рис.3. Результаты этапов синтеза и обработки изображения полосы (*a* – спектр кривизны; *б* – график кривизны; *в* – образующая полосы; *г* – образ полосы; *д* – сцена, содержащая полосу; *е* – результат фильтрации; *ж, з, и* – результат бинаризации «чистого», зашумленного и фильтрованного изображения соответственно)

График статистической зависимости коэффициента корреляции от среднеквадратического отклонения шума (СКО, квадратный корень из мощности шума) приведен на рис.4,*a*. Видно, что фильтрация сохраняет большие значения коэффициента корреляции при увеличении мощности шума.

В алгоритме сравнения по геометрическим характеристикам выполняется бинаризация тестового, зашумленного и фильтрованного изображения. По бинарным сценам вычисляются характеристики полос: площадь, длина, максимальная ширина, центр тяжести, вторые центральные моменты. Данные

характеристики позволяют оценить форму, позицию и ориентацию анализируемого образа.

Обнаружено, что фильтрация полос вносит лишь незначительные искажения. Полезный эффект фильтрации наблюдается при наличии на изображении шумов: шум сильно варьирует признаки объекта, фильтрация же устраняет такой разброс (рис.4,б).

Тестирование разработанного алгоритма фильтрации показывает целесообразность применения фильтрации при наличии помех на изображении.

Визуальный анализ полученных результатов позволяет утверждать о хорошем качестве обработки.

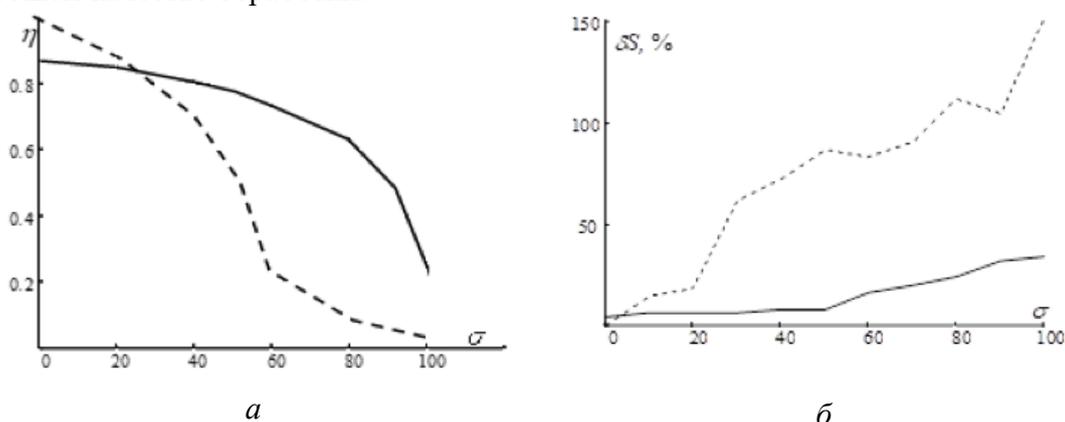


Рис.4. Зависимости коэффициента корреляции η (а) и отклонения площади ΔS (б) от СКО шума σ (пунктирной линией показана зависимость без фильтрации, сплошной – с фильтрацией)

Практическое применение. Приведены результаты практического применения разработанного алгоритма фильтрации для обработки и анализа изображений в капиллярной дефектоскопии. Выполнен статистический анализ капиллярных снимков. Отмечено, что дефекты на всех взятых снимках представляют линейчатые образы прямоугольного профиля со случайно варьируемой шириной. Для оценки уровня шума на данных дефектоскопических снимках проведены исследования, которые позволяют определить значения параметров, характеризующих спектр фона. Результаты аппроксимации усредненного по множеству направлений Фурье-спектра исходного изображения гиперболой приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения спектральных параметров реального дефектоскопического снимка

Изображение	Фурье-спектр и его аппроксимация	Параметр	
		a	b
		235	-3

Визуальный анализ исследуемых изображений в областях дефектов показывает, что минимальная ширина раскрытия дефекта составляет один пиксель, а максимальная – шесть пикселей. Для нахождения длины сегмента полосы дефектов выполнялось усреднение изображений в каждой точке образующей полосы по алгоритму:

1. Обозначение точек образующей линии дефектов: $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$.

2. Определение угла наклона касательной α_i к образующей в каждой такой точке.

3. Генерирование для каждой точки ряда изображений, которые были смещены на вектор (x_i, y_i) и претерпели вращение на угол α_i .

4. Усреднение всех полученных изображений.

В результате такой аппроксимации определена длина сегмента для исследуемых снимков.

Полученные параметры в ходе проведенного анализа используются как входные данные для разработанного алгоритма фильтрации.

Построена общая методика обработки капиллярно-дефектоскопических снимков. Методика основана на следующем алгоритме:

1) Фильтрация полосовых образов исходного или предобработанного изображения.

2) Бинаризация фильтрованного изображения.

3) Вычисление площади выделенных областей.

4) Устранение областей малой площади.

5) Вычисление признаков выделенных дефектных областей.

6) Классификация дефектов.

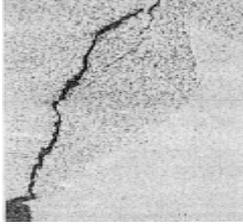
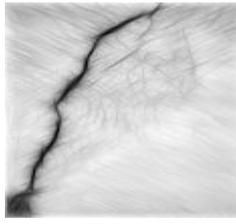
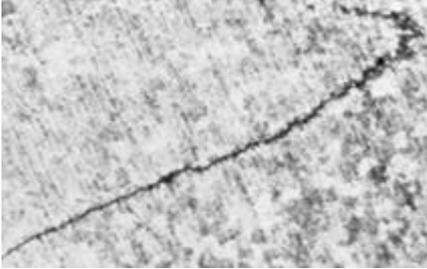
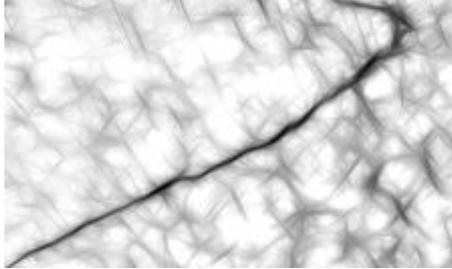
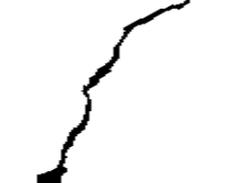
Исходный снимок	Результат фильтрации
	
	

Таблица 2

Результаты бинаризации исходных и фильтрованных изображений

Результат бинаризации исходного снимка	Результат бинаризации фильтрованного снимка
	
	

Выполнялась обработка реальных изображений. В табл. 2 приведены примеры воспроизведения полос прямоугольного профиля как образов трещин на дефектоскопических изображениях. Обработка выполнена при параметрах, которые соответствуют выделяемому объекту: угол наклона сегмента полосы $\theta \in [0, \pi]$, полуширина полосы $\sigma \in [0,5, 3]$, полудлина сегмента полосы $l = 4$. Спектр помех $N(\omega, \nu)$ и его параметры определены по области всего изображения.

Таблица 3

Результаты фильтрации образов полос на дефектоскопических изображениях

С порогами, выбранными по гистограммам, произведена бинаризация исходного и обработанного изображений (табл.3). По бинарным сценам видно, что применение фильтрации позволяет довольно четко отделить фон от трещины. Возникает возможность выделения изображений дефектов такого рода для дальнейшей автоматической оценки качества поверхности анализируемого изделия (вычисление длины, ширины и других геометрических характеристик с помощью известных алгоритмов). Это позволяет оператору-дефектоскописту анализировать снимок не более одной минуты, тогда как при ручном анализе время достигает 15 – 20 мин.

Визуальный экспертный анализ подтвердил достоверность результатов обработки и анализа капиллярных снимков на основе построенной методики.

Заключение. Получены следующие основные результаты:

1. Разработаны:

- модель полосового образа, приближенная по свойствам к реальным образам линий;

- метод многомасштабного воспроизведения полезного одномерного сигнала заданного вида;

- метод и алгоритм воспроизведения полос на основе интегрального преобразования по сегменту полосы;

- алгоритм синтеза полосового образа с варьированием кривизны и масштаба;

- алгоритмы оценки качества фильтрации, заключающиеся в корреляционном сравнении и сравнении по геометрическим характеристикам незашумленного и фильтрованного от шума изображения;

- методика обработки дефектоскопических изображений, полученных капиллярным методом.

2. Произведена статистическая оценка разработанного алгоритма воспроизведения полос на тестовых изображениях. Исследования показали высокое качество фильтрации полос.

3. Алгоритмы апробированы на реальных дефектоскопических изображениях, полученных капиллярным методом неразрушающего контроля.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков А.А. Построение технологии воспроизведения полос заданного профиля на цифровых изображениях [Текст] / Ермаков А.А., Садыков С.С. // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии». 2008. № 1 – 2/269(544). С.77 – 83.
2. Orlov A.A. Processing the band images on the defectoscopic pictures [Текст] / Orlov A.A., Sadykov S.S., Ermakov A.A. // 9th International Conference “Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies” (PRIA-9-2008): Conference Proceedings. Nizhny Novgorod: NNSU, 2008. V.2. P.104 – 106.
3. Орлов А.А. Технология сравнения и идентификации растровых изображений линий [Текст] / Орлов А.А., Ермаков А.А. // Программные продукты и системы. 2008. №1. С.68 – 70.
4. Орлов А.А. Фильтрация полосовых образов прямоугольного профиля [Текст] / Орлов А.А., Ермаков А.А. // Управление созданием и развитием систем, сетей и устройств телекоммуникаций: Труды научно-практической конференции. Спб.: СПбГПУ, 2008. С.138 – 143.
5. Орлов А.А. Применение интегральных преобразований по линиям в обработке изображений [Текст] / Орлов А.А., Садыков С.С., Ермаков А.А. // Распознавание – 2008. Сб. материалов VIII Междунар. конференции. Курск: Курск. гос. тех. ун-т., 2008. Ч.2. С.36 – 37.
6. Ермаков А.А. Алгоритм выделения полос на растровых изображениях [Текст] // Materialy IV mezinarnodnoni vedecko - prakticka konference "Veda a vznik - 2008/2009". Praha: Publishing House “Education and Science” s.r.o., 2009. P.46 – 48.
7. Орлов А.А. Фильтрация полосовых образов прямоугольного профиля [Текст] / Орлов А.А., Ермаков А.А. // Научно-технические ведомости

- СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Спб.: СПбГПУ. 2008. №3(60). С.52 – 56.
8. Орлов А.А. Выделение линейчатых образов в капиллярной дефектоскопии [Текст] / Орлов А.А., Ермаков А.А. // Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей. М.: ООО «Центр информационных технологий», 2007. С.138 – 143.
 9. Орлов А.А. Методика компьютерного анализа образов в капиллярной дефектоскопии [Текст] / Орлов А.А., Ермаков А.А. // Современные проблемы науки: Сборник материалов 1-й международной научно-практической конференции. Тамбов: Издательство «ТАМБОВПРИНТ», 2008. С.191 – 193.
 10. Садыков С.С. Теория, алгоритмы и методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках [Текст] / Садыков С.С., Орлов А.А., Ермаков А.А. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. №2. С.11 – 16.
 11. Ермаков А.А. Методы и алгоритмы обработки и анализа дефектоскопических и металлографических снимков [Текст] / Ермаков А.А., Орлов А.А., Садыков С.С., Стародубов Д.Н. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 112с.
 12. Зацепин Д.Б. Метод анализа рентгенографических снимков на наличие образов трещин сварного шва [Текст] / Зацепин Д.Б., Ермаков А.А. // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2008». Пенза: ПГУ, 2008. С.87 – 88.
 13. Зацепин Д.Б. Практическая адаптация интегральных преобразований двумерных сигналов по кривым в дефектоскопии [Текст] / Зацепин Д.Б., Ермаков А.А. // Материалы Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. Вологда: ВоГТУ, 2008, Т.1. С.82 – 83.
 14. Ермаков А.А. Методика обработки снимков в капиллярном контроле качества [Текст] // Труды Всероссийской межвузовской научной конференции "Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России". Муром: Изд-во пол. центр МИВлГУ, 2009. Т.1. С.110.
 15. Ермаков А.А. Алгоритм обработки капиллярных снимков [Текст] // Materialy V Miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji "Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci - 2009". Przemysl: Nauka i studia, 2009. P.11 – 13.
 16. Ермаков А.А. Фильтрация полос на дефектоскопических изображениях [Текст] / Ермаков А.А. // Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск: Издательство ТПУ, 2008. Т.2. С.296 – 297.
 17. Ермаков А.А. Метод цифровой обработки дефектоскопических изображений [Текст] / Ермаков А.А. // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXIV "Гагаринские чтения". М.: МАТИ, 2008. Т.3. С.198 – 200.
 18. Ермаков А.А. Анализ структуры дефектоскопических изображений [Текст] // Научные труды Международной молодежной научной конференции XXXIV "Гагаринские чтения". М.: МАТИ, 2008. Т.3. С.200 – 202.

UO'K: 62-50

B.M. AZIMOV, D.K. YAKUBJONOVA

TASHQI KUCHLAR TA'SIRIDAGI PAXTA TERISH MASHINASINING YUQORIGA KO'TARISHIDAGI VERTIKAL HARAKATINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH VA OPTIMAL BOSHQARISH

Maqolada paxta terish mashinasining turli sharoitlarda qiyaliklarda ko'tarilishi vaqtidagi vertikal harakatini o'rganish maqsadida modellashtirish va optimal boshqarish usullari ko'rib chiqiladi. Ikkinchi turdagi Lagranj tenglamasidan foydalanib, paxta terish mashinasini vertikal harakatlarining matematik modeli tuzildi. Paxta terish mashinasining harakatini optimal boshqarish uchun Pontryaginning maksimum prinsipining tez harakat masalasi qo'llanildi va sifat mezonlari asosida optimal boshqarish uchun zaruriy shart o'rganildi. Gamilton–Pontryagin funksiyasini shakllantirishi orqali qo'shma funksiyalar ishlab chiqilgan. Ushbu qo'shma funksiyalar boshqaruv algoritmining yechimini olishga imkon berganligi ko'rsatilgan. Ishlab chiqilgan matematik modellar asosida Pontryaginning chegaraviy masalasi shakllantirilgan. Runge–Kutta usullaridan foydalangan holda, berilgan mezon asosida chegaraviy masalalarini hal qilishda obyektning o'tish jarayonida harakat qiymatlari aniqlandi. Berilgan qarshilik kuchlari va massa orqali paxta terish mashinasining g'ildiraklari shinalarni qovushqoqlik va bikrlilik koeffitsiyentlari aniqlanadi. Sonli usulni qo'llash orqali mashinani har bir g'ildiragining dala yo'llarining turli xil notekisliklari sharoitida, qiyaliklarda ko'tarilish vaqtidagi harakatlari o'rganib chiqildi.

Kalit so'zlar: paxta terish mashinasi, vertikal harakat, modellashtirish, optimal boshqarish.

Б.М. Азимов, Д.К. Якубжонова

Математическое моделирование и оптимальное управление вертикальным движением хлопкоуборочной машины при подъеме под действием внешних сил

В статье рассматриваются методы моделирования и оптимального управления с целью изучения вертикального движения хлопкоуборочной машины при подъеме по склону в различных условиях. Используя уравнение Лагранжа второго рода, была построена математическая модель вертикального движения хлопкоуборочной машины. Для оптимального управления движением хлопкоуборочной машины применена задача быстрого действия принципа максимума Понтрягина и изучено необходимое условие для оптимального управления на основе критериев качества. Благодаря формированию функции Гамильтона–Понтрягина разработаны сопряженные функции. Показано, что эти сопряженные функции позволили получить решение алгоритма управления. На основе разработанных математических моделей сформулированы граничные задачи Понтрягина. С использованием методов Рунге–Кутты при решении граничных задач на основе заданного критерия установлены значения движения в переходном процессе объекта. Через заданные силы сопротивления и массы определены коэффициенты вязкого сопротивления и жесткости шин на колесах хлопкоуборочной машины. Численным методом исследованы движения каждого колеса машины в условиях различных неровностей полевых дорог во время подъема по склонам.

Ключевые слова: хлопкоуборочная машина, вертикальное движение, моделирование, оптимальное управление.

B.M. Azimov, D.K. Yakubjonova

Mathematical modeling and optimal control of the vertical movement of a cotton harvester in an upward direction under the influence of external forces

The article discusses methods of modeling and optimal control in order to study the vertical motion of a cotton harvester when it climbs a slope under various conditions. Using the second-order Lagrange equation, a mathematical model of the vertical motion of a cotton harvester was constructed. To optimize the control of the cotton harvester's motion, the Pontryagin maximum principle was applied, and the necessary condition for optimal control based on quality criteria was studied. By formulating the Hamilton-Pontryagin function, the conjugate functions were developed. It is shown that these conjugate functions allowed to obtain the solution of the control algorithm. Based on the developed mathematical models, the boundary Pontryagin problems are formulated. Using Runge–Kutta methods, the values of the object's transient motion were determined based on a given criterion when solving boundary value problems. The coefficients of viscous resistance and tire stiffness on the cotton harvester's wheels were determined using the given resistance forces and masses. The movements of each wheel of the harvester were numerically investigated under various field road irregularities and during hill climbing.

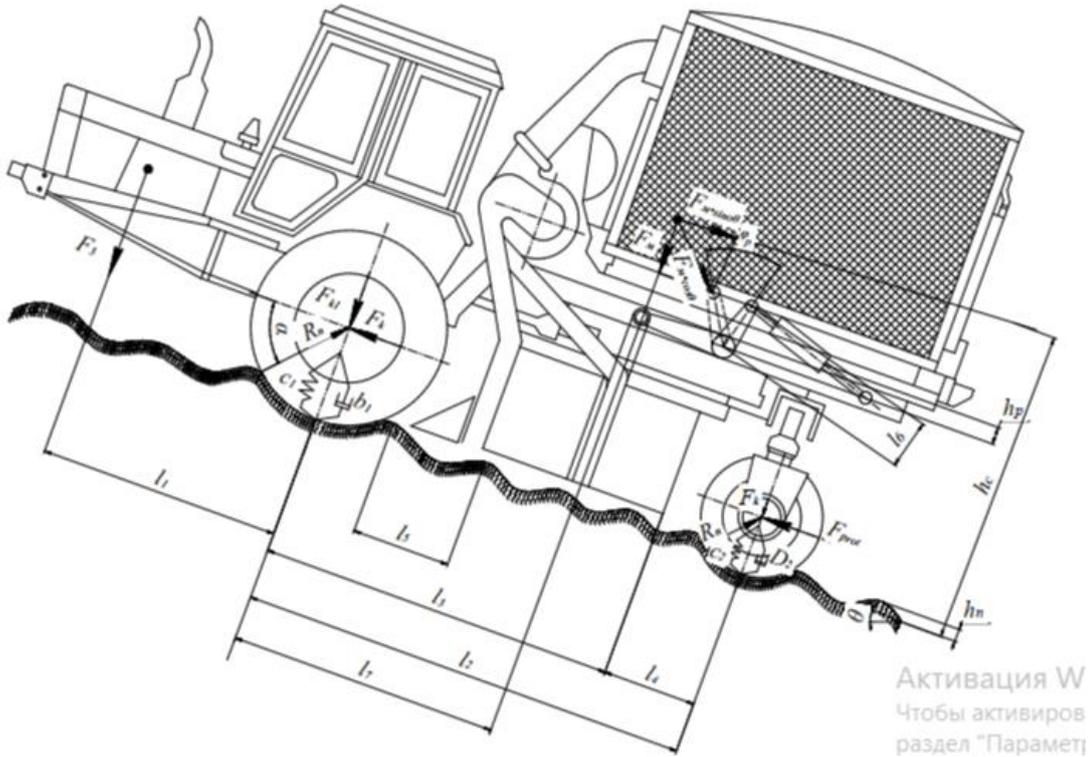
Keywords: cotton harvester, vertical motion, modeling, optimal control.

Paxta terish mashinasini (PTM) notekis yo‘l sharoitida turli trayektoriyalar bo‘ylab harakatini tadqiq qilish dolzarb muammolardan hisoblanadi. Mashinalar harakatini va uni boshqarish jarayonini o‘rganishda ko‘pincha biz mashina holatini aniqlash va harakat jarayonlarini boshqarish uchun asos bo‘ladigan modellashtirish bilan bog‘liq bo‘lgan muammoli vaziyatlarga duch kelamiz. Ushbu muammoli vaziyatlardan biri mashinalarning dinamik xususiyatlaridan kelib chiqib, modellashtirishda berilgan harakatdan chetga chiqish holatlarini minimallashtirish mezonini, ya‘ni yurish ravonligini ta‘minlab berish hisoblanadi.

PTM boshqariladigan dinamik tizimga mansub bo‘lib, turli trayektoriyalarda harakatlanganda har xil omillar ishlash samaradorligiga ta‘sir qiladi. MTA harakatining xususiyatlari va uning funksional maqsadiga mosligi ko‘p jihatdan uning mukammalligiga bog‘liq. Traktorlarning texnologik imkoniyatlari va ularni qo‘llashni yanada kengaytirish ularning harakatlanish jarayonini chuqur o‘rganishni talab etadi. Ushbu muammoli vaziyatlardan biri mashinalarning dinamik xususiyatlaridan kelib chiqib, modellashtirishda berilgan harakatdan chetga chiqish holatlarini minimallashtirish mezonini, ya‘ni yurish ravonligini ta‘minlab berish hisoblanadi.

Yo‘lning notekisliklarida mashinaning harakati uning g‘ildiraklarining parametrlari va harakati bilan bog‘liq. G‘ildirak orqali mashinaga uni yo‘l bilan bog‘lab turuvchi hamda mashina yurishi, to‘xtashi, yo‘nalishlarni o‘zgartirishga majburlovchi kuch kuzatiladi. Oddiy bo‘lib tuyulishiga qaramasdan, g‘ildirak belgilangan yo‘nalishda va aniqlik darajasiga asoslangan harakati turli modellar yordamida tasvirlanadigan va izohlanadigan murakkab qism hisoblanadi [1-20].

PTMning 1-rasm asosida 2-tur Lagranj tenglamalaridan foydalanib yuqoriga ko‘tarilishidagi vertikal tebranma harakatlarinig matematik modelini keltiramiz [1-12].



1- rasm. PTM yuqoriga ko‘tarilishidagi harakatining dinamik modeli.

Vertikal tebranma harakat uchun

$$\left. \begin{aligned}
 m_m \ddot{y}_m &= F_m \cdot \sin \alpha - b_{olch} (\dot{y}_m - \dot{y}_{olchg'}) - c_{olch} (y_m - y_{olchg'}) - b_{olo'} (\dot{y}_m - \dot{y}_{olo'g'}) - c_{olo'} (y_m - y_{olo'g'}) - \\
 &\quad - b_{orch} (\dot{y}_m - \dot{y}_{orchg'}) + c_{orch} (y_m - y_{orchg'}) - b_{oro'} (\dot{y}_m - \dot{y}_{oro'g'}) + c_{oro'} (y_m - y_{oro'g'}) \\
 m_{olchg'} \ddot{y}_{olchg'} &= b_{olch} (\dot{y}_m - \dot{y}_{olchg'}) + c_{olch} (y_m - y_{olchg'}) + m_{olchg'} (1 + f \cos \theta) \frac{2\pi^2 V_{olchg'}^2}{l_5^2} h_q (1 - \cos \frac{2\pi V_{olchg'} t}{l_5}) \\
 m_{olo'g'} \ddot{y}_{olo'g'} &= b_{olo'} (\dot{y}_m - \dot{y}_{olo'g'}) + c_{olo'} (y_m - y_{olo'g'}) + m_{olo'g'} (1 + f \cos \theta) \frac{2\pi^2 V_{olo'g'}^2}{l_5^2} h_q (1 - \cos \frac{2\pi V_{olo'g'} t}{l_5}) \\
 (m_{orchg'} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{y}_{orchg'} &= b_{orch} (\dot{y}_m - \dot{y}_{orchg'}) + c_{orch} (y_m - y_{orchg'}) + \\
 &\quad + (m_{orchg'} - 0.5 \cdot m_d) (1 + f \cos \theta) \frac{2\pi^2 V_{orchg'}^2}{l_5^2} h_q (1 - \cos \frac{2\pi V_{orchg'} t}{l_5}) \\
 (m_{oro'g'} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{y}_{oro'g'} &= b_{oro'} (\dot{y}_m - \dot{y}_{oro'g'}) + c_{oro'} (y_m - y_{oro'g'}) + \\
 &\quad + (m_{oro'g'} - 0.5 \cdot m_d) (1 + f \cos \theta) \frac{2\pi^2 V_{oro'g'}^2}{l_5^2} h_q (1 - \cos \frac{2\pi V_{oro'g'} t}{l_5})
 \end{aligned} \right\} (1)$$

bu yerda, \dot{y}_i va \ddot{y}_i – mashinaning, old va orqa g‘ildiraklarning chiziqli tezligi va tezlashishi; α – g‘ildirakning yo‘l bilan ilashgan nuqtasi burchagi; b_{olch} , $b_{olo'}$, b_{orch} , $b_{oro'}$, c_{olch} , $c_{olo'}$, c_{orch} , $c_{oro'}$ – mashinaning oldingi chap va o‘ng, orqa chap va o‘ng g‘ildiraklari shinalarining qovushqoqlik va bikrlik koeffitsiyentlari m_{olch} , $m_{olo'}$, m_{orch} , $m_{oro'}$, m_d , – mashinaning old chap va o‘ng, orqa chap va o‘ng g‘ildiraklari hamda dvigatelli bo‘ylab massa taqsimlanishi; h_q – yo‘lning notekisligi balandligi; h_c – mashina massasi markazining balandligi; V_{olch} , $V_{olo'}$, V_{orch} , $V_{oro'}$ – oldingi chap va o‘ng, orqa chap va o‘ng g‘ildiraklarning harakat tezligi; l_5 – notekisliklar orasidagi masofalar; θ – PTMni balandlikga ko‘tarilish burchagi; f – g‘ildiraklarning qarshilik koeffitsiyenti.

PTM yuqoriga harakatlanganda inersiya kuchi qarshi tomonga yo‘naladi.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi gorizontaal tebranma harakatini optimal boshqarish algoritmini ishlab chiqish. PTMning 1-rasm asosida yuqoriga ko'tarilishidagi harakatining gorizontaal tebranma harakatlarinig matematik modelini keltiramiz [1-12].

$$\left. \begin{aligned}
 m_m \ddot{x}_m &= F_m - b_{och}(\dot{x}_m - \dot{x}_{olch}) - c_{och}(x_m - x_{olch}) - b_{oo'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{olo'g'}) - c_{oo'}(x_m - x_{olo'g'}) - \\
 &\quad - b_{orch}(\dot{x}_m - \dot{x}_{orchg}) + c_{orch}(x_m - x_{orchg}) - b_{oro'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'}(x_m - x_{oro'g'}) \\
 m_{olchg'} \ddot{x}_{olchg'} &= b_{olch}(\dot{x}_m - \dot{x}_{olchg'}) + c_{olch}(x_m - x_{olchg'}) + m_{olchg'}(1 + \sin \theta) \frac{2\pi^2 V^2}{l_5^2} h_q \sin \frac{2\pi V_{olchg'}}{l_5} t \\
 m_{olo'g'} \ddot{x}_{olo'g'} &= b_{olo'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{olo'g'}) + c_{olo'}(x_m - x_{olo'g'}) + m_{olo'g'}(1 + \sin \theta) \frac{2\pi^2 V^2}{l_5^2} h_q \sin \frac{2\pi V_{olo'g'}}{l_5} t \\
 (m_{orchg'} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{x}_{orchg'} &= b_{orch}(\dot{x}_m - \dot{x}_{orchg}) + c_{orch}(x_m - x_{orchg}) - \\
 &\quad + (m_{orchg'} - 0.5 \cdot m_d)(1 + \sin \theta) \frac{2\pi^2 V^2}{l_5^2} h_q \sin \frac{2\pi V_{orchg'}}{l_5} t \\
 (m_{oro'g'} - 0.5 \cdot m_d) \ddot{x}_{oro'g'} &= b_{oro'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'}(x_m - x_{oro'g'}) - \\
 &\quad + (m_{oro'g'} - 0.5 \cdot m_d)(1 + \sin \theta) \frac{2\pi^2 V^2}{l_5^2} h_q \sin \frac{2\pi V_{oro'g'}}{l_5} t
 \end{aligned} \right\} (2)$$

Masalani yechishda optimal tizimlar nazariyasidan foydalanamiz. Bu yerda mezon sifatida tez harakat masalasi muhim rol o'ynaydi [13,14].

Optimal boshqarish masalasini keltiramiz. PTM harakati vaqtning boshlang'ich holatidagi quyidagicha ko'rinishda bo'lsin:

$$x_i(0) = x_0(0), \quad \dot{x}_i(0) = \dot{x}_0(0). \quad (3)$$

Shunday $u(t)$ boshqarishni topish kerakki, PTM harakatini boshlang'ich holatdan berilgan holatga olib o'tsin:

$$x_i(t) = x_0(t), \quad \dot{x}_i(t) = \dot{x}_0(t) \quad (i = 1, n), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (4)$$

Bunda o'tish jarayoni vaqti qisqa bo'lishi talab qilinadi. U holda boshqarishdan maqsad funksionalni (3) va (4) shartlar asosida minimumga keltiriladi.

$$J(x_0, u(t), x(t)) = \int_{t_0}^T f^0(x(t), u(t), t) dt + g^0(q_0, g(T)). \quad (5)$$

(3), (4) shartlarda

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (6)$$

funksiyalar berilgan bo'lsin

$$g^i(q_0, q(T)) \leq 0, \quad i=1, \dots, m; \quad g^i(q_0, q(T)) = 0, \quad i = m+1, \dots, s, \quad (7)$$

$$u \in U, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (8)$$

bu yerda, $f(\dots)$ —uzluksiz differensiallanuvchi funksiya; $u(t)$ — $[t_0, T]$ oraliqdagi bo'lakli-uzluksiz funksiya.

PTM harakatini optimal boshqarishning zaruriy shartini tadqiq qilish uchun Pontryaginning maksimum prinsipidan foydalanamiz [13,14].

Maksimum prinsipini shakllantirish uchun Gamilton-Pontryagin funksiyasini

$$H = (x, u, t, \psi_i, \psi_0) = -f^0(x, u, t) + \langle \psi, u \rangle \quad (9)$$

va qo'shma tizim

$$\left. \begin{aligned}
\frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_m}{\partial x_1} = -m_m^{-1}(c_{och} + c_{oo'} + c_{orch} + c_{oro'})\psi_2, \\
\frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_m}{\partial x_2} = -\psi_1 + m_m^{-1}(b_{och} + b_{oo'} + b_{orch} + b_{oro'})\psi_2; \\
\frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_{och}}{\partial y_3} = -m_{ochg}^{-1}c_{och}\psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_{och}}{\partial x_4} = -\psi_1 + m_{ochg}^{-1}b_{och}\psi_2; \\
\frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_{oo'}}{\partial y_5} = -m_{oo'g}^{-1}c_{oo'}\psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_{oo'}}{\partial x_6} = -\psi_1 + m_{oo'g}^{-1}b_{oo'}\psi_2; \\
\frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_{orch}}{\partial y_7} = -m_{orchg}^{-1}c_{orch}\psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_{orch}}{\partial x_8} = -\psi_1 + m_{orchg}^{-1}b_{orch}\psi_2; \\
\frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{\partial H_{oro'}}{\partial y_9} = -m_{oro'g}^{-1}c_{oro'}\psi_2, & \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{\partial H_{oro'}}{\partial x_{10}} = -\psi_1 + m_{oro'g}^{-1}b_{oro'}\psi_2
\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

kiritamiz. Boshqarish chegarasi $|u| \leq 1$.

Qaralayotgan masalani yechish uchun quyidagi zaruriy shart bajarilishi kerak:

$$H(x_i(t), u(t), t, \psi_i, \psi_0) = \max_{u \in U} H(x_i(t), u, t, \psi_i(t), \psi_0). \quad (11)$$

(9) asosida optimal boshqarishni aniqlashga o'tishdan oldin funksiyani shakllantiramiz.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakati uchun

$$\left. \begin{aligned}
x_m &= x_1, \dot{x}_m = x_2, \dot{x}_2 = u_m - m_m^{-1}[b_{och}(\dot{x}_m - \dot{x}_{ochg'}) - c_{och}(x_m - x_{ochg'}) - b_{oo'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oo'g'}) - \\
&\quad - c_{oo'}(x_m - x_{oo'g'}) - b_{orch}(\dot{x}_m - \dot{x}_{orchg'}) - c_{orch}(x_m - x_{orchg'}) - \\
&\quad - b_{oro'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oro'g'}) - c_{oro'g'}(x_m - x_{oro'g'})]; \\
x_{ochg'} &= x_3, \dot{x}_{ochg'} = x_4, \dot{x}_4 = m_{ochg}^{-1}[b_{och}(\dot{x}_m - \dot{x}_{ochg'}) + c_{och}(x_m - x_{ochg'})] + u_{ochg'}(1 + \sin \theta); \\
x_{oo'g'} &= x_5, \dot{x}_{oo'g'} = x_6, \dot{x}_6 = m_{oo'g}^{-1}[b_{oo'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oo'g'}) + c_{oo'}(x_m - x_{oo'g'})] + u_{oo'g'}(1 + \sin \theta); \\
x_{orchg'} &= x_7, \dot{x}_{orchg'} = x_8, \dot{x}_8 = (m_{orchg} - 0.5 \cdot m_d)^{-1}[b_{orch}(\dot{x}_m - \dot{x}_{orchg'}) + c_{orch}(x_m - x_{orchg'})] + u_{orchg'}(1 + \sin \theta); \\
x_{oro'g'} &= x_9, \dot{x}_{oro'g'} = x_{10}, \dot{x}_{10} = (m_{oro'g} - 0.5 \cdot m_d)^{-1}[b_{oro'}(\dot{x}_m - \dot{x}_{oro'g'}) + c_{oro'g'}(x_m - x_{oro'g'})] + u_{oro'g'}(1 + \sin \theta).
\end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

Xuddi shunday, agar $f^0 \equiv 1$, $g^0 \equiv 0$, unda $J(q_0, u(t), q(t)) = T - t_0$ - bu holda (5)-(8) masalalarni tez harakat masalasi deyiladi.

Qaralayotgan obyekt statsionar tizim hisoblanadi va (5) masala shuni ko'rsatadiki, vaqtga bog'liq emas, ya'ni

$$f(t, q, u) = f(q, u), \quad U(t) = U. \quad (13)$$

Agar statsionar masala (5), (13) optimal boshqarish $u(t)$ va optimal trayektoriya $x_0(t)$ ga ega bo'lsa, u holda (9) shartni qoniqtiruvchi, trivial bo'lmagan qo'shma o'zgaruvchilar $(\psi_1(t), \psi_2(t))$, $\psi(t) \in R^n$ nolga teng bo'lmagan vektori mavjudki, ya'ni (11) maksimum sharti bajariladi [9]:

$$\psi_0(t) = const \leq 0. \quad (14)$$

Xuddi shunday (10) qo'shma tizim ψ_i ga nisbatan bir jinsli hisoblanadi, (14) tenglamadagi o'zgarimasni ixtiyoriy tanlash mumkin, shunday qilib

$$\psi_0(t) = -1 \quad 0 \leq t \leq T. \quad (15)$$

$\psi_2 \neq 0$ da $\max_{|u| < 1} H$ shartidan $u = \text{sign}\psi_2$ kelib chiqadi, agar $\psi_2 \neq 0$ bo'lsa, unda maksimum prinsipining chegaraviy masalasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakati uchun

$$\left. \begin{aligned}
 x_m = x_1, \dot{x}_m = x_2, \dot{x}_2 = \text{sign}\psi_2 - m_m^{-1} [b_{\text{och}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{ochg}'}) - c_{\text{och}}(x_m - x_{\text{ochg}'}) - b_{\text{oo}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{oo}'}) - \\
 - c_{\text{oo}}(x_m - x_{\text{oo}'}) - b_{\text{orch}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{orchg}'}) - c_{\text{orch}}(x_m - x_{\text{orchg}'}) - \\
 - b_{\text{oro}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{oro}'}) - c_{\text{oro}}(x_m - x_{\text{oro}'})]; \\
 x_{\text{ochg}'} = x_3, \dot{x}_{\text{ochg}'} = x_4, \dot{x}_4 = m_{\text{ochg}'}^{-1} [b_{\text{och}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{ochg}'}) + c_{\text{och}}(x_m - x_{\text{ochg}'})] + \text{sign}\psi_2(1 + \sin\theta); \\
 x_{\text{oo}'g'} = x_5, \dot{x}_{\text{oo}'g'} = x_6, \dot{x}_6 = m_{\text{oo}'g'}^{-1} [b_{\text{oo}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{oo}'g'}) + c_{\text{oo}}(x_m - x_{\text{oo}'g'})] + \text{sign}\psi_2(1 + \sin\theta); \\
 x_{\text{orchg}'} = x_7, \dot{x}_{\text{orchg}'} = x_8, \dot{x}_8 = (m_{\text{orchg}'} - 0.5 \cdot m_d)^{-1} [b_{\text{orch}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{orchg}'}) + c_{\text{orch}}(x_m - x_{\text{orchg}'})] + \text{sign}\psi_2(1 + \sin\theta); \\
 x_{\text{oro}'g'} = x_9, \dot{x}_{\text{oro}'g'} = x_{10}, \dot{x}_{10} = (m_{\text{oro}'g'} - 0.5 \cdot m_d)^{-1} [b_{\text{oro}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{oro}'g'}) + c_{\text{oro}}(x_m - x_{\text{oro}'g'})] + \text{sign}\psi_2(1 + \sin\theta)
 \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Ushbu holatlarda maksimum prinsipning chegaraviy masalasi (16) tizimdan, (11) dan kelib chiqadigan chegara shartlaridan (3) va (4) va (15) shartlardan iborat bo'ladi.

Quyidagi shaklga ega bo'lgan Gamilton-Pontryagin funksiyasini tuzamiz [1-14]:

$$\left. \begin{aligned}
 H_M = \psi_0 + \psi_1 y_2 + \psi_2 \dot{y}_2 \\
 H_1 = \psi_0 + \psi_1 y_4 + \psi_2 \dot{y}_4 \\
 H_2 = \psi_0 + \psi_1 y_6 + \psi_2 \dot{y}_6
 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Bundan kelib chiqadiki, (11) shart $u = \text{sign}\psi_2$, $\psi_2 \neq 0$ funksiyani ajratadi, ya'ni, bu holda chegara muammosi (16) quyidagilardan iborat:

$$H_i = -f^0 u + \psi_2(t) u_M. \quad (18)$$

$u = +1$, $u = -1$ oralig'ida (10), (18) tadqiq qilishga o'tamiz.

$\psi_2(t)$ funksiya $[t_0, t]$ kesimda birdan ortiq nolga ega bo'lmasligini ko'rsatamiz. Bunday, ya'ni $\psi_2(t) = 0: t \in [t_0, T]$ bo'lmasin. Unda, agar $t \in [t_0, T]$ nuqtalarda funksiya $\psi_2(t) \neq 0$ bo'lsa, u holda (11), doimiy $\psi_1 = -\dot{\psi}_2(t)$ bo'lsa, bu mumkin emas. Endi t_i nuqtalaridan birida funksiya grafigi t o'qiga tegsin. Unda $\psi_2(t) = 0$, ya'ni (11) doimiy $\psi_1 = 0$ kuchga ega. Bu yerdan

$$H \equiv 0, \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (19)$$

$\psi_0 = 0$ dan kelib chiqadi. Demak, (11), (15) ga zid bo'lgan ayniyat mavjud.

$$\psi_2(t) = 0, \quad t \in [t_0, T], \quad \psi_1 = 0, \quad \psi_0 = 0 \quad (20)$$

(20) tenglik mumkin emas, chunki $\psi_2(t)$ yuqorida faqat bitta nolga ega bo'lishi mumkinligi aniqlangan. Shunday qilib $\psi_0 \leq 0$. Bunday holda, (20) dan quyidagilar kelib chiqadi:

$$u_k = \text{sign} \psi_2(t) = \begin{cases} 1, & \psi_2(t) > 1 \\ -1, & \psi_2(t) < 1 \end{cases}, \quad k=2, 4, \dots, 2n; \quad (21)$$

Ya'ni boshqarish $u_k(t)$ bitta nuqtada almashlab ulash imkoniyatiga ega.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakatini tadqiq qilish uchun Embarcadero Delphi XE3 dasturlash muhitida Runge-Kutta sonli usulini qo'llab dastur vositasi ishlab chiqildi. Boshlang'ich shart $t=0$ asosida hisoblash eksperimenti o'tkazildi. 2- rasmda boshlag'ch parametrlar va 3-rasmlarda hisoblash natijalari keltirilgan.

Hisoblash eksperimentlari PTM g'ildiragi shinalarining bukilishlari $h_{sh}=30\text{mm}=0.03\text{m}$ bo'lganda quyidagi parametrlarda o'tkazilgan.

PTMni balandlikka ko'tarilishidagi gorizontaal tebranishlari va optimal bosh...

Kiritish parametrlari

PTMning massasi (J1, kg) PTMni old ko'prigining eni (Bpk, m)

Oldingi chap g'ildirakning massasi (J2L, kg) PTMni orqa ko'prigining eni (Bzk, m)

Oldingi o'ng g'ildirakning massasi (j2P, kg) Shinaning bukilishi (hs, m)

Orqa chap g'ildirakning massasi (J3L, kg) Gorizontaal tebranishlar tezligi (vx, m/s)

Orqa o'ng g'ildirakning massasi (J3P, kg) PTMni qiyalanish burchagi (beta, grad.)

Dvigatelning massasi (J4, kg) Doimiy (g, m/s²)

Massalar markazining balandligi (hc, m) Boshqaruv (uk)

PTMni balandlikka ko'tarilish burchagi (teta, grad.)

Hisoblash parametrlari

Hisoblash vaqti (t_kon, s) h printni qiymati

Hisoblash qadami: h_calcul Grafiklarni kvantlanishi

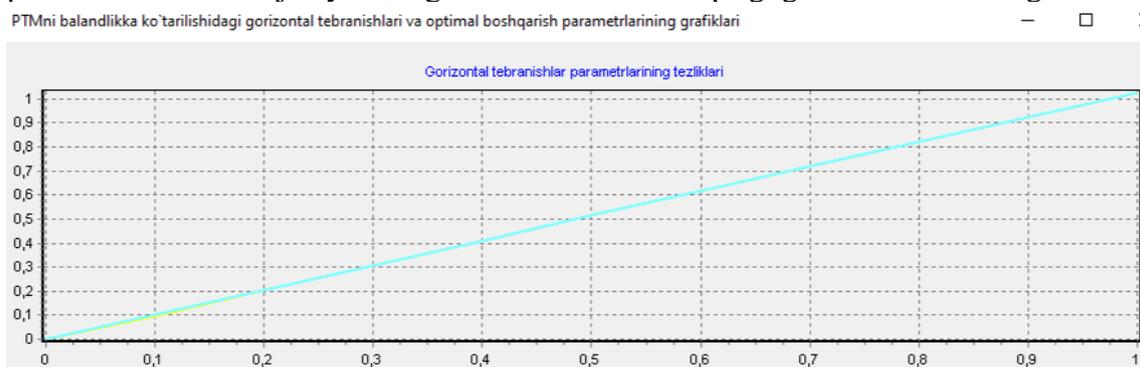
2-rasm. PTM harakatini optimal boshqarishni hisoblash uchun boshlang'ich parametrlar.

PTMni balandlikka ko'tarilishidagi gorizontaal tebranishlari va optimal boshqarish parametrlarining hisoblash natijalari

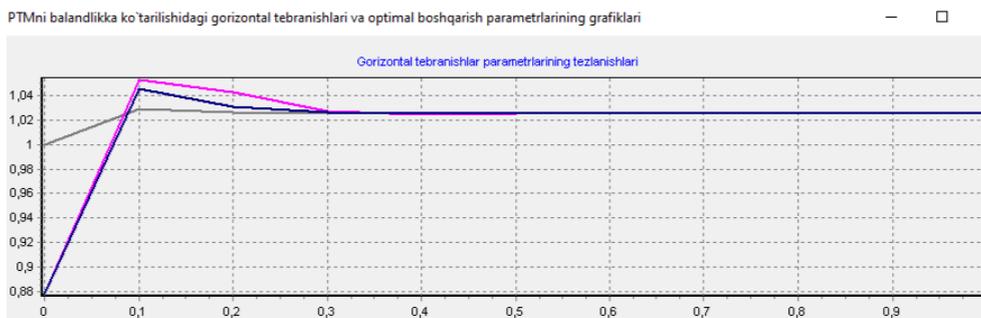
t - vaqt	f1 - PTM	f2 - PTM	f3 - PTM	f4 - PTM	f5 - PTM	f6 - PTM	f7 - PTM	f8 - PTM	f9 - PTM	f10 - PTM
0	0	1	0	0,87813	0	0,87813	0	0,87813	0	0,87813
0.1	0,10229	1,02905	0,09925	1,05284	0,09925	1,05284	0,10104	1,04563	0,10104	1,04563
0.2	0,20507	1,02652	0,20445	1,04243	0,20445	1,04243	0,20483	1,031	0,20483	1,031
0.3	0,30767	1,02571	0,30777	1,02697	0,30777	1,02697	0,30764	1,02635	0,30764	1,02635
0.4	0,41023	1,02559	0,41029	1,02473	0,41029	1,02473	0,41023	1,02565	0,41023	1,02565
0.5	0,51279	1,02558	0,51279	1,02531	0,51279	1,02531	0,51279	1,02558	0,51279	1,02558
0.6	0,61534	1,02557	0,61534	1,02557	0,61534	1,02557	0,61534	1,02557	0,61534	1,02557
0.7	0,7179	1,02557	0,7179	1,02559	0,7179	1,02559	0,7179	1,02557	0,7179	1,02557
0.8	0,82046	1,02557	0,82046	1,02558	0,82046	1,02558	0,82046	1,02557	0,82046	1,02557
0.9	0,92302	1,02557	0,92302	1,02557	0,92302	1,02557	0,92302	1,02557	0,92302	1,02557
1	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557	1,02557

3- rasm. Hisoblash natijalari.

Hisoblash natijalari 4,5- rasmlarda alohida "Tezliklar", "Tezlanishlar" harakat parametrlarini o'tish jarayonining $u=+I$ va $u=-I$ oraliqdagi grafiklarida keltirilgan.



4-rasm. PTM harakatini o'tish jarayonidagi tezliklar grafiklari.



5-rasm. PTM harakatini o'tish jarayonidagi tezlanishlar grafiklari.

Shunday qilib, PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi gorizontaal tebranma harakatini optimal boshqarish va dasturiy vositasi ishlab chiqildi.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi vertikal tebranma harakatini tadqiq qilish uchun quyidagi boshlang'ich parametrlarda (6-rasm) hisoblash eksperimenti o'tkazildi va 7,8-rasmlarda olingan natijalar, 9,10 – rasmlarda ularning grafik ko'rinishlari keltirilgan.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi vertikal tebranishlari parametrlarini hisoblash uchun dastlabki ma'lumotlar va ko'rsatmalar

Kiritish parametrlari

PTMning massasi (J1, kg)	7714,0	Vertikal tebranishlarda PTMni harakatlantiruvchi kuch (M1, N)	17155,0	PTMni old ko'prigining kengligi (Bpk, m)	1,8
Oldingi chap g'ildirakning massasi (J2, kg)	2557,0	PTMni orqa g'ildiragining radiusi (rk1, m)	0,43	PTMni orqa ko'prigining kengligi (Bzk, m)	1,8
Oldingi o'ng g'ildirakning massasi (J2P, kg)	2557,0	PTMni oldingi g'ildiragining radiusi (rk2, m)	0,785	Oldingi g'ildirak shinasining kengligi (bp, m)	0,394
Orqa chap g'ildirakning massasi (J3L, kg)	1300,0	Tebranma valning ichki diametri (d, m)	0,075	Orqa g'ildirak shinasining kengligi (bz, m)	0,254
Orqa o'ng g'ildirakning massasi (J3P, kg)	1300,0	Tebranma valning tashqi diametri (D, m)	0,095	Shinadagi bosim (Si, atm.b.)	103100
Dvigateling massasi (J4, kg)	1262,0	Tebranma valning tashqi radiusi (rv, m)	0,0475	Shinaning bukishi (hs, m)	0,03
Gidrosilindri ulash richagining inertsia momenti (J5, kg)	552,96	Tebranma valning uzunligi (Lv, m)	0,96	Yig'ish apparatlarini ilish uchun mo'ljallangan richagning uzunligi (Ln, m)	0,64
Yig'ish apparatlarining ilgaklari richagining inertsia momenti (J6, kg)	276,48	Yo'ning notekisligi balandligi (hp, m)	0,07	Gidrosilindri ulash uchun mo'ljallangan richagning uzunligi (Lp, m)	0,35
Yig'ish apparatining massasi (J7, kg)	675	Chap g'ildiraklar uchun notekisliklar oraliqi (l, m)	0,9	Gidrosilindrdagi kuch (gs, N)	2245,5
Vertikal tebranishlar tezligi (vx, m/s)	1,2	O'ng g'ildiraklar uchun notekisliklar oraliqi (lp, m)	0,9	Massalar markazining balandligi (hc, m)	2
PTMni qiyalanish burchagi (beta, grad.)	0	Oldingi g'ildirak shinasini o'rnatish diametri (dp, m)	0,9652	Doimiy (g, m/s^2)	9,81
PTM g'ildiraklarini notekisliklarga urinish burchagi (alpha, grad.)	45	Orqa g'ildirak shinasini o'rnatish diametri (dz, m)	0,4064	Tuproqni hajmli chiqarish koeffitsiyenti (kg, N/m^3)	1600000
PTMni balandlikka ko'tarilish burchagi (teta, grad.)	7	G'ildirashning qarshilik koeffitsiyenti (f)	0,03		

Hisoblash parametrlari

Hisoblash vaqti (t_kon, s)	1	h printni qiymati	0,1
Hisoblash qadami: h_calcul	0,00001	Grafiklarni kvantlanishi	4

6-rasm. PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi vertikal tebranishlarini hisoblash uchun boshlang'ich parametrlar.

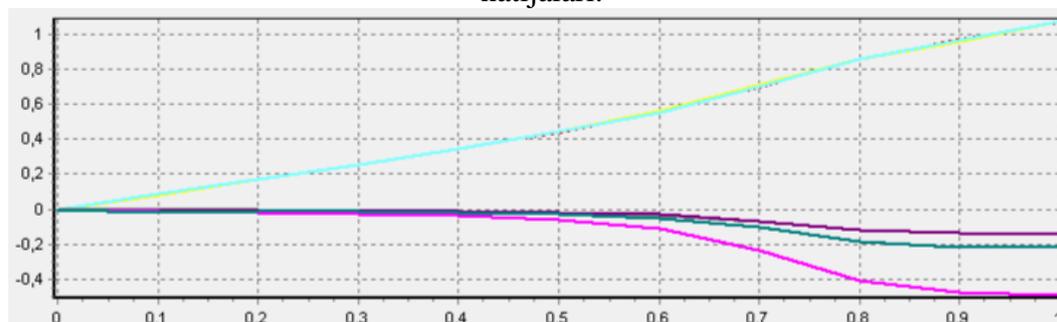
PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi vertikal tebranishlari parametrlarining hisoblangan qiymatlari:

t - vaqt	f1 - PTM	f2 - PTM	f3 - PTM	f4 - PTM	f5 - PTM	f6 - PTM	f7 - PTM	f8 - PTM	f9 - PTM	f10 - PTM	f11 - PTM	f12 - PTM	f13 - PTM	f14 - PTM
0	0	1,57252	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,19277	0	-2,45706
0,1	0,09103	0,78462	0,07728	0,96248	0,07728	0,96248	0,08642	0,86385	0,08642	0,86385	-0,00416	-0,0232	-0,01153	0,07888
0,2	0,17237	0,83725	0,1697	0,88843	0,1697	0,88843	0,17099	0,85027	0,17099	0,85027	-0,00608	-0,01834	-0,00771	0,00719
0,3	0,25731	0,85916	0,25714	0,86996	0,25714	0,86996	0,2569	0,86689	0,2569	0,86689	-0,00805	-0,02185	-0,00837	-0,016
0,4	0,34455	0,89167	0,3454	0,90499	0,3454	0,90499	0,34492	0,90057	0,34492	0,90057	-0,01083	-0,03734	-0,01077	-0,03429
0,5	0,4379	0,99292	0,44095	1,02614	0,44095	1,02614	0,43953	1,01069	0,43953	1,01069	-0,01678	-0,09173	-0,01635	-0,08724
0,6	0,54826	1,24713	0,55611	1,30874	0,55611	1,30874	0,55232	1,27679	0,55232	1,27679	-0,03229	-0,23997	-0,03136	-0,23518
0,7	0,69273	1,63688	0,70508	1,62497	0,70508	1,62497	0,69864	1,62367	0,69864	1,62367	-0,06873	-0,4885	-0,06764	-0,49191
0,8	0,85754	1,4987	0,85589	1,26508	0,85589	1,26508	0,85557	1,37674	0,85557	1,37674	-0,11816	-0,39338	-0,11818	-0,41191
0,9	0,97408	0,87259	0,958	0,88191	0,958	0,88191	0,96646	0,91422	0,96646	0,91422	-0,13694	-0,02333	-0,13881	-0,03199
1	1,06396	1,21723	1,0707	1,74852	1,0707	1,74852	1,0711	1,48771	1,0711	1,48771	-0,14207	-0,23736	-0,1412	-0,17903

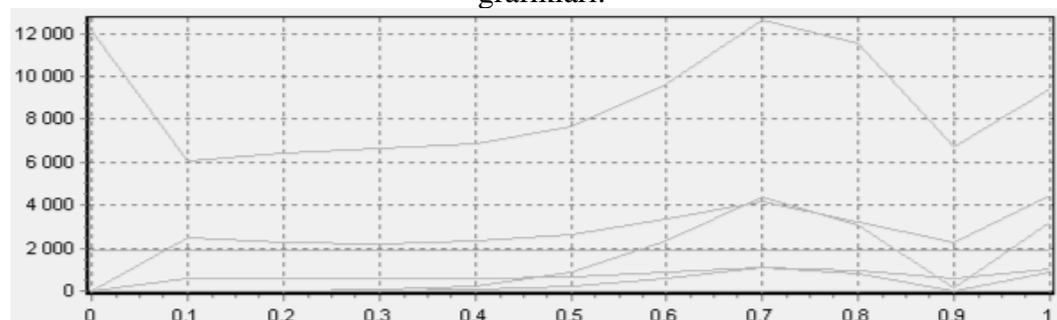
7-rasm. PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakatining vertikal tebranishlarini hisoblash natijalari.

PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi vertikal tebranishlari parametrlarining hisoblangan qiymatlari:															
mm - PTi	mk1L - P	Mk1P - F	Mk2L - F	Mk2P - F	Rapl - PT	Rbpp - P	Razl - PT	Rbzp - P	im - PTM	jpl - PTM	ipp - PTM	jzl - PTM	jzp - PTM	rpl - PTM	
12130,41	0	0	0	0	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
6052,58E	2461,05E	2461,05E	577,914E	577,914E	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
6458,52C	2271,707	2271,707	568,8297	568,8297	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
6627,523	2224,49C	2224,49C	579,952C	579,952C	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
6878,37E	2314,061	2314,061	602,4807	602,4807	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
7659,394	2623,844	2623,844	676,149C	676,149C	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
9620,344	3346,454	3346,454	854,1757	854,1757	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
12626,87	4155,05E	4155,05E	1086,23E	1086,23E	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
11560,94	3234,801	3234,801	921,039E	921,039E	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
6731,173	2255,05E	2255,05E	611,6134	611,6134	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	
9389,693	4470,96E	4470,96E	995,2797	995,2797	6271,042	6271,042	3188,25	3188,25	7714	2557	2557	1300	1300	0,4	

8-rasm. PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakatining vertikal tebranishlarini hisoblash natijalari.



9-rasm. PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakatining vertikal tebranishlarini tezliklari grafiklari.



10-rasm. PTMni yuqoriga ko'tarilishidagi harakatining vertikal tebranishlarini tezlanishlari grafiklari.

Tashqi kuchlar ta'siridagi PTMning funksional-konstruktiv parametrlarini aniqlash uchun balandlikga ko'tarilishidagi vertikal harakati tavsiflarini tadqiq qilish imkonini beruvchi dinamik jarayonlarini hisoblash eksperimentlarinig dasturiy vositalari ishlab chiqildi.

Xulosa. Tashqi kuchlar ta'siridagi PTMning yuqoriga ko'tarilishidagi gorizontaal tebranma harakatini optimal boshqarish algoritmi va dasturiy vositalar ishlab chiqildi.

1. Olingan harakat tenglamalari asosida PTMning yuqoriga ko'tarilishidagi gorizontaal tebranma harakatlarini optimal boshqarishning algoritmi va Pontryaginining chegaraviy masalasi shakllantirildi.

2. PTMning $\theta=7^0$ qiyalikdagi yuqoriga ko'tarilishidagi gorizontaal tebranma harakatlarini optimal boshqarishning algoritmi asosida hisoblash eksperimentlarining dasturiy vositasi ishlab chiqildi.

3. Olingan harakat tenglamalari asosida PTMning $\theta=7^0$ burchakli qiyalik bo‘ylab yuqoriga ko‘tarilishidagi vertikal harakatini hisoblash eksperimentlarining natijalari tortish kuchi vertikal harakat bo‘yicha $mm=17155 N$ sarfini ko‘rsatdi.

4. PTMning $\theta=7^0$ burchakli qiyalik bo‘ylab yuqoriga ko‘tarilishidagi vertikal harakatini hisoblash eksperimentlarining natijalari yuqoriga ko‘tarilishda inersiya kuchlari yo‘nalishga qarshi bo‘lganligi sababli tortish kuchi ko‘proq sarf bo‘lishini ko‘rsatdi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Azimov B.M., Yakubjanova D.K. Imitation modeling and calculation of the parameters of Lateral forces components of guide wheels of Cotton-picker MH-1.8 // International jurnal of advanced research in science, engineering and technology. Vol. 5. 2018. Is. 1. P. 5024 – 5032.
2. Azimov B.M., Yakubjanova D.K., Kubaev S.T. Modeling and optimal control of motion of cotton harvester MH-2.4 under horizontal oscillations // International jurnal of advanced research in science, engineering and technology. Vol. 5. 2018. Is. 9. P. 6906 – 6914.
3. Azimov B.M., Yakubjanova D.K. Modeling and optimal control of motion of cotton harvesting machines MX-1.8 and hitching systems of picking apparatus under vertical oscillations // Journal of Physics: Conference Series, 2019, DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012004.
4. Азимов Б.М., Кубаев С.Т. Исследование и оценка алгоритма устойчивости движения хлопкоуборочной машины MX-2.4 и навесной системы уборочных аппаратов при вертикальных колебаниях. – Ташкент, 2019. №3(21). С.19 – 29.
5. Azimov B.M., Kubaev S.T., Axmedov Sh.A., Yakubjanova D.K. Motion study of four-row cotton harvester and the hitch system of harvesting unit under vertical vibrations // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research in Dynamical (IJMPERD). Vol. 10. Issue 3, Jun 2020. P. 5501 – 5510.
6. Azimov B.M., Ikhsanova S.Z. Motion simulation and calculation of the components of the lateral forces of the guiding wheels of a cotton-harvesting machine// Tractors and Agricultural Machinery. 2023. 90(2). P. 107–115.
7. Азимов Б.М., Рузикулов А.Р., Ихсанова Ш.З. Моделирование и оптимальное управление движением хлопкоуборочной машины при различных условиях неровности полевых дорог// Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Ташкент, 2023. №1.С.3 – 14.
8. Азимов Б.М., Якубжанова Д.К., Кубаев С.Т. Математические модели и алгоритмы управления хлопкоуборочными машинами при различных условиях движения. – Т.: “Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi”, 2022, 136с.
9. Azimov B.M., Abdazimov A.D., Sherqobilov S.M., Ihsanova Sh.Z. Modeling and numerical methods for studying the movement of a semimoun-ted cotton harvesting machine // IOP conference Series: Earth and Environmental Science. 1076 (2022) 012005/doi: 10.88/1755-1315/1076/1/012005.
10. Azimov B.M., Ikhsanova S.Z. Motion simulation and calculation of the components of the lateral forces of the guiding wheels of a cotton-harvesting machine // Tractors and Agricultural Machinery, 2023, 90(2). P.107–115.
11. Azimov B.M., Ruzikulov A., Norkulov J., Abdullayev J. Mathematical modeling and motion control of pneumatic system drives of

- technological machines // AIP Conference Proceedings this link is disabled, 2022, 2637, 060015. <https://doi.org/10.1063/5.0118506>.
12. Azimov B.M., Rizaev A., Yakubjanova D.K., Kubaev S.T. Modeling and optimization of the hitch system of the harvesting units of cotton harvesting machine mx-1.8 under vertical vibrations// International Conference on Artificial Intelligence, Blockchain, Computing and Security (ICABCS-2023). Lecture Notes in Networks and Systems this link is disabled, 2023, 510. P. 1265–1275.
 13. Афанасьев В.Н. Теория оптимального управления непрерывными динамическими системами. – М.: Изд-во физического факультета МГУ. 2011, – 170 с.
 14. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988. С. 421 – 485.
 15. Жилейкин М.М., Ягубова Е.В., Чижов Д.А. Экспериментальное исследование эффективности стабилизации движения трактора при работе на склоне в режиме вспашки на масштабных моделях // Известия высших учебных заведений. МАШИНОСТРОЕНИЕ. 2015. №4 [661]. С.57 – 66.
 16. Гуськов В.В. и др. Тракторы: Теория. – М.: Машиностроение, 1988. С.33 – 35.
 17. Мирзияев Ш.М. Оценка устойчивости движения хлопкоуборочной машины в полевой борозде // Труды ТИИИМСХА. Вып. 141, 1986. С.73 – 79.
 18. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. – М.: Машиностроение, 1990. С.173 – 278.
 19. Тарасова С.В. Методика и исследование результатов взаимодействия протектора с наклонной опорной поверхностью в режиме варьирования углами увода пневматических шин // Известия ОГАУ. 2015. №2. С.84 – 87.
 20. Хошимов Д.И. Управляемость и устойчивость движения хлопкоуборочных машин. – Ташкент: Укитувчи, 1993, 112 с.

УЎК 621.311.24-25

О.З. ТОИРОВ, М.Х. ТАНИЕВ, Б.Б. САФАРОВ, М.С. МАННАБОВА, О.Ш. АШИРОВ

ШАМОЛ ВА СУВ ОҚИМИ ТЕЗЛИКЛАРИ ЎЗГАРИШИДА БОШҚАРИЛУВЧИ АСИНХРОН ГЕНЕРАТОРНИНГ БАРҚАРОРЛИГИ ВА ИШОНЧЛИЛИГИ

Ушбу мақолада шамол ва сув оқими тезликлари ўзгаришида бошқарилувчи асинхрон генератор барқарорлиги ва ишончлилиги, шунингдек, узатиш функциялари орқали бошқариш усуллари келтирилган. Асинхрон генераторнинг структура схемасини қуриш учун ток ва кучланиш тенгламаларидан оператор шаклида фойдаланилган. Статор кучланишининг якуний қиймати машинанинг магнит оқими билан тўйинганлиги чекланган. Конденсатор батареяларининг мавжудлиги магнит оқими бўйича ижобий тескари алоқа яратишга имкон беради. Бу орқали эса асинхрон генераторнинг структура схемаси яратилган. Ўз-ўзидан кўзгатиш шартларини ҳисобга олган ҳолда, асинхрон генераторнинг частотали характеристикаларини олиш имконияти яратилган. Узатиш функцияси чиқиш кучланиш қийматининг кириш кучланиш қийматининг нисбати билан аниқланган. Mathcad дастурида олинган $W_{узат}$ узатиш функцияси асосида амплитуда-фаза частотали тавсифи қурилган. Характеристикаларни қуриш учун қуввати 2,2 кВт, чиқиш кучланиш частотаси $f = 50$ Гц бўлган асинхрон генератор параметрлардан фойдаланилган. Боде диаграммасини, яъни логарифмик частота характеристикасини олиш учун bode (W) – буйруғидан фойдаланилган. Nyquist (W) – буйруғини бериш орқали Найквистнинг частотавий годографи қурилган. Узатиш функциясининг логарифмик амплитуда частотавий ва логарифмик фаза частотавий характеристикалари ёрдамида турғунлик чегарасини аниқлаш учун margin (W) буйруғидан фойдаланилган.

Калит сўзлар: асинхрон генератор, шамол ва сув оқими, реактив энергия, тескари алоқа, алмаштириш схемаси, узатиш функцияси, боде диаграммаси, ишончлилик, барқарорлик чегараси.

О.З. Тоиров, М.Х. Таниев, Б.Б. Сафаров, М.С. Маннабова, О.Ш. Аширов

Устойчивость и надежность управляемого асинхронного генератора при изменении скорости ветра и водного потока

В статье рассмотрены вопросы устойчивости и надежности асинхронного генератора, управляемого изменениями скорости ветра и потока воды, а также методы управления с использованием передаточных функций. Для построения структурной схемы асинхронного генератора использованы уравнения тока и напряжения в операторной форме. Показано, что конечное значение напряжения статора ограничивается насыщением магнитного потока машины. Установлено, что наличие конденсаторных батарей позволяет обеспечить положительную обратную связь по магнитному потоку. В результате была создана структурная схема асинхронного генератора, предопределяющая возможность получения частотных характеристик асинхронного генератора с учетом условий самовозбуждения. Отмечено, что передаточная функция определяется как отношение значения выходного напряжения к значению входного напряжения. На основе полученной в программе Mathcad функции передачи W была построена амплитудно-фазочастотная характеристика. Для построения характеристик использовались параметры асинхронного генератора мощностью 2.2 кВт и частотой выходного напряжения $f = 50$ Гц. Команда bode (W) использована для получения диаграммы Боде, т. е. логарифмической

частотной характеристики. Годограф частоты Найквиста построен путем подачи команды $\text{nyquist}(W)$. Команда $\text{margin}(W)$ использована для определения предела устойчивости с использованием логарифмической амплитудно-частотной и логарифмической фазочастотной характеристик передаточной функции.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветро- и гидропоток, реактивная мощность, обратная связь, схема замещения, передаточная функция, диаграмма Боде, надежность, предел устойчивости.

O.Z. Toirov, M.Kh. Taniev, B.B. Safarov, M.S. Mannabova, O.Sh. Ashirov

Stability and reliability of a controlled asynchronous generator with changing wind speed and water flow

The article considers the issues of stability and reliability of an asynchronous generator controlled by changes in wind speed and water flow, as well as control methods using transfer functions. To construct the structural diagram of the asynchronous generator, current and voltage equations in operator form were used. The final value of the stator voltage is limited by the saturation of the machine magnetic flux. The presence of capacitor banks allows for positive feedback on the magnetic flux. As a result, the structural diagram of the asynchronous generator was created. It is possible to obtain the frequency characteristics of the asynchronous generator taking into account the self-excitation conditions. The transfer function is defined as the ratio of the output voltage to the input voltage. Based on the transfer function W obtained in the Mathcad program, the amplitude-phase-frequency characteristic was constructed. To construct the characteristics, the parameters of an asynchronous generator with a power of 2.2 kW and an output voltage frequency of $f = 50$ Hz were used. The $\text{bode}(W)$ command was used to obtain the Bode diagram, that is, a logarithmic frequency characteristic. The Nyquist frequency hodograph is plotted by entering the $\text{nyquist}(W)$ command. The $\text{margin}(W)$ command was used to determine the stability limit using the logarithmic amplitude-frequency and logarithmic phase-frequency characteristics of the transfer function.

Keywords: asynchronous generator, wind and hydro flow, reactive power, feedback, equivalent circuit, transfer function, Bode diagram, reliability, stability limit

Республикамізда истеъмомчиларни узлуксиз сифатли электр энергияси билан таъминлаш мақсадида шамол электр станциялари (ШЭС) ва микро гидроэлектр станциялари (ГЭС) дан фойдаланиш, уларда қўлланиладиган генераторларни электр таъминот тизимига интеграциялаш, замонавий технологияларни қўллаш орқали энергия тежамкор ва бошқариш режимларини ишлаб чиқиш бўйича катта ислохотлар амалга оширилмоқда [1-3]. 2022 – 2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегиясида, жумладан “...уй-жой-коммунал хўжалиги, ижтимоий соҳа объектлари ва бошқа соҳаларда қайта тикланувчи энергия манбаларини кенг жорий этиш ва энергия самарадорлигини ошириш...” бўйича вазифалари белгиланган [4-6]. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, шамол ва сув оқими тезликлари ўзгаришида электр таъминот тизими билан параллел ишловчи фаза роторли асинхрон генераторнинг тезлигини ростлайдиган автоматик бошқариш тизимини ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этади [7 – 8].

Дунё аҳолисининг кўпайиши билан электр энергиясига бўлган эҳтиёж ортиб бормоқда. Қайта тикланмайдиган энергия манбалари захираларининг камайиб бораётгани ҳеч кимга сир эмас. Бу ҳолат шамол энергетикаси каби муқобил тоза ва барқарор энергия манбаларига шошилиш эҳтиёжни юзага келтирди [9]. Сўнги йилларда шамол энергетикаси қайта тикланадиган энергиянинг энг муҳим ва истикболли манбаларидан бири сифатида пайдо бўлди. Бу тизим ишончилигини таъминлаш учун қўшимча узатиш қуввати ва такомиллаштирилган усуллар талаб қилинади. Бинобарин, олимлар қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланган ҳолда электр энергиясини ишлаб чиқаришга тобора кўпроқ эътибор қаратмоқда [10]. Шамол энергиясини электр энергиясига айлантиришни икки тоифага бўлиш мумкин: вертикал ўқли

шамол генераторлари ва горизонтал ўқли шамол генераторлари. Ушбу қурилмалар тармоқни таъминлаш учун кинетик энергияни электр энергиясига айлантириш учун мўлжалланган. Икки марта қувватланадиган генераторларга асосланган шамол энергияси билан ишлайдиган тизимлар кўплаб афзалликлари, шу жумладан кенг тезлик оралиғида ишлаши туфайли энг кенг тарқалган [10].

Ўзгарувчан тезликда ишлайдиган шамол турбиналарининг ишлаши ўзгармас тезликда ишлайдиган турларга нисбатан бир қанча афзалликларга эга, жумладан, шамол энергиясидан фойдаланиш коэффициентининг юқорилиги, максимал қувватда ишлаш қобилияти, юқори самарадорлик ва қувват коэффициенти. Бундан ташқари, ўзгарувчан тезликли шамол турбиналари шамолдан максимал энергия олиш учун энг кўп тарқалган ҳисобланади [11].

Асинхрон генератор (АГ) схемаси учун реактив энергия манбаи билан таъминлаш мақсадида конденсаторлар батареяларидан фойдаланилади. АГ структура схемасини қуриш учун ток ва кучланиш тенгламаларидан оператор шаклида фойдаланилади [12].

Конденсатор ва юкламадаги кучланишлар тенгламалар тизимини тузишда қуйидагилар тахминлар олинади:

–бирламчи механизм энергияси “чексиз катта” қувватга ва ўзгармас тезликка эга;

–кўзғатиш жараёнида схема реактив элементлар таъсир қилади;

–генератор юкламаси критик қийматдан ошмаслиги керак, чунки ўз-ўзини кўзғатиш ва электр энергияси генерациялаш жараёнининг бузилишига олиб келиши мумкин:

$$\begin{aligned} i_c &= C \frac{dU_c}{dt}, \\ i_{st} &= i_c + i_n, \\ u_H = u_C &= \frac{d\Psi_{CT}}{dt} - i_{CT} R_{CT} - L_{\delta 1} \frac{di_{CT}}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

бу ерда, $u_H, u_C, (i_c, i_n)$ – конденсатор ва юкламадаги кучланишлар (тоқлар); $R_{CT}, L_{\delta 1}$ – статор чулғамининг актив қаршилиги ва индуктивлиги.

Тизимда оз миқдордаги бирламчи энергия мавжудлигини қолдиқ магнит оқими $\Phi_{КОЛ}$ шаклида ифодалаш мумкин, ротор синхрон тезликдан юқори айланганда, магнит оқимининг ўзгариш тезлигига мутаносиб равишда генераторнинг чиқишида ЭЮК E_G индукцияланади:

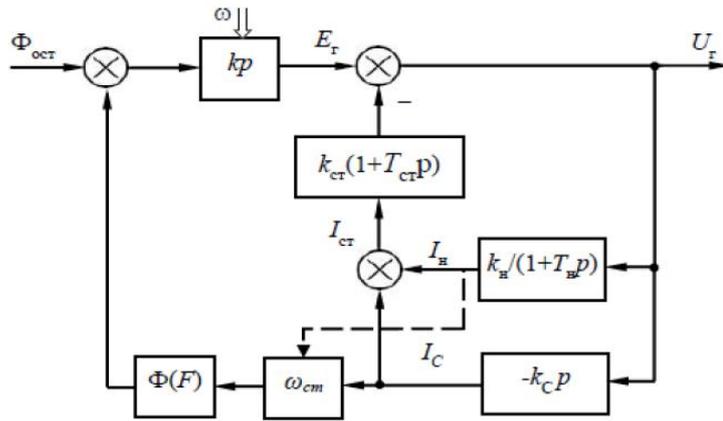
$$E_G = - \frac{d\Phi_{КОЛ}}{dt} = C_{AG} W_{РОТ} \Phi_{КОЛ}, \quad (2)$$

бу ерда, C_{AG} – АГ – ни тузилишини тавсифловчи коэффициент.

ЭЮК таъсири конденсатор батареясининг сиғим ташкил этувчисига таъсири остида статор чулғамида ток пайдо бўлади. Бу кўзғатиш токи ω_{CT} ўрамлар сонига тенг бўлган статор чулғамлари орқали оқиб, магнит юритувчи куч ва шунга мос келадиган магнит оқими Φ ни ҳосил қилади.

Статор кучланишининг якуний қиймати машинанинг магнит билан тўйинганлиги чекланади. Конденсатор батареяларининг мавжудлиги магнит оқими бўйича ижобий тесқари алоқа яратишга ҳисса қўшади. Натижада АГ нинг структура схемаси ҳосил қилинади (1-расм).

АГ структура схемаси белгилар билан алмаштирилади. 1-жадвалда структура схемаси ва математик ифодаларда ишлатиладиган элементларнинг белгилари ва номланиши келтирилган.



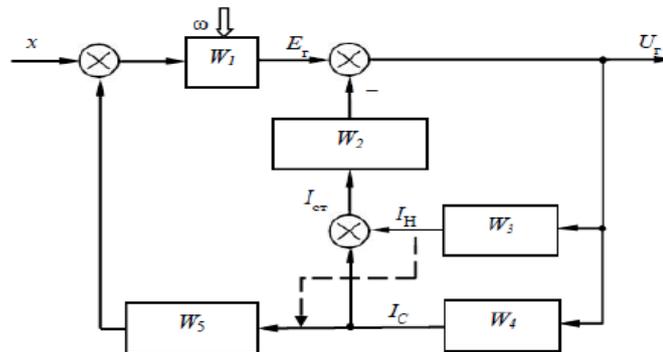
1-расм. АГ нинг АБН ҳолатидан структура схемаси.

1-жадвал

АГ структура схемасининг шартли белгилари

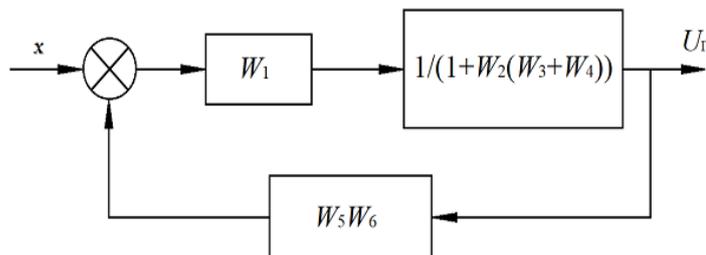
Белгиланиши	kr	$k_{st}(1 + T_{str}r)$	$k_n/(1 + T_{str}r)$	$-k_s r$	$\Phi(F) \cdot \omega_{st}$
Шартли белгиси	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Физик қиймати	$S_{AG} \cdot \omega$	$R_{sr} + L_{st} \cdot r$	$R_n + L_n \cdot r$	$S \cdot r$	L_{gn}

2-расмда АБН ҳолатидан шартли АГ диаграммаси кўрсатилган.



2-расм. АБН ҳолатидаги шартли АГ диаграммаси.

Ўзгартиришлардан сўнг, диаграмма 3-расмда кўрсатилгани каби шакли олади.



3-расм. АБН позициясида АГ нинг ўзгартирилган блок диаграммаси.

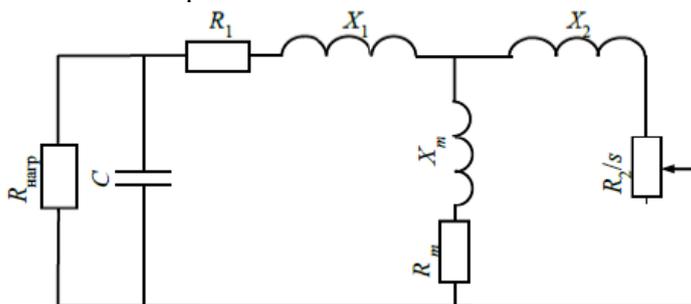
Умумий узатиш функцияси қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$W_{\text{умум}} = \frac{\frac{W_1}{1+W_2(W_3+W_4)}}{1 - \frac{W_1 W_4 W_5}{1+W_2(W_3+W_4)}} = \frac{W}{1+W_2(W_3+W_4) - W_1 W_4 W_5}. \quad (3)$$

Агар бу функциянинг махражи бирдан кичик ёки манфий бўлса, тизимнинг тебраниш жараёни ўсиб боровчи характерга эга бўлади. Узатиш функцияси махражи нолга интилиши билан энг катта қийматга эга бўлади. Шунинг учун, қўзғатиш шарти куйидагича бўлади:

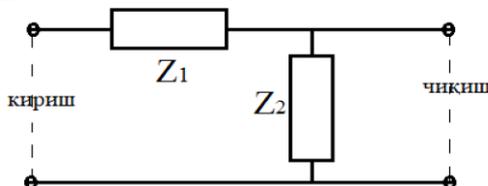
$$W_1 W_4 W_5 \geq 1 + W_2 (W_3 + W_4). \quad (4)$$

Ўз-ўзидан қўзғатиш шартларини, уни электр занжирини ҳисобга олган ҳолда, АГ нинг частотали характеристикалари орқали олиш мумкин. 4-расмда конденсаторли қўзғатиш тизимига эга бўлган асинхрон генераторнинг алмаштириш схемаси келтирилган.



4-расм. Конденсаторли қўзғатиш тизимига эга бўлган асинхрон генераторнинг алмаштириш схемаси.

Узатиш функциясини олиш учун ушбу схемани 5-расмда кўрсатилгани каби содалаштириш керак.



5-расм. Конденсаторли қўзғалиш билан ўзгартирилган АГ алмаштириш схемаси.

Ушбу схемада асинхрон генераторнинг қўзғалиши учун зарур бўлган энергия роторда мавжуд деб тахмин қилинади. Бирламчи энергия қолдиқ магнит оқим шаклида ифодаланиши мумкин. Шунга асосланиб, Z_1 – роторнинг индуктив-актив қаршилиги, Z_2 – статор ва юкларнинг келтирилган қаршилиги. Ушбу қаршилиқ қийматлари куйидаги ифодалар орқали аниқланади:

$$Z_1 = X_2 i, \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{(R_m + X_m i)(X_1 i + R_1 - \frac{R_n X_c i}{R_n - X_c i})}{R_m + X_m i + X_1 i + R_1 - \frac{R_n X_c i}{R_n - X_c i}}. \quad (6)$$

Узатиш функцияси чиқиш кучланиш қийматининг кириш кучланиш қийматининг нисбати билан аниқланади. Тақдим этилган схеманинг кириш ва чиқишидаги ток тенг бўлса (5-расм), узатиш функцияси чиқиш қаршилигининг кириш қаршилигига нисбати сифатида ифодаланиши мумкин:

$$W_{узат} = \frac{U_{чик}}{U_{кир}} = \frac{Z_2}{Z_{кир}}, \quad (7)$$

бу ерда, $Z_{кир} = Z_1 + Z_2$.

Эквивалент схеманинг параметрлари орқали узатиш функциясини ифодалаб, куйидаги ифода ҳосил бўлади:

$$W_{узат} = \frac{L_m(L_1W - R_H i + CR_1R_H W - R_1 i + CL_1R_H W^2 i)}{Z}, \quad (8)$$

бу ерда,

$$Z = L_1L_2W - L_mR_H i - L_mW + L_2L_mW + CL_2R_1R_H W + CL_mR_1R_H W - L_2R_H i + CL_1L_2W^2 i - L_2R_1 i + CL_2L_mR_H W^2 i + CL_1L_mR_H W^2 i$$

Mathcad дастурида олинган $W_{узат}$ узатиш функцияси асосида амплитуда-фаза частотали тавсифи (АФЧТ) курилади.

Характеристикаларни куриш учун қуввати 2.2 кВт, чиқиш кучланиш частотаси $f = 50$ Гц бўлган асинхрон генератор параметрлардан фойдаланилган (2-жадвал).

2-жадвал

АГ алмаштириш схемаси параметрлари

R_1 , Ом	R_2 , Ом	X_1 , Ом	X_2 , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	C , мкФ
0.934	0.817	3.28	4.43	0.9	3.91	500

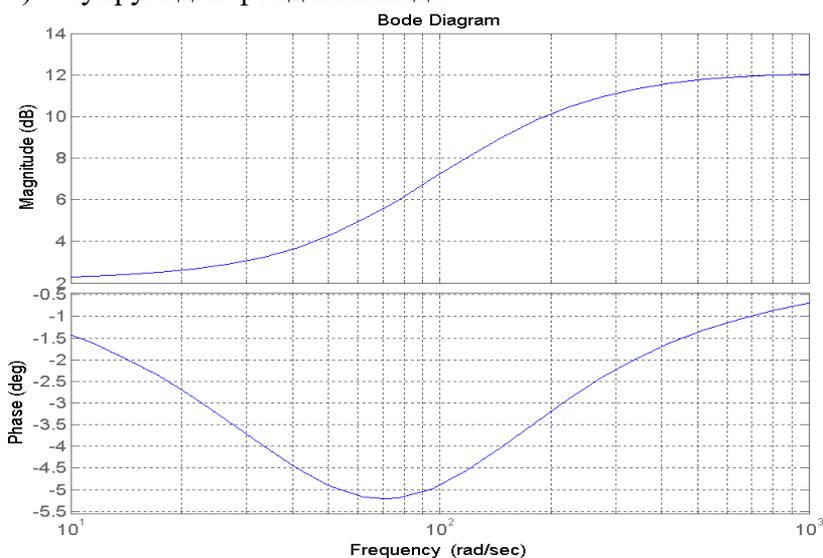
```
W = TF ([0.00124 0.01880896 -6.948], [0.0003062 0.00095768 -5.403287636])
>> W = TF ([0.00124 0.01880896 -6.948], [0.0003062 0.00095768 -5.403287636]).
```

Transfer function:

$$0.00124 s^2 + 0.01881 s - 6.948$$

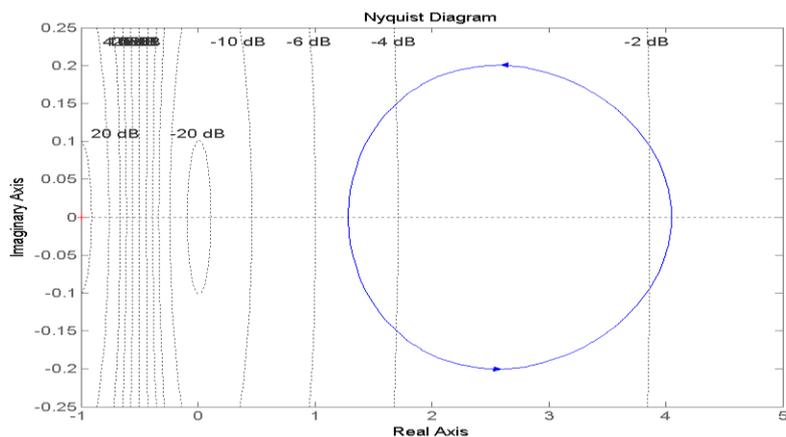
$$0.0003062 s^2 + 0.0009577 s - 5.403$$

Боде диаграммасини, яъни логарифмик частота характеристикасини олиш учун $bode(W)$ – буйруғидан фойдаланилади.



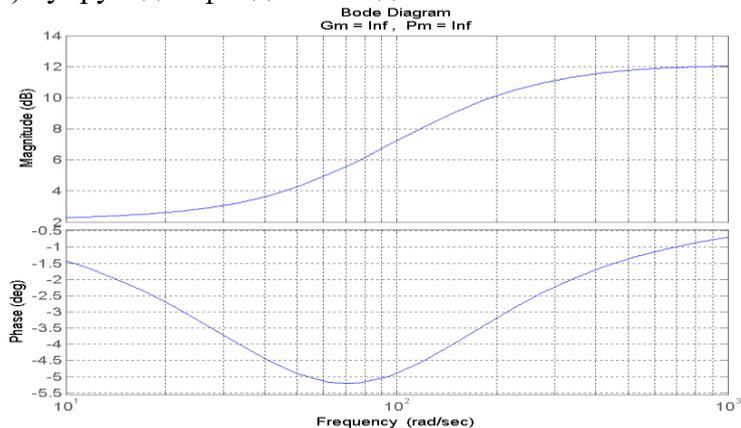
6-расм. Логарифмик частота характеристикаси

Nyquist (W) – буйруғини бериш орқали Найквистнинг частотавий годографи курилади.



7-расм. Nyquist(W) – буйруғини бериш орқали Найквистнинг частотавий годографиги.

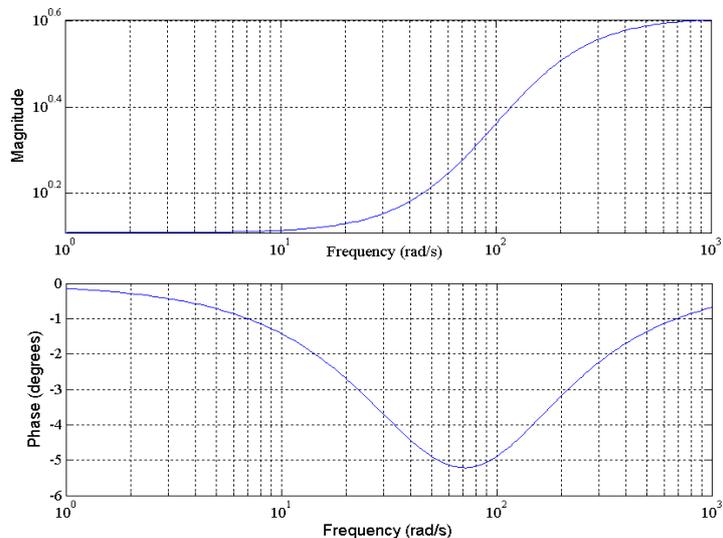
Узатиш функциясининг логарифмик амплитуда частотавий ва логарифмик фаза частотавий характеристикалари ёрдамида турғунлик чегарасини аниқлаш учун $\text{margin}(W)$ буйруғидан фойдаланилади.



8-расм. Турғунлик чегарасини аниқлаш.

Амплитуда ва фаза, частотавий характеристикасини юқоридаги маълум бўлган узатиш функциясидан ва freqs буйруғидан фойдаланиш орқали қуйидагича олинади.

$\text{Freqs}([0.00124 \ 0.01880896 \ -6.948], [0.0003062 \ 0.00095768 \ -5.403287636])$



9-расм. Амплитуда ва фаза частотавий характеристикаси.

6-расмда логарифмик частота характеристикасини олиш учун $bode(W)$ – буйруғидан фойдаланилди. 7-расмда эса nyquist (W) – буйруғини бериш орқали Найквистнинг частотавий годографи қурилди. 8-расмда узатиш функциясининг логарифмик амплитуда частотавий ва логарифмик фаза частотавий характеристикалари ёрдамида турғунлик чегарасини аниқлаш учун $margin(W)$ буйруғидан фойдаланилди. 9-расмда эса амплитуда ва фаза частотавий характеристикасини юқоридаги маълум бўлган узатиш функциясидан ва $freqs$ буйруғидан фойдаланиш орқали олинди.

Хулоса. Статор кучланишининг якуний қийматида машинанинг магнит билан тўйинганлиги чекланди. Конденсатор батареяларининг мавжудлиги магнит оқими бўйича ижобий тескари алоқа яратишга имкон яратди.

Узатиш функцияси чиқиш кучланиш қийматининг кириш кучланиш қийматининг нисбати билан аниқланди. Эквивалент схеманинг параметрлари орқали узатиш функцияси ифодаланиб, якуний кўринишга келтирилди.

Mathcad дастурида олинган $W_{узат}$ узатиш функцияси асосида амплитуда-фаза частотали тавсифи қурилди. Характеристикаларни қуриш учун қуввати 2.2 кВт, чиқиш кучланиш частотаси $f = 50$ Гц бўлган асинхрон генератор параметрлардан фойдаланилди.

Узатиш функциясининг логарифмик амплитуда частотавий ва логарифмик фаза частотавий характеристикалари ёрдамида турғунлик чегарасини аниқлаш учун $margin(W)$ буйруғидан фойдаланилди. Натижада, қуввати 2.2 кВт, чиқиш кучланиш частотаси $f = 50$ Гц бўлган асинхрон генератор учун барқарорлиги ва ишончлилиги текширилди. Олинган натижалар асинхрон генератор учун барқарорлиги ва ишончлилиги таъминланганлигини кўрсатди.

Ушбу мақола Ўзбекистон Республикаси Инновацион ривожланиш агентлиги томонидан молиялаштирилган ИЛ-442105947 – сонли “Шамол ва сув оқими параметрлари ўзгаришида локал энергетика тизимига ўзгармас частотали стабил ўзгармас электр қувватини узатувчи янги автоматик қурилма яратиш” мавзусидаги инновацион лойиҳа доирасида тайёрланди.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Безруких П.П. Ветроэнергетика. – М.: Изд – во «Энергия», 2010, 320 с.
2. Захидов Р.А., Кремков М.В. Потенциал ветровой энергетики Узбекистана // Гелиотехника. 2015. №4. С. 111 – 112.
3. Toirov O. Z., Taniyev M.X., Xalikov S.S., Jumayeva D.J., Safarov B.B. Amaldagi tarmoq bilan parallel ishlovchi boshqariluvchi shamol elektr qurilmasi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi “Intellectual mulk markazi” davlat muassasasi. Foydali modelga patent. – Toshkent, 2023. № FAP 2023. 0311. 30.08.2023.
4. Тоиров О.З., Таниев М.Х. Шамол электр станцияларида асинхрон генераторларни қўллаш имкониятлари // “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари” илмий-техник журнали. – Тошкент, 2022. Махсус сон. 283 – 288 б.
5. Toirov O.Z., Taniyev M.X., Sotiboldiev A.A. Questions of Control of Asynchronous Generators Used at HPP and WPP Stations // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 9. Issue 4, April, 2022. P. 19260 – 19265.
6. Таниев М.Х., Шерназаров С.Э., Убайдуллаев М.М. МикроГЭСлардаги фаза роторли асинхрон машина механик тавсифини

- ҳисоблаш // “Ўзбекгидроэнергетика” илмий-техник журнали. – Тошкент, 2021. №3(11). 29 – 31 б.
7. Alimkhodjaev K. T., Toirov O.Z., Taniyev M.X. Addressing Issues and Possibility of Introducing Renewable Energy Sources in the Conditions of Uzbekistan // Journal of critical reviews Vol. 7. 2020. Issue 15, P.1721 – 1728.
 8. Toirov O.Z., Taniyev M.X., Mirxonov U.K., Sa’dullaev T.M. Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridagi faza rotorli asinxron generatorlarning quvvat isroflarini hisoblash metodikasi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi “Intellectual mulk markazi” davlat muassasasi. – Toshkent. № DGU 14882. 07.03.2022.
 9. Тоиров О.З., Таниев М.Х. Қайта тикланувчи энергия манбаларида асинхрон генераторнинг фазалари улаиш схемасининг чиқиш кучланишига таъсири // “Ўзбекгидроэнергетика” илмий-техник журнали. – Тошкент, 2022. №2(14). 70 – 72 б.
 10. Toirov O., Taniyev M., Hamdamov M., Sotiboldiev A. Power Losses Of Asynchronous Generators Based On Renewable Energy Sources // E3S Web of Conferences 434, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401020>, ICECAE 2023, P. 122 – 127.
 11. Toirov O.Z., Taniyev M.X., Mirxonov U.K. Faza rotorli asinxron mashinaning aylanish chastotasini qarshiliklarni rostlash orqali boshqarish hamda energetik ko‘rsatkichlarini oshirish metodikasi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi “Intellectual mulk markazi” davlat muassasasi. – Toshkent. №DGU 16169.14.05.2022.
 12. Тоиров О.З., Таниев М.Х. Қайта тикланувчи энергия манбаларидаги электромеханик тизимларда қувват исрофи ва энергия баланси // Информатика ва энергетика муаммолари. – Тошкент, 2022. №5. Б. 44 – 54.

Тошкент давлат техника университети
ЎзР ФА Энергетика муаммолари институти

18.03.2025 й.
кабул қилинган

УДК 620.98

**Н.Р. АВЕЗОВА, Н.А. МАТЧАНОВ, Р.А. СЫТДИКОВ, Н.Н. ДАЛМУРАДОВА,
Х.З. СИДДИКОВ**

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ И НАДЕЖНОСТИ МИКРОГРИД СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Показано, что микрогрид системы на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в сочетании с интеллектуальными системами управления и накопителями энергии формируют технологическую основу устойчивых энергетических решений для социально значимых объектов. В статье приведены всесторонний анализ критериев устойчивости и надёжности микрогрид систем, а также результаты разработки и внедрения пилотной гибридной системы в г.Ташкенте. Установлено, что конфигурация микрогрид системы включает фотоэлектрическую станцию (мощностью 23.8 кВт), систему хранения энергии (50 кВт/135 кВт·ч), дизельный генератор (200 кВт) и интеллектуальную систему управления (EMS), функционирующую в сетевом и автономном режимах. Целью настоящего сообщения является анализ архитектуры управления микросети и оценка критерия её устойчивости и надёжности при интеграции ВИЭ в двух режимах работы (с подключением к сети и автономно). Разработанные стратегии энергоменеджмента основаны на алгоритмах прогнозирования и многокритериальном управлении, обеспечивающих

автоматизированное переключение режимов и стабильность параметров энергоснабжения. Ключевые результаты демонстрируют высокий уровень автономности (до 12 ч.), коэффициент замещения централизованной электроэнергии на уровне 35% и снижение углеродного следа. Полученные данные подтверждают применимость международных подходов к проектированию микрогрид систем в контексте климатических и инфраструктурных особенностей Узбекистана.

Ключевые слова: микрогрид системы, солнечная фотоэлектрическая станция, система хранения энергии, надежность и устойчивость, индикаторы, критерии, энергоснабжение, эмиссия CO₂, коэффициент замещения.

N.R. Avezova, N.A. Matchanov, R.A. Sitdikov, N.N. Dalmuradova, X.Z. Siddikov

Qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosidagi mikrogrid tizimlarining barqarorlik va ishonchlilik mezonlari

Qayta tiklanadigan energiya manbalariga asoslangan mikrogrid tizimlari, aqlli boshqaruv tizimlari va energiya saqlash tizimlari bilan birgalikda, ijtimoiy ahamiyatga ega obyektlar uchun barqaror energiya yechimlarining texnologik asosini tashkil etadi. Mazkur maqolada Toshkent shahridagi obyektida o'rnatilgan namunaviy gibridd mikrogrid tizimi ko'rsatkichlarini o'rganish asosida, mikrogrid tizimlarining barqarorlik va ishonchlilik mezonlari kompleks tahlil etilgan. Tizim quyosh fotoelektr stansiyasi (23.8 kVt), energiya saqlash tizimi (50 kVt / 135 kVt·soat), dizel generatori (200 kVt) va tarmoqqa ulangan hamda avtonom rejimda ishlaydigan aqlli boshqaruv tizimini (EMS) o'z ichiga oladi. Ushbu tadqiqotning maqsadi – qayta tiklanadigan energiya manbalarining tarmoqqa integratsiyasi sharoitida mikrogrid boshqaruv arxitekturasini tahlil qilish va uning barqarorlik hamda ishonchlilik mezonlarini baholashdan iborat. Ishlab chiqilgan energetik boshqaruv strategiyalari prognozlash algoritmlari va ko'p mezonli boshqaruv asosida ishlab chiqilgan bo'lib, avtomatlashtirilgan rejim almashinuvi va barqaror energiya ta'minoti parametrlarini ta'minlaydi. Asosiy natijalar shuni ko'rsatadiki, markaziy tarmoqdan uzatiladigan elektr energiyasining 35 foizigacha bo'lgan qismini qoplash imkonini beradi, 12 soatgacha bo'lgan muddatda avtonom ravishda ishlashga qodir hamda uglerod izini kamaytiradi. Olingan ma'lumotlar O'zbekistonning iqlimiy va infratuzilma sharoitlarida mikrogrid tizimlarni loyihalashda xalqaro andozalar asosidagi yondashuvlar qo'llanilishi imkoniyati mavjudligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: mikrogrid tizimlar, fotoelektr stansiya, energiya saqlash tizimi, ishonchlilik va barqarorlik, indikatorlar, mezonlar, energiya ta'minoti, CO₂ chiqindilari, almashtirish koeffitsiyenti.

N.R. Avezova, N.A. Matchanov, R.A. Sitdikov, N.N. Dalmuradova, Kh.Z. Siddikov

Criteria for stability and reliability of microgrid systems based on renewable energy sources

Microgrid systems based on renewable energy sources (RES), in combination with intelligent control systems and energy storage systems (ESS), form the technological foundation for sustainable energy solutions for socially significant facilities. This study presents a comprehensive analysis of the stability and reliability criteria of microgrid systems, along with the results of the development and implementation of a pilot hybrid microgrid in Tashkent. The system configuration includes a photovoltaic (PV) station (23.8 kW), an energy storage system (50 kW / 135 kWh), a diesel generator (200 kW), and an intelligent energy management system (EMS), operating in both grid-connected and islanded modes. The aim of this work is to analyze the microgrid control architecture and assess its stability and reliability when integrating RES under both operating scenarios. The developed energy management strategies are based on forecasting algorithms and multi-criteria control methods, providing automated mode switching and stable energy supply parameters. The key results demonstrate a high level of autonomy (up to 12 hours), a central grid electricity substitution coefficient of 35%, and a reduction in the system's carbon footprint. The findings confirm the applicability of international microgrid design approaches in the context of Uzbekistan's climatic and infrastructural conditions.

Keywords: microgrid systems, photovoltaic station, energy storage system, reliability and stability, indicators, criteria, energy supply, CO₂ emissions, Grid electricity replacement ratio.

Введение. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечная и ветровая энергетика, играют ключевую роль в переходе к устойчивым энергетическим системам. Однако их переменная и непредсказуемая природа требует интеграции систем хранения энергии (СХЭ), чтобы обеспечить стабильность и надежность энергоснабжения в целом, в связи с чем в мире

наблюдается активный переход к использованию возобновляемых источников энергии для обеспечения устойчивого энергоснабжения. Многие международные исследования подчеркивают важность использования ВИЭ для борьбы с изменением климата и достижения устойчивого развития.

Исследования, представленные в годовых отчетах IRENA и Международного энергетического агентства (IEA) за 2020 – 2021 годы показывают, что использование микрогрид систем на основе ВИЭ помогает стабилизировать электроснабжение и снизить нагрузку на центральные сети, что подтверждает актуальность разработки таких систем [1 – 2].

В контексте Узбекистана внедрение ВИЭ приобретает всё большую важность. Согласно данным Всемирного Банка, страна активно развивает свои энергетические системы для снижения зависимости от традиционных источников энергии, таких как газ и нефть, и адаптируется к международным обязательствам по снижению выбросов CO₂ [3]. В результате возникла востребованность для создания эффективных микрогрид систем, учитывающих местные климатические условия (КУ) и особенности энергетической системы страны.

Современные исследования показывают, что использование СХЭ позволяет обеспечить стабильную работу микрогрид систем даже при нестабильной генерации ВИЭ, что делает их устойчивыми и эффективными [4]. Отметим, что разработка устойчивых микрогрид систем на базе ВИЭ способствует улучшению экологических показателей, снижению выбросов и повышению энергоэффективности и вносит практический вклад в реализации такой системы, которая востребована на уровне социальных объектов, таких как школы, больницы и другие общественные учреждения, где требуется надёжное и экологически чистое электроснабжение.

Обзор литературы. Как известно, применение интеллектуальных систем управления (EMS) и резервных источников энергии играет ключевую роль в повышении надёжности энергосистем, в том числе микрогрид систем. При этом важно учитывать возможные исследования, направленные на повышение устойчивости и надёжности микрогрид систем, использующих СХЭ. В ряде работ анализируются различные подходы к обеспечению ВИЭ и хранения систем, а также разработаны методы оптимизации, улучшающие эксплуатационные характеристики микрогрид систем.

Так, в работе авторов M. Kiehadroudzehad и др. [5] рассмотрены гибридные микрогрид системы, использующие солнечную и ветровую энергию, с акцентом на оптимизацию размеров и экономическую эффективность, разработаны методы для повышения надёжности и устойчивости микрогрид систем в отдалённых районах. Авторами предложены оптимизационные стратегии для снижения затрат и повышения устойчивости, что способствовало снижению стоимости генерации ЭЭ на 15 – 25%. При этом увеличение доли ВИЭ в энергобалансе составило до 70%. В таком случае устойчивость микрогрида сохраняется при 10%-ных колебаниях генерации.

В работе авторов Liu & B Su [6], представлены примеры микрогрид систем с использованием микротурбин, фотоэлектрических панелей (ФЭП), ветровых турбин и СХЭ для электрификации сельской местности в развивающихся странах. Результаты исследований показали возможность снижения выбросов CO₂ на 30–50% по сравнению с традиционными дизельными генераторами, повышения энергоэффективности на 20 – 35% при использовании гибридных микрогрид систем. Выявлена также возможность продления срока службы оборудования на 15% благодаря EMS.

В работе авторов S. Thale и др. [7] предложена архитектура микрогрид систем с использованием фотоэлектрических, ветровых и топливных элементов, которая включает иерархическое управление и резервирование с ультраконденсаторами и батареями, которая подходит как для подключённых к сети, так и для автономных режимов. При этом устойчивость сети сохраняется при отказе до 20% компонентов. Снижение затрат на обслуживание на 10 – 15% достигается благодаря интеллектуальному контролю. Исследования показали возможность сокращения времени восстановления после сбоев на 35%.

В работах авторов A. Etxeberria и др. [8] выполнен обзор гибридных систем хранения энергии (ГСХЭ – BESS) с использованием суперконденсаторов и батарей. Разработаны алгоритмы управления энергией для улучшения надёжности, которые снижают перегрузки и гармонические искажения в системе в целом. Показано увеличение сроков службы СХЭ на 25%, снижение гармонических искажений в сети до 5%, а также повышение эффективности системы на 15% благодаря равномерному распределению нагрузки.

В исследовании, выполненном авторами R. Kandarí и др. [9], представлен обзор топологий и методов управления СХЭ. Сравнены различные подходы к интеграции ВИЭ в микрогрид системы. Показано, что применение гибридных систем хранения повышает стабильность последних на 30 – 40%. Рассмотрены гибридные системы хранения и их оптимизация, при этом показана экономия энергии за счёт оптимизации до 20% и улучшена устойчивость к внезапным скачкам нагрузки на 25%.

В работе авторов V. Murty & A. Kumar [10] рассмотрены гибридные микрогрид системы с ФЭП, ветряная турбина (ВТ), ГСХЭ и дизельными генераторами (ДГ). Проведён анализ затрат и выгод для изолированных районов Индии. В результате показано снижение выбросов CO₂ на 68% при использовании ФЭП+ВТ+ДГ+ГСХЭ, где срок окупаемости системы составляет около 7 – 10 лет и увеличение времени автономной работы до 24 ч. в условиях сбоев энергоснабжения.

В работе авторов E. Rosales-Asensio и др. [11] выполнена оценка влияния ФЭП и электрохимических СХЭ на устойчивость и затраты на энергию в офисных зданиях. Рассмотрены сценарии отказа энергоснабжения, а также продление времени автономной работы при сбоях на 4 ч. Исследования выявили возможность экономии 112,410 долл. США за 20 лет эксплуатации и повышение стабильности энергоснабжения до 95%.

В работе Y. Guo, & C. Zhao [12] авторами разработана и предложена стратегия управления энергией микрогрид системы, которая учитывает возможность островного режима (islanding) и обеспечивает надёжность и стабильность системы в условиях динамических изменений, преследуемой целью которой является управление энергией, основанной на минимизации риска несоответствия между генерацией и потреблением энергии. При этом использованы прогнозные модели для управления энергопотоками как в сетевом подключении, так и в автономном режиме, а также применены методы математической оптимизации, включая программирование с неопределённостями. Данный подход дал возможность разработать стратегию управления, способствующую минимизации вероятности отказов при переходе в островной режим, а также системой поддержке устойчивости при внезапных изменениях нагрузки или генерации. Благодаря данному подходу и применению прогнозных алгоритмов, получена возможность снижения избыточного потребления энергии на 18%. Кроме того, достигнуто увеличение доли ВИЭ в общей генерации до 65%, что снижает зависимость от традиционных источников энергии. Оптимальное

использование СХЭ способствовало снижению эксплуатационных затрат на 12%, а также увеличению срока службы аккумуляторов на 20% благодаря равномерному распределению циклов заряда/разряда. При этом отклонение частоты системы в островном режиме снижено до 0.03 Гц (в пределах стандартов), и напряжение остаётся стабильным на уровне $\pm 5\%$ от номинального значения. Результаты настоящей работы подчёркивают важность прогнозного управления для повышения надёжности микрогрид систем. Методология управления с учётом островного режима доказала свою эффективность в повышении устойчивости и оптимизации энергопотребления. Приведённый подход может быть адаптирован для различных сценариев микрогрид систем, особенно в регионах с высокой долей ВИЭ.

Таким образом, анализ международного опыта и актуальных исследований подчёркивает, что эффективность микрогрид систем на основе ВИЭ определяется не только самим фактом интеграции ВИЭ, но и способностью этих систем обеспечивать стабильность, надёжность и адаптивность к внешним условиям. Для объективной оценки этих характеристик требуется использование системы критериев и индикаторов, охватывающих технические, экономические, экологические и управленческие аспекты. Представим ключевые параметры, применяемые для анализа устойчивости и надёжности микрогрид систем, которые легли в основу подхода, реализованного в настоящем исследовании.

Методология и критерии оценки. Устойчивость и надёжность микрогрид систем оцениваются по множеству показателей, отражающих техническое состояние оборудования, экономическую эффективность и влияние на окружающую среду [13 – 16]. В целях структурированного подхода к оценке, данные критерии целесообразно классифицировать на следующие четыре основные группы:

Технические критерии, включающие параметры надёжности электроснабжения, качества электроэнергии, резервирования и скорости реакции на изменения.

Экономические, такие как энергоэффективность, эксплуатационные затраты и рентабельность инвестиций.

Экологические, оценивающие углеродный след и уровень воздействия на окружающую среду.

Критерии управления и масштабируемости, связанные с интеллектуальным контролем, кибербезопасностью и гибкостью архитектуры.

Конкретные показатели, используемые для количественной оценки вышеуказанных групп критериев, приведены в табл. 1 с указанием нормативных значений и ссылками на международные стандарты.

Таблица 1

Индикаторы, метрики и стандарты для оценки устойчивости и надёжности микрогрид систем

Категория	Индикатор	Количественные метрики и граничные значения	Международные стандарты (IEC/ISO)
1	2	3	4
Технические	Надёжность электроснабжения (устойчивость работы)	<p>Доступность, % (доля времени без перерывов) – 95-99%;</p> <p>MTBF, часы (ср. время безотказной работы) – 1000-5000 ч; SAIDI/SAIFI (длительность/частота отключений) – < 3 ч/год</p>	<p>IEC 62786: требования к ДЭР для поддержания стабильности сети (ride-through, поддержка частоты) [17];</p> <p>IEC 60364-8-2: принципы надёжного проектирования микрогридов, обеспечение резервирования [18]</p>

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
	Качество электроэнергии	Отклонение U/f (откл. от номинала: напряжения $\pm 5\%$, частоты $\pm 0.5\text{Гц}$); THD , % (коэфф. гармонических искажений) $< 5\%$; Число просадок/перенапряжений (шт./год) – < 10 шт./год	IEC 62786: ограничения по качеству (EMC, гармоники, реакция на откл. U) [19]; IEC 61850: оперативный мониторинг/управление для обеспечения качества (быстрый обмен данными) [20]
	Резервирование мощности (N-1, резерв)	N-1 способность (выдерживает ли аварийное отключение одного элемента) – Да; Резервная мощность , % от нагрузки (дублирование генер./накопителей) – $20\%-50\%$; Время автономной работы при потере основного источника – 4-24 ч	IEC 60364-8-2:2018/2022 предусматривает использование накопителей и локальной генерации для резервирования (островной режим) [21]; IEC 62898-1: технические требования к микрогридам, включая надёжность питания (резерв) [22]
	Скорость реакции (динамическая устойчивость)	Время переключения в островной режим, – 100-500 мс ; Время реакции на аварии , с (время восстановления стабильной работы) – < 1 с; Задержка управления , мс (латентность сети связи) – < 10 мс	IEC 61850: высокоскоростная связь снижает задержки и повышает быстродействие автоматики [20]; IEC 62786: требования к быстрому отклику ДЭР на изменения частоты/напряжения (поддержание стабилизации) [17]
Экономические	Энерго-эффективность	КПД системы , % (отношение полезной энергии к выработанной) – $85-95\%$; Энергоёмкость , кВт·ч/ед. (потребление на единицу продукции или площади) – < 0.5 кВт·ч/ед.; Потери энергии , % (в сетях, преобразователях) – $< 10\%$	ISO 50001: требует <i>показатели энерго-результативности</i> (EnPI) и их улучшение [23]; IEC 60364-8-2: энерго-эффективная архитектура prosumer-систем (минимизация потерь) [21]
	Эксплуатационные затраты (OPEX)	Стоимость энергии , (себестоимость генерации) – $0.05 - 0.2$ \$/кВт·ч; O&M затраты (обслуживание, топливо) – < 1000 \$/год; Удельные эксплуатационные расходы , – < 50 \$/кВт/год	ISO 50001: фокус на снижении энергопотребления и связанных затрат [23]; Принципы энергоменеджмента: экономия энергии = снижение затрат (выполнение ISO 50001 приводит к сокращению затрат на энергоресурсы)
	Инвестиционная привлекательность	Срок окупаемости , годы ROI/IRR , % (доходность инвестиций) – $5 - 10$ лет LCOE (ср. приведённая стоимость энергии) – $0.05 - 0.15$ \$/кВт·ч	ISO 50001: достижение целей по энергоэффективности снижает расходы и повышает ROI проекта [21]; IEC 62898: соответствие международным стандартам уменьшает риски, повышая инвест. привлекательность (бенчмарк для проектов) [22]
Экологические	Снижение углеродного следа	Сокращение выбросов CO₂ , т/год (относительно базового уровня) – $30 - 68\%$. Доля ВИЭ , % в годовом энергопотреблении – $50 - 90\%$; Углеродоёмкость энергии , – < 200 гCO ₂ /кВт·ч	ISO 50001: предполагает уменьшение экологического воздействия и выбросов через энергосбережение [21]; IEC 62786: интеграция ВИЭ (ДЭР) для замещения ископаемых, снижает выбросы загрязнений [17]

	Минимизация эко-воздействия	Локальные выбросы (NO _x , SO ₂), - < 0.1 т/год; Шумовое воздействие , - < 50 дБ; Утилизация (%) отходов (батарей, оборудование) - >> 90%	ISO 50001: поддерживает общие цели устойчивого развития, включая сокращение всех видов выбросов [21]; IEC 62301/EN 61000 (примеры): соответствие нормам по помехам и экологии свидетельствует о низком воздействии. (IEC 62786 требует отсутствие вредных влияний ДЭР на сеть) [24]
Управление и контроль	Интеллектуальное управление	Уровень автоматизации , % (доля процессов под контролем EMS) – 80 - 100%; Наличие EMS/SCADA (да/нет, реализовано ли «умное» управление) – Да; Число авто-функций (OPTIMAL dispatch, DR, АГР и пр.) – 5 – 10	IEC 61850: стандарт объединённого управления энергосистемой, обеспечивает надёжную автоматизацию и интеграцию устройств [20]; IEC 61499: стандарт распределённого управления (функциональные блоки) для модульных, интеллектуальных систем [25]
	Кибер-безопасность	Соблюдение стандарта (IEC 62351/ISO 27001) – Да; Число инцидентов , шт/год (успешных кибератак) - < 1 шт./год; Время обнаружения/реагирования на киберугрозы, часы - < 1 ч	IEC 62351: стандартизирует защиту коммуникаций энергосистем (конфиденциальность, целостность, доступность данных) – требуется обеспечение этих аспектов ; IEC 61850: предусматривает механизмы аутентификации и шифрования (в связке с IEC 62351) для защиты сети управления [20]
Гибкость и масштабируемость	Модульность системы	Возможность расширения , % (макс. увел. нагрузки/генерации без модерниз.) – 20 – 50%; Время интеграции нового модуля (нового источника), – 1 – 7 дней; Стандартизация интерфейсов (наличие унифицированных протоколов, да/нет) – Да	IEC 61499: обеспечивает модульный подход к управлению, упрощая наращивание системы (перенастройка контроллеров) [25]; IEC 61850: единый коммуникационный протокол, облегчающий добавление нового оборудования без изменений в остальной системе [20]
	Гибкость режима (автономность)	Автономная работа (длительность работы изолированно) – 4 – 24 ч; Время перехода между режимами (grid-to-island, мс) – 100 – 500 мс; Диапазон нагрузки в автономном режиме, % (min–max нагрузка при сохранении стабильности) – 20 – 100%	IEC 60364-8-2: определяет микрогрид как систему, работающую в сети или автономно (требования к переключению режимов [21]); IEC 62351: требует надёжной связи и управления для безопасного перехода (поддержание связи и управления при любых режимах). (Также IEEE 1547: испытания на островной режим и синхронизацию)[20]

Таким образом, предложенная классификация и соответствующие индикаторы направлены на обеспечение трёх ключевых целей: стабильности функционирования микросети, минимизации эксплуатационных затрат и повышения экологической устойчивости.

Описание пилотной микрогрид системы.

1. *Архитектура системы.* На основе существующих подходов по разработке микрогрид систем на основе ВИЭ, представленными в литературном обзоре, авторами разработана и введена в действие гибридная микрогрид система, состоящая из: локальной сети, сетевой фотоэлектрической станции (ФЭС) – 51.6кВт, гибридной сетевой СФЭС мощностью 28.3 кВт, подключенной к СХЭ Jinco Solar 50KW-с общей емкостью 135KWh и дизельного генератора (ДГ) мощностью 200 кВт (рис.1).

Данная система установлена в целях частичного замещения электрической нагрузки объекта, который расположен в г.Ташкенте. Максимальная суточная нагрузка на энергопотребление рассматриваемого объекта составляет 312 кВт, далее – 8 – 10 кВт/ч. По паспортным данным и на основе результатов эксплуатации, далее – результатов мониторинга СХЭ вырабатывает 12 – 13 кВт/ч, далее в сутки – 312 кВт, в месяц – 9360 кВт и в год – 112320 кВт. Разовая полная зарядка СХЭ способствует обеспечению электрической энергией исследуемого объекта на 10–12 ч. Остальное энергообеспечение объекта осуществляется от сети.



Рис.1. Принципиальная схема гибридной микрогрид системы на основе ВИЭ, разработанной авторами

2. *Схемы подключения.* На рис.2 представлена схема подключения микрогрид системы, включающая СХЭ, ФЭС и ДГ.

На рис 3 и 4 представлена установка СХЭ Jinco Solar 50KW-704V192Ah и приведен общий вид размещения 11 аккумуляторных батарей по 192 Ач, 64 В в СХЭ 50 кВт/135 кВт ч.

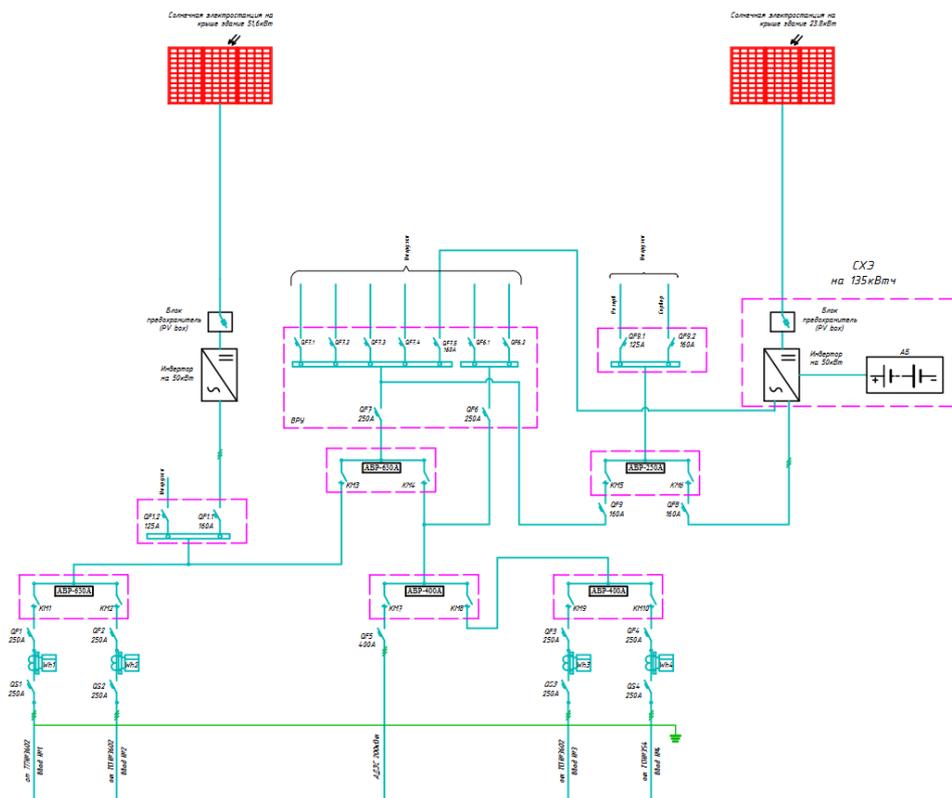
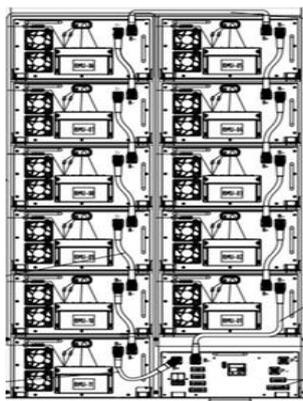


Рис. 2. Электрическая схема подключения микрогид системы, включающая СХЭ, ФЭС и ДГ



Рис.3. Внешний вид СХЭ Jinko Solar 50KW-704V192Ah 1 Cluster 135KWh



а



б

Рис.4. Схема подключения (а) и общий вид (б) размещения 11 аккумуляторных батарей по 192 Ач, 64 В в СХЭ

Результаты и их обсуждение.

1. *Поведение системы в сетевом режиме (Grid-connected).* Система может работать в сетевом и автономном режимах, что требует сложных переходов управления. Исследование управления энергопотреблением микрогрид системы на основе ВИЭ с HESS для различных режимов работы позволяет постепенно регулировать скорость изменения мощности для плавного регулирования флуктуаций фотоэлектрической мощности, что повышает надежность.

- **Сетевой режим:** Максимизация использования фотоэлектрических модулей, заряд ESS избытком энергии, продажа излишка в сети.

- **Автономный режим:** Использование PV и ESS для покрытия нагрузки с дизельным генератором в качестве резерва.

Переход между режимами требует обнаружения сбоев сети и плавного переключения, чтобы избежать перебои в энергоснабжении.

Рассмотрим *функциональную схему и режимы работы* гибридной микрогридсистемы объекта в Ташкенте, включающей сетевую солнечную электростанцию (СЭС) мощностью 23.8 кВт, систему хранения энергии (СХЭ) JinkoSolar на 50 кВт/135 кВт·ч с гибридным инвертором, дизель-генератор (ДГ) 200 кВт, внешнюю электрическую сеть, нагрузку объекта, а также интеллектуальную систему управления (EMS). Представим две диаграммы (рис.5,6): для режима работы *с подключенной сетью* и *автономного (островного) режима*. На схемах сплошными линиями показаны физические электрические связи, а стрелками – направления потоков энергии. Штриховыми линиями обозначены информационно-управляющие связи EMS (управляющие сигналы и обратная связь для мониторинга).

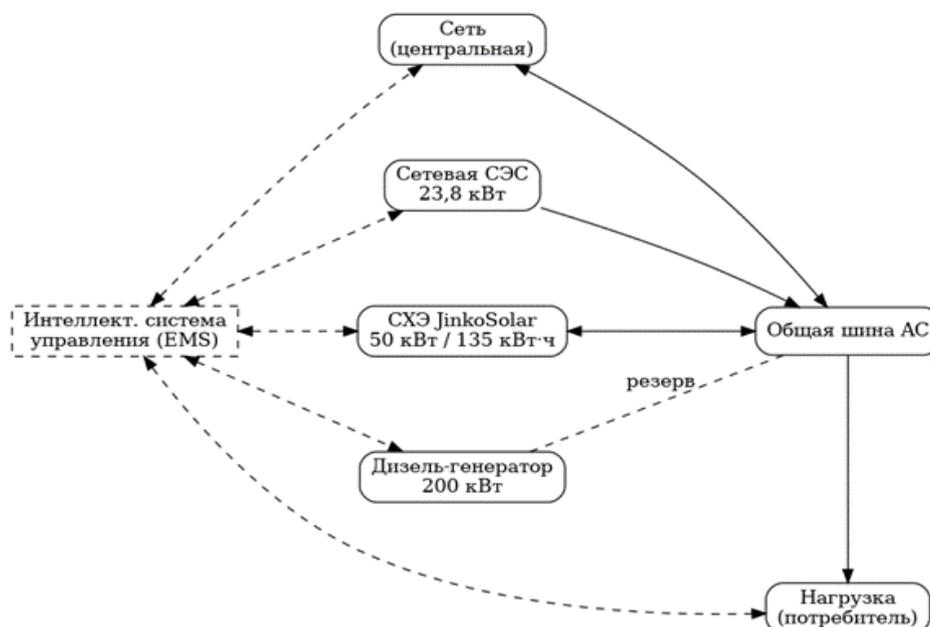


Рис.5. Гибридная микрогрид система в сетевом режиме (подключена к внешней энергосети)

На рис.5 на основе «**Сценария 1**» представлена работа микрогрид системы в сетевом режиме (Grid-Connected). В этом режиме микрогрид система работает параллельно с центральной сетью, и внешняя сеть обеспечивает баланс энергии. Солнечная установка (23.8 кВт СЭС) генерирует ЭЭ, которая в приоритете направляется на покрытие нагрузки объекта. Избыток солнечной энергии может

отправляться в сеть или использоваться для зарядки батарей СХЭ. СХЭ (батарея 135 кВт·ч с инвертором 50 кВт) накапливает излишки энергии днём и может разряжаться в часы пиковой нагрузки или ночью, поддерживая нагрузку и снижая потребление из сети.

Дизельный генератор в сетевом режиме находится в резерве (не задействован), поскольку стабильное электроснабжение поддерживается за счёт комбинации солнечной генерации, батарей и внешней сети. EMS выполняет прогнозирование выработки СЭС и потребления, оптимизирует диспетчеризацию энергии, например, планирует заряд/разряд батареи на основе прогноза солнечной радиации и графика нагрузки.

Система управления постоянно мониторит состояние сети, заряд батарей (SOC), выходную мощность СЭС и состояние ДГ. При сбоях или отключении внешней сети EMS автоматически инициирует переход в автономный режим, размыкая соединение с сетью и обеспечивая бесперебойное электроснабжение от внутренних источников.

2. *Поведение системы в автономном режиме (Islanded).* На рис.6 на основе «Сценария 2» представлена работа микрогрид системы в Автономном режиме (Islanded). В случае потери внешней сети или при намеренном переходе в островной режим микрогрид системы функционирует автономно, питая нагрузку только от локальных источников. Центральная сеть физически отключается (пункт соединения разомкнут), и общая АС-шина микросети переходит под управление гибридного инвертора (СХЭ), который поддерживает частоту и напряжение. Солнечная электростанция продолжает питать нагрузку напрямую: если генерации СЭС больше, чем потребление, излишек энергии направляется на заряд СХЭ.

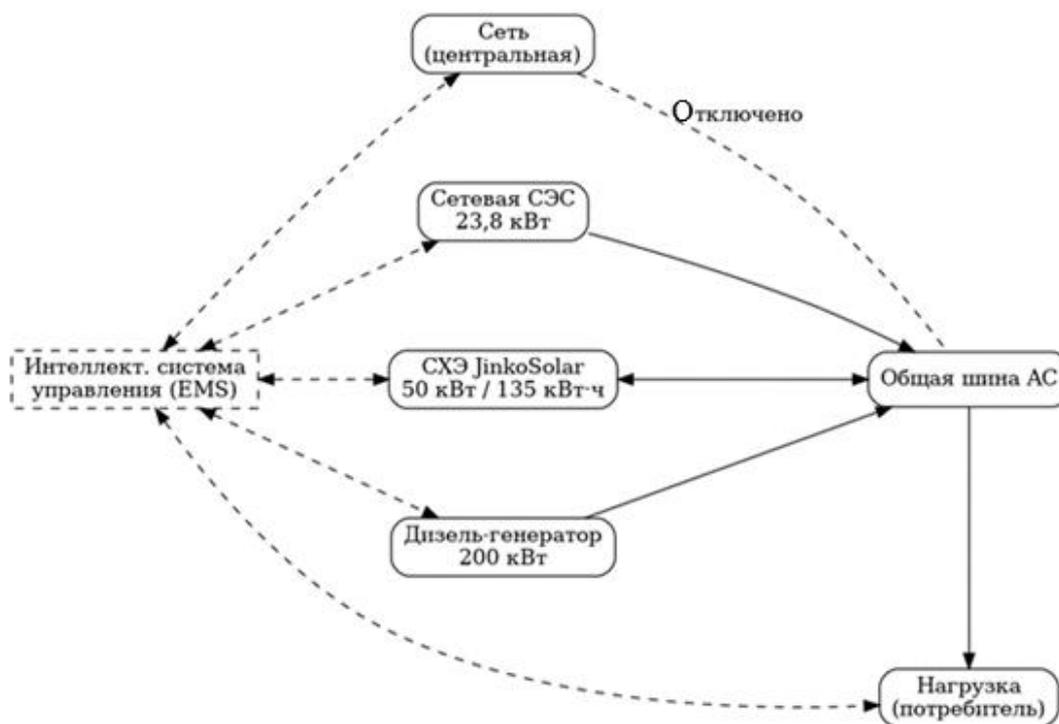


Рис. 6. Гибридная микрогрид система в автономном (“островном”) режиме (отключена от внешней сети)

Если солнечной энергии недостаточно для покрытия нагрузки (например, ночью или при низкой генерации), батарея разряжается, отдавая энергию в сеть микросети для обеспечения потребителей. Дизель-генератор при работе в острове служит резервным источником: EMS автоматически запускает ДГ 200 кВт, когда заряд батареи снижается ниже порога, или суммарной мощности СЭС и СХЭ не хватает для текущей нагрузки. При включении ДГ его энергия поступает на общую шину и далее к нагрузке, при необходимости одновременно часть мощности может идти на подзаряд батарей (для экономичной работы ДГ и поддержания запаса энергии).

3. *Стратегии управления и уровень автоматизации.* Интеллектуальная система управления координирует работу инвертора и дизельного генератора, обеспечивая баланс мощности и стабильность параметров микрогрид системы (частоты, напряжения) в реальном времени. EMS также осуществляет непрерывный мониторинг состояния внешней сети. При восстановлении централизованного электроснабжения система синхронизирует параметры с внешней сетью и плавно возвращается в сетевой режим.

В табл. 2 приведены основные стратегии управления, реализованные в микрогрид системе, включая прогнозно-оптимизационные подходы, алгоритмы заряд/разряда и адаптивные сценарии переключения режимов.

Таблица 2

Основные стратегии управления и функции интеллектуальной микрогрид системы

Стратегия	Описание	Преимущества	Применение
MPPT для PV	Отслеживание точки максимальной мощности	Повышение генерации фотоэлектрической установки	Сетевой и автономный режимы
Прогнозное управление	Прогнозирование выработки СЭС и графика нагрузки	Оптимизация режимов работы, снижение затрат	Уровень EMS, сценарии переходов
Управление зарядом ESS	Контроль заряд/разряд на основе уровня заряда (SoC)	Баланс энергопотоков, продление срока службы СХЭ	Все режимы работы
Алгоритм диспетчеризации верхнего уровня	Переключение между режимами на основе условий эксплуатации	Адаптивность, устойчивость при сбоях	Переходы между сетевым и островным режимами
Ограничение скорости изменения	Сглаживание флуктуаций фотоэлектрической мощности	Повышение стабильности и надёжности энергоснабжения	Работа в сетевом режиме

Блок управления микрогрид системы должен быть многоуровневым, адаптивным и консервативным, чтобы обеспечить надёжность и устойчивость. Использование современных технологий, таких как ИИ, и стратегий, таких как управление на основе прогнозирования, может значительно повысить производительность. Использование прогнозных алгоритмов в рамках EMS, наряду с обеспечением кибербезопасности, значительно повышает устойчивость и надёжность функционирования микрогрид системы в различных сценариях эксплуатации.

4. *Коэффициент замещения электроэнергии от централизованной сети.* Для количественной оценки вклада возобновляемой генерации в энергоснабжение объекта введён показатель *коэффициент замещения*. Он отражает долю ЭЭ, которая ранее потреблялась из централизованной сети и была заменена выработкой от ВИЭ в составе микросети. Расчёт данного коэффициента производится как отношение объёма энергии, потреблённой объектом от

солнечной установки (с учётом энергии, аккумулированной и отдаваемой СХЭ), к общему энергопотреблению объекта за аналогичный период, выраженное в процентах. В случае рассматриваемой пилотной системы годовое энергопотребление объекта составляет порядка 112 320 кВт·ч, и из них около 35% обеспечивается за счёт солнечной генерации и накопленной в батареях энергии. Соответственно, коэффициент замещения при использовании микрогрид системы достигает примерно 0.35 (т. е. ~35%) – порядка одной третьей части ЭЭ, которую объект ранее получал бы из внешней электросети, теперь покрывается за счёт локальной солнечной микрогрид системы. Данный показатель демонстрирует успешность интеграции ВИЭ – даже при относительно небольшой мощности СЭС доля собственной генерации в энергобалансе объекта весьма значительна. Увеличение установленной мощности ВИЭ: и ёмкости СХЭ в будущем позволит повысить коэффициент замещения, сокращая зависимость объекта от центрального энергоснабжения и уменьшая углеродный след его энергосистемы.

Выводы. Проведённое исследование позволило эмпирически подтвердить применимость многокритериального подхода к оценке надёжности и устойчивости микрогрид систем, основанного на классификации технических, экономических, экологических и управленческих индикаторов с последующей их адаптацией к региональным условиям эксплуатации.

Разработанная и внедрённая в г.Ташкенте гибридная микрогрид система, включающая ФЭУ, СХЭ, ДГ и интеллектуальную управляющую платформу, продемонстрировала стабильную работу в течение одного года (2024) как в сетевом, так и в автономном режимах, обеспечивая беспереывное энергоснабжение объекта при перебоях внешней сети.

Внедрение интеллектуальной системы управления на базе EMS с алгоритмами прогнозирования обеспечило эффективное прогнозирование генерации и потребления, автоматическое переключение между режимами и рациональное распределение энергетических потоков. Экспериментальная система достигла коэффициента замещения на уровне 35%, что свидетельствует о высокой доле покрытия нагрузки за счёт локальной генерации, а также обеспечила автономную работу объекта продолжительностью до 12 ч. без подпитки из внешней сети. Следует отметить, что коэффициент усиления (КУ) республики может обеспечить коэффициент замещения ЭЭ от централизованной сети до 50% и более, однако, экономические и территориальные ограничения сдерживают масштабирования данных систем.

Практическая реализация пилотной микрогрид системы подтвердила, что комплексное сочетание ВИЭ, СХЭ, резервных источников и интеллектуального управления обеспечивает энергетическую независимость, снижение эксплуатационных издержек и сокращение выбросов загрязняющих веществ, что открывает возможности для масштабирования подобных решений в аналогичных условиях.

Заключение. Настоящая работа обосновала необходимость и реализуемость внедрения гибридных микрогрид систем на основе ВИЭ, СХЭ и интеллектуального управления как устойчивого решения для повышения надёжности локального энергоснабжения. На основе всестороннего анализа международных подходов и нормативных требований разработана методология оценки микрогрид систем, охватывающая технические, экономические, экологические и управленческие критерии, адаптированные к климатическим условиям эксплуатации в Республике Узбекистан.

Внедрение пилотной системы, включающей ФЭС, СХЭ и ДГ, подтвердило высокую эффективность интеллектуальной системы управления в обеспечении

автономного режима, прогнозировании генерации и оптимизации энергетических потоков. Полученные результаты показали достижение высокого коэффициента замещения (до 35%), снижение эксплуатационной зависимости от внешней сети, сокращение выбросов CO₂ и обеспечение до 12 ч автономной работы объекта. Таким образом, продемонстрирована высокая *технологическая и операционная устойчивость* микрогрид системы в условиях переменной генерации и аварийных отключений.

Выявлено, что комплексный подход к проектированию микрогрид систем, сочетающих ВИЭ, СХЭ, резервные источники и интеллектуальное управление, обеспечивает не только надёжность и экономическую эффективность, но и способность систем устойчиво функционировать при внешних и внутренних возмущениях.

Учитывая полученные результаты, в продолжение данной работы представляется целесообразным сосредоточиться на параметрической оптимизации конфигураций микрогрид систем. Будущие исследования будут направлены на повышение их энергетической эффективности, операционной устойчивости и адаптивности к различным профилям нагрузки и региональным условиям эксплуатации.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Renewable energy statistics 2020. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>.
2. World Energy Outlook 2021. IEA <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
3. World Development Report 2020. <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2020>.
4. Mirzabayev A.M., Махкамов Т.А., Кудратов А.Р., Мухаммадова Ш.А., Махкамова Л.Р. Влияние точки подключения сетевого инвертора на эффективность работы фотоэлектрической станции // Материалы конференции «Проблемы и пути решения эффективного использования альтернативных источников энергии». Карши, 2024. 1 – 2 ноября. С.477 – 480.
5. Kiehadrouinezhad M., Merabet A., Abo-Khalil A. G., Salameh T., & Ghenai C. Intelligent and optimized microgrids for future supply power from renewable energy resources: A review. *Energies*, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15093359>.
6. Liu X., & Su B. Microgrids – an integration of renewable energy technologies. 2008 China International Conference on Electricity Distribution, 1–7, 2008. <https://doi.org/10.1109/CICED.2008.5211651>.
7. Thale S., Wandhare R., & Agarwal V. A novel reconfigurable microgrid architecture with renewable energy sources and storage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3). 2015. P. 1805–1816. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2350083>.
8. Etzeberria A., Vechiu I., Vinassa J., & Camblong H. Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids: A review. 2010 Conference Proceedings IPEC, 2010. 532–537. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5697053>.
9. Kandari R., Neeraj N., & Micallef A. Review on recent strategies for integrating energy storage systems in microgrids. *Energies*, 2022. <https://doi.org/10.3390/en16010317>.

10. Murty V. V. S. N., & Kumar A. Optimal energy management and techno-economic analysis in microgrid with hybrid renewable energy sources. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000273>.
11. Rosales-Asensio E., de Simón-Martín M., Borge-Diez D., Blanes-Peiró J., & Colmenar-Santos A. Microgrids with energy storage systems as a means to increase power resilience: An application to office buildings. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.02.043>. 2019.
12. Guo Y., & Zhao C. Islanding-aware robust energy management for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(3), 2018. P.1301–1309. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2585092>.
13. Akkur M., Singh S., Iqbal M., & Kaur S. Renewable-based microgrid energy management: A comprehensive exploration of techniques, strategies, and long-term viability. *Multidisciplinary Reviews*. <https://doi.org/10.31893/multirev.2023ss051.2024>.
14. Zhang L., Wang F., Xu Y., Yeh C., & Zhou P. Evaluating and Selecting Renewable Energy Sources for a Microgrid: A Bi-Capacity-Based Multi-Criteria Decision Making Approach // *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12, 2021. P. 921-931. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3024553>.
15. Rao K., & Kumar Y. Comprehensive Modelling of Renewable Energy Based Microgrid for System Level Control Studies. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2021. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i1.11745.g8127>.
16. Andrei H., Gaiceanu M., Stănculescu M., Andrei P., Buhosu R., & Badea C. Energy Storage Systems in Microgrid. *Power Systems*. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_8.
17. Технические условия МЭК 62786-3. Распределенное подключение энергоресурсов к сети. Часть 3. Дополнительные требования к стационарной аккумуляторной системе хранения энергии. webstore.iec.ch.
18. IEC 60364-8-82. Low-voltage electrical installations – Part 8-82: Functional aspects—Prosumer’s low-voltage electrical installations. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/103892/6fdc6f0e490f4feb95a8d93b94524616/IEC-60364-8-82-2022.pdf>.
19. Технические условия МЭК 62786-3 МЭК ТС 62786-3:2023 webstore.iec.ch.
20. Технические условия МЭК 62351 – безопасность связи протоколов в энергетических системах. promwad.com.
21. 60364. Низковольтные электроустановки. Правила подключения. electrical-installation.org.
22. Технические условия МЭК 62898-1:2017/AMD1:2023. Amendment 1 – Microgrids – Part 1. webstore.iec.ch.
23. Показатели энергоэффективности: руководство по эффективности для ISO 50001. 4cpl.com.
24. IEC 61850. Protocol: Features, Information Model, and Combination with MQTT. pmc.ncbi.nlm.nih.gov.
25. IEC 61499 и решения с открытым исходным кодом для разработки систем управления. scitepress.org.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИНАХ С УЧЁТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА

В обзорной статье рассмотрены современные методы моделирования переходных процессов явнополюсных синхронных машин с учётом насыщения магнитопровода. Цель работы – анализ существующих подходов и обоснование необходимости учета насыщения в математических моделях синхронных машин. Научная новизна обзора заключена в комплексном анализе отечественных и зарубежных исследований, предоставляющем глубокое сравнительное рассмотрение методов моделирования насыщения. Показано, что для обеспечения высокой точности цифрового моделирования и надёжности систем управления и защиты необходимо включение нелинейных свойств стали магнитопровода в модель. Приведены результаты сравнительного анализа известных моделей: выявлены их достоинства и ограничения, влияющие на точность воспроизведения переходных процессов. На основе анализа сформулированы практические выводы и рекомендации по повышению адекватности моделирования синхронных машин при насыщении магнитной системы.

Ключевые слова: синхронный двигатель, переходный процесс, учёт насыщения магнитопровода, электромагнитное поле, дифференциальное рассеяние.

А.К. Халбутаева

Магнит ўтказгичнинг тўйинганлигини ҳисобга олган холда аён кутбли синхрон машиналарда ўткинчи жараёнларни моделлаштиришнинг замонавий ёндашувларини таҳлили

Ушбу таҳлилий мақолада магнит ўзакнинг тўйиниши ҳисобга олинган аён кутбли синхрон машиналарнинг ўткинчи жараёнларини моделлаштириш усуллари кўриб чиқилади. Мақоланинг мақсади – мавжуд ёндашувларни таҳлил қилиш ва замонавий синхрон машиналар моделларида магнит занжир тўйинишини ҳисобга олиш зарурлигини асослаш. Тадқиқотнинг илмий янгилиги шундаки, унда маҳаллий ва хорижий тадқиқотлар чуқур солиштирилиб, магнит тўйинишини моделлаштириш усуллари ҳар тарафлама таҳлил қилинган. Натижалар шуни кўрсатадики, юқори аниқликдаги рақамли моделлаштириш ва электропривод тизимларининг ишончилигини таъминлаш учун магнит занжирнинг номаълумланиш хусусиятларини моделга киритиш зарур. Мавжуд моделларнинг таққосий таҳлили уларнинг афзаллик ва камчиликларини аниқлаш имконини берди ҳамда магнит тўйиниши шароитида синхрон машиналарни моделлаштириш аниқлигини ошириш бўйича амалий тавсиялар ишлаб чиқилди.

Калит сўзлар: синхрон мотор, ўткинчи жараён, магнит занжирнинг тўйинганлигини ҳисобга олиш, электромагнит майдон, дифференциал тарқоқлик.

А.К. Khalbutaeva

Review of modern approaches to modeling transient processes in salient-pole synchronous machines taking into account magnetic circuit saturation

This review article focuses on contemporary approaches to modeling the transient processes of salient-pole synchronous machines with consideration of magnetic core saturation. The aim is to analyze existing methods and highlight the necessity of accounting for saturation in synchronous machine models. The scientific novelty lies in a comprehensive analysis of both domestic and international studies, providing an in-depth comparative examination of saturation modeling techniques. It is shown that incorporating the nonlinear magnetic properties of the core is essential for achieving high accuracy in digital simulations and for ensuring reliable design of control and protection systems. The results of a comparative analysis of known models are presented: their advantages and limitations in reproducing transients under saturation are identified. Based on the analysis, practical conclusions and recommendations are formulated to improve the fidelity of synchronous machine modeling when magnetic saturation is taken into account.

Keywords: synchronous motor, transient process, consideration of magnetic circuit saturation, electromagnetic field, differential scattering.

Как известно, явнополюсные синхронные машины применяются на электрических станциях, крупных промышленных предприятиях, насосных станциях и в других отраслях. Безаварийная эксплуатация этих машин во многом зависит от правильного выбора и расчёта параметров при проектировании. На современном этапе развития техники к точности расчёта параметров и характеристик электрических машин предъявляются повышенные требования. В условиях цифровизации промышленности и высоких стандартов энергоэффективности возникает необходимость в более точном моделировании переходных процессов синхронных машин, особенно с учётом насыщения магнитопровода. Этот фактор, ранее часто игнорируемый или учитываемый в упрощённой форме, существенно влияет на электромагнитные процессы, особенно при динамических режимах работы [1,2].

Известно, что в общей теории электрических машин для упрощения математических моделей вводился ряд допущений [2], позволявших рассматривать идеализированную модель вместо реальной машины. Многолетний опыт исследований показал, что классические методы расчёта, базирующиеся на этих упрощениях, зачастую давали удовлетворительную сходимость с экспериментом.

Однако при таком подходе влияние насыщения магнитной системы учитывалось лишь косвенно, например, путём введения коэффициентов насыщения для продольной и поперечной реактивности, либо использования эквивалентной усреднённой кривой намагничивания [3]. Подобный упрощённый учёт действительно приемлем при умеренном уровне насыщения, но при глубоком насыщении (например, в области зубцовых зон статора или ротора) точность модели заметно снижается. Тем не менее, вплоть до середины XX в. большинство практических расчётов переходных процессов выполнялось с помощью таких линеаризованных моделей, где насыщение отражалось изменением одного эффективного реактивного сопротивления. Лишь результаты экспериментов (например, испытания Потье) привлекались для корректировки параметров, а систематического учёта переменного характера насыщения не проводилось.

В современных синхронных машинах тенденция к уменьшению массогабаритных показателей привела к тому, что рабочая точка магнитной системы смещается в область насыщения, т. е. значительно выше так называемого «колена» намагничивания. При изменении напряжения, частоты или нагрузки степень насыщения магнитопровода заметно меняется, а вместе с ней — и параметры машины. Особенно в переходных режимах выясняется, что индуктивности и ЭДС не остаются постоянными при динамическом изменении насыщения.

Таким образом, для адекватного моделирования требуется учитывать зависимость параметров от режима работы. Кроме того, в реальных машинах и другие параметры могут изменяться: например, активное сопротивление обмоток растёт с температурой и изменением частоты тока, а реактивные сопротивления зависят от конструкции активной зоны, степени локального насыщения и характера нагрузки. Все эти нелинейные эффекты должны быть отражены в модели, иначе расчёт может существенно расходиться с поведением реального устройства.

Насыщение магнитной системы в первую очередь влияет на спектр магнитного поля в машине. Увеличение степени насыщения приводит к появлению дополнительных высших гармоник магнитного потока, токов и напряжений. Высшие гармонические составляющие поля изменяют

дифференциальные (зубцовые) реактивности рассеяния, влияя на электромагнитный момент и характеристики переходного процесса. При этом пренебрежение насыщением может привести к недостоверному прогнозированию бросков тока, перенапряжений и колебаний момента при нестационарных режимах.

Актуальность корректного учёта насыщения магнитопровода обусловлена и современными тенденциями развития электроэнергетики и электрооборудования.

Во-первых, стремительное развитие средств цифрового моделирования (цифровые двойники, CAD/CAE системы) позволяет проводить сложные вычислительные эксперименты на этапе проектирования. Однако для того, чтобы цифровой двойник синхронного двигателя надёжно заменил натурные испытания, математическая модель должна адекватно воспроизводить нелинейные свойства стали магнитопровода. В противном случае виртуальное моделирование не сможет полноценно отразить реальные процессы, что замедлит внедрение технологий Industry 4.0 в электрооборудовании.

Во-вторых, курс на импортозамещение и развитие отечественных систем электропривода требует совершенствования национальных методик расчёта электрических машин. Учет насыщения – один из самых сложных аспектов такого расчёта, от решения которого во многом зависит способность промышленности самостоятельно проектировать эффективные и надёжные синхронные машины [4].

Однако повышенные требования к надёжности и энергоэффективности электроприводов ставят задачу точного предсказания переходных процессов при различных режимах (пуски, торможения, аварийные ситуации). Только учитывая нелинейность магнитной системы, можно правильно оценить экстремальные броски токов, перенапряжения и колебания электромеханического момента, что критически важно для разработки систем управления и защиты [5].

Таким образом, проблема учёта насыщения магнитопровода в моделировании явнополюсных синхронных машин является крайне актуальной для современной электротехнической науки и практики. Необходим всесторонний обзор существующих подходов к её решению. Настоящая работа обобщает опыт отечественных и зарубежных исследований в этой области, что позволяет выявить достижения и недостатки различных методов и наметить пути дальнейшего развития моделирования синхронных машин с насыщением.

Основная часть. Исследования идеализированных электрических машин, особенно синхронных машин с явно выраженными полюсами ротора [1,2], проводятся без учета нелинейной зависимости кривых намагничивания. На этой основе, используя метод наложения, токи, электродвижущие силы и магнитные потоки в уравнениях разлагаются на отдельные составляющие, затем определяются их суммарные значения.

В современной теории нелинейных электрических цепей в зависимости от различных факторов и степени нелинейности разработан целый ряд совершенных методов расчета и анализа нелинейных цепей [6,7], связанных с проблемами проектирования электротехнических устройств. Из них наиболее часто применяемыми в вопросах решения задач электрических машин являются: кусочно-линейный метод анализа; графический метод эквивалентного преобразования; приближенные аналитические методы исследования периодических функций, в частности, метод гармонической линеаризации.

Метод гармонической линеаризации, предложенный Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым, являющийся основой частотного метода анализа,

используется в расчетах и анализе многих электрических машин. По этому методу анализа периодическая функция разлагается на гармонический ряд Фурье, все высшие гармонические составляющие отбрасываются. Все расчеты выполняются на основе первой – основной гармонической составляющей функции, с использованием универсального метода комплексных амплитуд и таких важных понятий, как комплексное сопротивление, которые очень широко применяются при анализе линейных электрических и магнитных цепей в установившемся синусоидальном режиме [5,8]. Особенностью метода гармонической линеаризации является то, что для его применения необходимо выполнить следующие условия: 1) в цепи при воздействии на входе гармонического сигнала установившаяся периодическая реакция должна иметь тот же период, что и входное воздействие; 2) основная гармоника реакции, частота которой равна частоте воздействия, должна доминировать над остальными гармониками. Для выполнения данного условия необходимо, чтобы нелинейность в системе была не сильной, а кроме того, чтобы частотные характеристики линейной части ослабляли высшие гармоники. При выполнении этих условий можно пренебречь всеми высшими гармониками в выходной реакции и учитывать только основную гармонику. Следовательно, нелинейная система, реакция которой содержит бесконечное число гармоник, заменяется приближенной эквивалентной линейной системой, реакция которой представляется гармонической функцией [9].

В большинстве исследований явнополюсных синхронных двигателей (СД) с учетом насыщения магнитной системы, по результатам которых проводился настоящий аналитический обзор, был использован данный метод. В частности, теория двух реакций, на которой базируется изложение физических процессов в синхронной машине, полностью основана на использовании метода гармонической линеаризации [4,10].

Приведем обзор классических, современных и отечественных исследований учета насыщения магнитопровода синхронных машин при переходных процессах, которые рассмотрены далее:

Классические подходы. Исторически первые модели синхронных машин основывались на линейных характеристиках магнитных цепей. Теория двух реакций Парка [11] и её последующее развитие позволили описать поведение синхронной машины в d - q осях с помощью постоянных параметров – продольных и поперечных индуктивностей. В этих моделях влияние насыщения учитывалось лишь косвенно, например, введением коэффициентов насыщения для продольной и поперечной реактивности или использованием приведённой кривой намагничивания для расчёта ЭДС холостого хода. Такой упрощённый учёт мог быть приемлем в условиях умеренного насыщения, но при сильном насыщении (например, в зубцовой зоне статора и ротора) точность модели заметно снижается. Тем не менее, до середины XX в. большинство практических расчётов переходных процессов в энергосистемах выполнялось с помощью упрощённых моделей: стандартные модели синхронных генераторов в программах устойчивости, как правило, имели одну насыщаемую реактивность (магнитный насыщаемый элемент в продольной оси). Экспериментальные данные (например, результаты испытаний Потье) использовались для корректировки этих параметров, однако, систематического учета переменного характера насыщения не проводилось.

Отечественные и зарубежные исследования. В научных школах стран СНГ проблема насыщения магнитопровода синхронных машин начала подробно исследоваться с 1960-х годов. Учёные электромеханики [12] обращали внимание на нелинейность магнитных характеристик и стремились учесть её во

вращающихся машинах. Один из подходов состоял в методе гармонической линеаризации, когда реальную нелинейную кривую намагничивания заменяли на кусочно-линейную аппроксимацию или эквивалентную индуктивность, зависящую от тока возбуждения и нагрузки [13,14,15]. Например, в работах отечественных авторов 1970–1980-х годов предложены модели, где реактивное сопротивление представлено как функция тока или потокосцепления; в том числе учитывалась перекрестная насыщенность – влияние продольного тока на поперечную реактивность и наоборот. Эти исследования заложили основу для более сложных моделей: были созданы математические схемы синхронного двигателя с нелинейными индуктивностями в цепях статора и ротора. Так, в ряде работ, выполненных в странах СНГ, строились эквивалентные магнитные схемы машины с разбиением магнитопровода на участки. Магнитная цепь представлялась набором нелинейных сопротивлений, характеристики которых соответствовали реальным кривым намагничивания отдельных зон – зубцов, ярма статора, полюсов ротора и т.д. Например, математическая модель явнополюсной синхронной машины, предложенная в работах российских исследователей [16], использовала сеть элементов с нелинейными магнитными проводимостями для учета насыщения в разных частях магнитопровода. Подобный подход позволил исследовать распределение магнитного поля и токов с учетом насыщения, однако имел ограничения: при небольшом числе узлов сетки и упрощенной замене геометрических областей эквивалентными элементами такие модели не могли точно описать высшие пространственные гармоники поля. Тем не менее, исследования этого периода (например, работы в Ташкентском государственном техническом университете) показали принципиальную возможность повышения точности моделирования, если отказаться от предположения о линейности электромагнитных связей в машине [17].

Одним из важных достижений отечественной науки является разработка метода зубцовых контуров (МЗК) в Московском энергетическом институте (МЭИ). Метод МЗК представляет магнитное поле в активной зоне машины в виде схемы замещения, составленной из дискретных линейных и нелинейных проводимостей. Иными словами, от распределенных по объему величин переходят к сосредоточенным параметрам – потокам и магнитным напряжениям отдельных элементов магнитопровода (зубцы, ярмо, полюсные наконечники и т.д.). Поле в воздушном зазоре при этом предполагается плоско-параллельным, а неравномерность распределения магнитного потока вдоль оси учитывается введением эффективной аксиальной длины для каждой части магнитной цепи. Для учета краевых эффектов индуктивности конца обмотки рассчитываются отдельно по установленным методикам и добавляются к схеме в виде сосредоточенных элементов. Метод МЗК зарекомендовал себя как универсальный численный метод анализа насыщенных магнитных полей и процессов в электрических машинах. Он позволяет с приемлемой точностью определять распределение магнитного поля и параметры машины при различных режимах, учитывая сложный характер насыщения зубцовых зон. МЗК нашел применение в ряде исследований переходных процессов синхронных машин в СНГ и может рассматриваться как эффективная альтернатива трудоёмкому полемому моделированию. Однако, как отмечается исследователями МЭИ, даже этот метод характеризуется значительной вычислительной сложностью и требует внимательной настройки модели для конкретной конструкции.

Современные зарубежные исследования. В международной научной литературе за последние десятилетия теме насыщения уделяется не меньше

внимание. Публикации IEEE, IET, Elsevier отражают несколько следующих направлений развития моделей синхронных машин:

- *Усовершенствование d-q моделей.* Например, в [18] представили уточнённую модель синхронного генератора, в которой несколько реактивностей (индуктивностей рассеяния и намагничивания) рассматриваются как насыщаемые нелинейные элементы. Авторами введены факторы насыщения, связывающие параметры насыщенной и ненасыщенной машин, выраженные через конструктивные данные машины, и показано, что такая модель хорошо предсказывает как установившиеся, так и переходные процессы (например, трёхфазное короткое замыкание) с погрешностью менее 20% по сравнению с экспериментом. В работе [19] развивался подход, в котором намагничивающая индуктивность в продольном и поперечном каналах задаётся в виде нелинейной функции токов, например, с использованием полиномиальных аппроксимаций или табличных данных для разных уровней насыщения. Такие модели интегрируются в программы моделирования энергосистем. Современные исследования также рассматривают *фазовые модели*, не ограниченные преобразованием парка, где насыщение учитывается через нелинейности в уравнениях на каждую фазу напрямую [20].

- *Численные полевые методы.* С развитием вычислительной техники стало возможным прямо вычислять магнитное поле синхронной машины методом конечных элементов (МКЭ) для оценки параметров. Конечные элементы широко применяются при проектировании: статический или квазистатический расчет поля дает насыщенные характеристики, например, зависимость индуктивностей от тока. В литературе описаны подходы, где результаты МКЭ в виде магнитных напряжений и потоков используются для обновления параметров схемы замещения в каждый момент времени переходного процесса. Например, в работе [21] представлено моделирование пуска синхронного двигателя, где на каждом шаге решения уравнений движения ротора пересчитывается распределение поля методом конечных элементов [22] с учетом текущего тока, что обеспечивает высокую точность, но требует значительных вычислительных затрат.

- *Интеллектуальные модели и идентификационные методы.* Современный этап развития силовой электроники и систем управления дал толчок к появлению моделей на основе данных *data-driven models*. В частности, применяются нейросетевые модели, обученные по результатам либо полевых расчетов, либо физических экспериментов. Например в [23] разработана нейронная сеть, которая по заданным значениям токов статора и ротора прогнозирует потокосцепления в d- и q-каналах, имитируя насыщенную магнитную характеристику синхронного двигателя. Такая модель встроена в систему векторного управления электроприводом, позволяя контроллеру учитывать насыщение в реальном времени. Другой пример, где используется радиально-базисная функциональная сеть (RBF-нейросеть) для аппроксимации нелинейной зависимости индуктивности от тока в алгоритме Maximum Torque per Ampere (МТРА) управления синхронным двигателем. Результаты показывают уменьшение ошибки оценки тока возбуждения и улучшение энергетической эффективности электрооборудования при различных уровнях насыщения магнитопровода.

Кроме нейронных сетей, используются методы идентификации на основе экспериментальных данных: онлайн-оценки параметров.

К примеру, в [24] предложено идентифицировать параметры синхронной машины (в том числе характер насыщения) по измеренным осциллограммам при ступенчатом возмущении, применяя стохастические алгоритмы.

Эти методы находятся на переднем крае исследований, объединяя достижения силовой электроники, теории управления и машинного обучения для решения задачи учета насыщения.

В табл.1 представлена классификация существующих подходов к моделированию насыщения магнитопровода и их особенности.

Таблица 1

Существующие подходы к моделированию насыщения магнитопровода

№ п/п	Категория	Подходы	Особенности
1	2	3	4
1.	Типы используемых методов	Линейные методы	Не учитывают насыщение, просты в реализации
		Нелинейные методы	Более точны, учитывают насыщение
		Методы кусочно-линейной аппроксимации	Упрощают расчёты, но менее точны
2.	Методы математического моделирования	Аналитические методы:	Быстрые, но менее точные
		- Метод двух реакций	Определяет продольную и поперечную составляющие поля
		- Метод симметричных составляющих	Учитывает симметрию системы
		Численные методы:	Точные, но требуют значительных вычислительных ресурсов
		- Метод конечных элементов	Учитывает геометрию и сложные граничные условия
		- Метод магнитных цепей	Упрощает расчеты для сложных систем
3.	Система координат	Стационарные системы координат	Фазные координаты (a, b, c)
		Вращающиеся системы координат	- Синхронно вращающаяся система (d, q). - Произвольно вращающаяся система
4.	Степень детализации модели	Упрощенные модели (макромодели)	Используются для быстрой оценки
		Детализированные модели	Учитывают геометрию пазов и насыщение отдельных участков магнитопровода.

В табл.2 представлены результаты оценок их преимущества и недостатков при различных подходах, указанных в табл.1.

Таблица 2

Преимущества и недостатки различных подходов

№ п/п	Подход	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
1.	Аналитические методы	Быстрый расчёт, простая реализация	Ограниченная точность, не учитывают сложные эффекты
2.	Численные методы	Высокая точность, учет сложных геометрий и граничных условий	Требуют значительных вычислительных ресурсов, длительное время расчета
3.	Линейные модели	Просты в реализации, подходят для предварительных оценок	Не учитывают насыщение, неприменимы для точного анализа
4.	Нелинейные модели	Учитывают реальные физические процессы, высокая точность	Сложны в реализации, требуют больше времени и ресурсов

Отметим, что ещё одним из основных факторов, влияющих на характеристики переходных процессов пуска в ход СД, являются магнитные потоки пазового рассеяния или сопротивления дифференциального рассеяния (для краткости реактивности рассеяния). Хотя размером эти реактивности рассеяния значительно отличаются от других сопротивлений, они являются одними из основных параметров эквивалентной схемы замещения синхронных машин, входят в состав уравнений, которые описывают статические и динамические электромагнитные и электромеханические процессы и являются исходными величинами при использовании программ расчёта переходных процессов электрической машины [7].

Методы расчета, основанные на классической теории электрических машин, предполагают, что исследуемая электрическая машина является идеальной, т.е. считается, что машина симметричная, имеет гладкий воздушный зазор, стальные участки с нулевым магнитным сопротивлением, обмотки являются синусными и параметры схем замещения постоянные, не зависящие от величин, определяющих режимы их работы [2]. В действительности параметры обмоток машин не являются постоянными: активное сопротивление зависит от ряда факторов, как например, от температуры, изменяющейся с течением времени, и колебаний тока нагрузки; реактивное сопротивление – от конструктивных особенностей активной зоны машины, степени насыщения участков магнитопровода, а также от величины и характера нагрузки. Именно по этим причинам в первой после изобретения синхронных машин работе [13], посвящённой расчету параметров, дифференциальное рассеяние магнитного потока определялось с существенными допущениями. Например, Р.Рихтер для определения индуктивного сопротивления дифференциального рассеяния магнитного потока x_{σ} рекомендует использовать разность индуктивного сопротивления x_1 , обусловленного всеми гармоническими (с учетом

взаимоиндукции от других фаз) поля и индуктивного сопротивления x_1 от основной гармоники поля в воздушном зазоре [25]

$$x_\sigma = x_\delta - x_1, \quad (1)$$

или с коэффициентом дифференциального рассеяния

$$x_\sigma = k_\delta \cdot x_1, \quad (2)$$

где $x_\sigma = (x_\delta - x_1) / x_1$.

Таким образом, в явно полюсной синхронной машине с воздушным зазором, который фактически является не равномерным, подобная неравномерность учитывается тем, что в выражении (2) используется коэффициент k_δ , а значение x_1 рассчитывается для «приведенного» (предполагаемого равномерным) воздушного зазора

$$\delta' = k_\delta \delta, \quad (3)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера); δ – фактическая ширина воздушного зазора. Такой метод предполагает, что под воздействием зубчатости все гармоники уменьшаются в одинаковой мере в отношении k_δ .

По оценкам А.И. Вольдек [14], такое предположение в действительности неверно и поэтому при подобном методе расчета значения x_σ получаются значительно преувеличенными. Это затруднение обычно преодолевают тем, что в формулу для расчета индуктивностей дифференциального рассеяния вводят различные поправки эмпирического характера, либо вовсе отказываются от этих формул. Они возвращаются к введенным в обиход в начале XX в. формулам для так называемого «рассеяния по коронкам зубцов» или «рассеяния зигзагом», используя при этом также различные эмпирические коэффициенты.

Далее предлагают использовать метод расчета поправки к коэффициенту дифференциального рассеяния k_σ , определенного для случая равномерных зазоров асинхронной и синхронной машин на основе использования понятия об удельной магнитной проводимости воздушного зазора и представлении в функции угловой координаты в виде ряда Фурье.

Анализ приведенных ранее работ показывает, что принятые допущения сводились к тому, что вместо зубчатого статора и ротора в расчетах принималась машина с гладким статором и ротором, а также не учитывались влияние демпфирования со стороны вторичных контуров, явнополюсность ротора и насыщение магнитных цепей. В дальнейшем, приближенно в [23], затем более строго стали учитываться зубчатость сердечников статора и ротора, влияние токов, индуктированных во вторичных контурах.

Рассмотрим картину индукции в воздушном зазоре синхронной неявнополюсной машины с зоной односторонней зубчатости, т.е. принимается, что магнитопровод статора является зубчатым, а ротор – гладким (рис.1,а). Кривые распределения магнитной индукции представлены на рис.1,б для случая, когда на протяжении каждого двойного полюсного деления τ в пазах расположено по одной катушке одной фазы с полным шагом $y = \tau$ [14].

Принимается допущение о том, что магнитная проницаемость стали бесконечна ($\mu = \infty$), т.е. не учитывается влияние насыщения магнитопровода на переменные и параметры машины. Определяются магнитодвижущие силы,

индукция, магнитная проводимость на разных участках магнитопровода и аналитические зависимости между ними, используя метод суперпозиции

$$B = \Lambda_{\delta} F, \quad (4)$$

где Λ_{δ} – удельная магнитная проводимость на единицу площади воздушного зазора; F – прямоугольная волна намагничивающих сил. Величину Λ_{δ} определяют путем деления ординат кривых 2 и 3 (рис.1, б). Применение метода наложения для данного случая является приемлемым, так как принимается $\mu = \infty$.

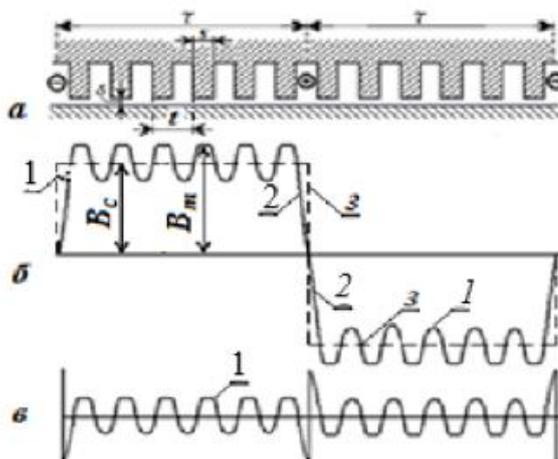


Рис. 1. Зона воздушного зазора неявнополюсной синхронной машины с односторонней зубчатостью (а) и кривые распределения индукции (б, в)

В работе [17] аналитическим методом учитываются зубчатость магнитопровода статора и ротора, явнополюсность и демпфирующие действия вторичных контуров, используются разработанные численные методы расчета электромагнитных процессов электрических машин и учитывается влияние на дифференциальное рассеяние факторов, приведенных ранее. Во всех работах основной магнитный поток разделяется на составляющие, и производятся вычисления отдельных параметров с помощью метода суперпозиции.

Автор работы [10] утверждает, что, используя численные методы конечных разностей и конечных элементов, которые применяются при расчете магнитных полей электрических машин переменного тока, очень сложно раскрыть физические особенности магнитного поля дифференциального рассеяния. Поэтому, учитывая то обстоятельство, что распределение магнитного поля по окружности воздушного зазора в области коронок зубцов является неравномерным, предлагается использовать аналитический метод расчета магнитного поля воздушного зазора. При этом для исследования возможностей учета влияния насыщения на величины полей дифференциального рассеяния с применением аналитического метода расчета магнитного поля воздушного зазора, как и в предыдущих публикациях, принимаются следующие допущения:

- не учитываются демпфирующие воздействия на магнитное поле дифференциального рассеяния обмоток и контуров, расположенных на противоположной стороне воздушного зазора машины;

- при расчете полей дифференциального рассеяния обмотки статора зубцовый сердечник заменяется гладким путем выведения всех проводников в пазах на поверхность расточки статора в виде тонкого слоя, расположенного по

дуге окружности шириной, равной ширине открытого паза, и током, равным полному току паза статора;

- аналогично изложенному, при расчете полей дифференциального рассеяния обмотки ротора все проводники в пазах выводятся на гладкую поверхность сердечника ротора в виде тонкого слоя, расположенного по дуге окружности поверхности сердечника ротора шириной, равной ширине открытого паза, и током, равным полному току паза ротора;

- зубчатый сердечник, расположенный на другой стороне воздушного зазора по отношению к той части, где расположена обмотка, заменяется гладким путем введения коэффициента воздушного зазора.

Аналитическое выражение мгновенного значения напряженности магнитного поля в воздушном зазоре машины (h_T), создаваемой трехфазной обмоткой статора, можно передать следующим образом. Для мгновенного значения тока одной из фазных обмоток при протекании в ней тока гармоники ν -порядка (в момент его прохождения через нуль), когда в двух других они (этой же гармоники), равные по величине и противоположного знаку, записываются в следующем виде:

$$h_T = \sqrt{3} \cdot w_1 \cdot a_1 \cdot \sum_{\nu=1}^{\infty} [k_{\nu} \cdot k_{об.\nu} \cdot k_{pq\nu}] x, \quad (5)$$

$$x \{ \sin \nu \cdot [\varphi - (2p-1) / p \cdot (\pi / 2) - (2\pi / 3p)] \},$$

где a_1 – число параллельных ветвей обмотки статора; w_1 – число эффективных витков одной фазы обмотки; ν – индекс, определяющий порядковый номер гармонической составляющей; k_{ν} – коэффициент укорочения обмотки для гармоники ν – порядка; $k_{об.\nu}$ – обмоточный коэффициент для гармоники ν – порядка; $k_{pq\nu}$ – коэффициент распределения катушечных групп фазы обмотки для гармоники ν – порядка.

Отсюда видно, что в работе принимаются те же допущения, которые принимались в работах предыдущих авторов [13,25,26] и которые считаются источниками искажений расчетных параметров машин переменного тока.

В работе [27] предлагается методика учета нелинейностей насыщения стали магнитопровода синхронной машины двухосного возбуждения с использованием метода на основе теории двух реакций, с применением методов наложения и гармонического анализа, которые предназначены только для линейных электрических и магнитных цепей.

Из рис.1,б видно, что с учетом принятых допущений, если на протяжении одного полюсного деления τ в пазах расположена одна катушка одной фазы с полным шагом $y = \tau$, то число периодов пульсации индукции магнитного потока (или число периодов основной гармонической пульсации магнитного потока) в воздушном зазоре будет равно числу пазов под одним полюсом $q' = z / 2p$. Если учитывать, что в реальных трехфазных синхронных машинах в пазах под одним полюсным делением находятся по одной стороне катушечных групп всех трех фаз, то число периодов основной гармонической пульсации магнитного потока, соответствующее одной фазе обмотки, будет определяться числом пазов на полюс и фазу (если m – число фаз)

$$q = z / (2pm). \quad (6)$$

При этом, принимая во внимание то обстоятельство, что в электрических машинах средних и крупных мощностей число пазов на полюс и фазу составляет $q = 8-10$, можно увидеть, что среди гармонических составляющих пульсации

магнитного потока в воздушном зазоре будет преобладать ее третья гармоническая.

Известно, что зубцы статора и ротора современных электрических машин переменного тока являются наиболее насыщенными частями магнитопровода. Магнитные силовые линии потоков дифференциального рассеяния, в основном, проходят по зубцам статора и ротора (рис.2). Несмотря на это, во всех проанализированных исследованиях по определению влияния нелинейности насыщения магнитопровода на реактивность дифференциального рассеяния машин, гармонические составляющие тока в обмотке определяются путем разложения в ряд Фурье.

Насыщение зубцовых участков магнитопровода, где проходят магнитные силовые линии дифференциального рассеяния, образуется, как правило, суммой первой гармонической результирующего магнитного потока и другими потоками машины. Главенствующая роль в этом отводится основной гармонической составляющей результирующего магнитного потока Φ .

В зависимости от изменения характера нагрузки якоря синхронной машины в пределах $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$, магнитные потоки основной гармонической реакции якоря будут с максимальными мгновенными значениями, следовательно, основные гармонические потоки пазового рассеяния с максимальными мгновенными значениями будут смещаться по отношению к продольной и поперечной осям ротора (см. рис.2).

При реактивном характере тока нагрузки якоря машины пары полюсов магнитных потоков рассеяния по коронкам зубцов с максимальными мгновенными значениями магнитной индукции располагаются по поперечной оси ротора q , а при активной нагрузке – по продольной d .

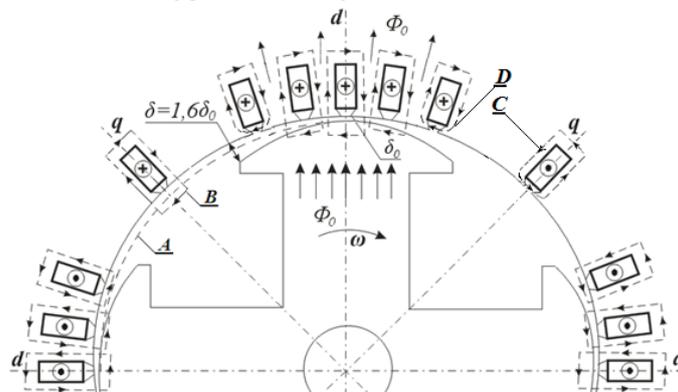


Рис. 2. Магнитные потоки рассеяния

В неявнополюсных синхронных машинах из-за цилиндрической поверхности ротора (пунктирная линия «А» на рис.2) рабочий воздушный зазор между ротором и статором является равномерным по всей длине внутренней окружности статора ($\delta = \delta_0$). Поэтому кривые магнитных силовых линий дифференциального рассеяния всех пазов якоря замыкаются одинаково: через спинку, зубцовую зону сердечника якоря, равномерный воздушный зазор δ и сердечник магнитопровода ротора (как магнитные силовые линии паза «В» на рис.2). В связи с этим влияние воздушного зазора δ на насыщение этих участков будет одинаковым по всей длине окружности ротора.

В явнополюсных синхронных машинах воздушный зазор между ротором и статором в межполюсном пространстве и полюсной зоне является неравномерным. При реактивном характере нагрузки машины магнитная проводимость среды пар полюсов магнитных потоков дифференциального

рассеяния с максимальными мгновенными значениями магнитной индукции меньше, чем по продольной оси. Магнитные силовые линии потоков дифференциального рассеяния будут замыкаться через соседние зубцовые зоны статора, ярмо статора и воздушное пространство между коронками соседних зубцов. При этом из-за значительного воздушного зазора между статором и ротором в межполюсном пространстве эти потоки не будут замыкаться через магнитопровод ротора (магнитные силовые линии пазов «С» на рис.2).

С другой стороны, посередине полюса воздушный зазор между наконечником полюса ротора и внутренней цилиндрической поверхностью статора равен δ_0 , а по краям полюсов $\delta=1.6\delta_0$. Поэтому магнитные силовые линии потоков дифференциального рассеяния пазов, находящихся посередине полюсных наконечников, будут замыкаться через соседние зубцовые зоны статора через тело ротора, а потоки рассеяния пазов, находящихся под краями полюсных наконечников, будут замыкаться только через соседние зубцовые зоны статора, а не через ярмо ротора (силовые линии пазов «D» на рис.2).

Поэтому магнитные потоки дифференциального рассеяния будут находиться под воздействием различной степени насыщения магнитной системы машины и выполнение расчета сопротивлений дифференциального рассеяния синхронных машин с учетом насыщения магнитопровода в этих работах сопряжено с высокой неточностью.

В расчетах принимаются допущения о замене зубчатого статора и ротора гладкими. В то же время реактивность дифференциального рассеяния возникает именно из-за зубчатости магнитопровода. Поэтому высокая точность учета влияния насыщения магнитных цепей на дифференциальное рассеяние магнитного потока в этих публикациях вызывает сомнение.

В исследованиях влияния насыщения на параметры машин переменного тока используют метод суперпозиции (наложения), исключаящий его применение к нелинейным системам. Неточность расчета магнитного потока рассеяния в насыщенных участках магнитопровода машины приводит к существенным погрешностям при определении параметров машины.

Учет влияния характера нагрузки на потоки дифференциального рассеяния явнополюсных синхронных машин в изученных работах не просматривается. В неявнополюсных машинах эта проблема решается значительно проще для всех видов нагрузки. Исследованию насыщения магнитной цепи обычных сердечников магнитопровода (СМ) посвящено большое количество работ. Наибольший интерес вызывают работы, где определение параметров и характеристик производится непосредственно в результате анализа магнитного поля в машине, что позволяет более строго рассматривать проблему насыщения. К исследованиям этого направления относятся работы В.А. Кузнецова [28], А.И. Важнова и И.А. Гордона [14], А.В. Иванова -Смоленского [16], Л.Г. Лернера [27], И.М. Постникова [25], В.В. Домбровского [10].

Современные методы расчета магнитного поля в воздушном зазоре базируются на идеях Р. Рихтера [13]. В методике Р. Рихтера используется графический способ построения кривой поля, если известны магнитодвижущая сила (МДС) статора, ротора и их взаимное положение. На практике чаще всего требуется рассчитать поле, когда заданы три из следующих величин: напряжение, ток статора, ток возбуждения, угол между током и напряжением. При этом приходится прибегать к методу последовательных приближений, что возможно лишь с применением цифровых вычислительных машин (ЦВМ). За счет ряда допущений и аппроксимаций кривых намагничивания стальных участков

магнитопровода вполне возможно перейти от величин, характеризующих поле, к выходным параметрам машины.

Основная задача работы [29] состояла в определении магнитного поля воздушного зазора явнополюсной СМ, где магнитная индукция определялась как сумма первой и высших гармонических (метод суперпозиции). Автор исследует влияние степени насыщения на величину гармоник в установившихся режимах. Метод обеспечивает приемлемую точность при решении поставленной задачи.

В работе [25] обращается внимание на возможное влияние насыщения полюсных наконечников на характеристики машины.

В исследовании [15] рассматривается математическая модель явнополюсной синхронной машины, в которой элементы, моделирующие части магнитных сердечников статора и ротора, имеют нелинейные характеристики и в определенном масштабе соответствуют характеристикам намагничивания моделируемых частей. Авторам удалось исследовать магнитное поле, используя математическую модель. Однако ограниченное число узлов сетки и замены ряда элементов магнитной цепи приближенными аналогами магнитной модели, удобной для анализа интегральных величин, не дало возможности определить высшее гармоническое поле.

На кафедре “Электрические машины” ТашГТУ разработана инженерная методика расчета магнитного поля в воздушном зазоре с учетом насыщения магнитопровода для синхронных машин двухосного возбуждения. Обмотки ротора в них сдвинуты на угол 90° . В частности, в работе [30] исследованы насыщенные синхронные неявнополюсные машины продольно-поперечного возбуждения в установившихся режимах при пульсирующей нагрузке, а в работе [26] исследованы статические режимы названной выше машины с учетом насыщения.

В [31] исследован режим неявнополюсной СМ при пульсирующей нагрузке. Приведенный краткий обзор работ, посвященных исследованию симметричных и несимметричных неявнополюсных СМ, показывает перспективность широкого применения таких машин в промышленных установках. Однако исследование их было основано на линейной теории, не учитывающей насыщение, базировалось на допущении о линейном характере электромагнитных связей между электрическими контурами машины, что существенно снижало точность получаемых расчетных результатов.

Кроме того, для рассмотрения современного состояния исследований и передовых подходов к моделированию переходных процессов явнополюсных синхронных двигателей применимы следующие методы: принципы наложения (суперпозиции), гармонического анализа Фурье, методы двух реакций, вращающихся полей, включая метод симметричных составляющих и любые линейные преобразования переменных [32].

При принятии допущений об идеализации считается, что воздушный зазор равномерный и гладкий (в машине нет пазов на статоре и роторе), обмотки выполнены в виде тонких слоев, создающих синусоидальное распределение МДС в воздушном зазоре, стальные участки не насыщены и магнитная проницаемость стали μ равна бесконечности. Считается также, что машина симметричная (ее обмотки, магнитная система, воздушный зазор симметричны по осям), кривизна воздушного зазора не учитывается, т.е. поле плоскопараллельное [2, 16].

Исследование переходных процессов выполняется с помощью систем дифференциальных уравнений, включающих в себя уравнения линейных электрических цепей и механического движения ротора в дифференциальной

форме [14]. При этом напряжения для фазных обмоток статора записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -d\Psi_a/dt - i_a r_s; \\ u_b &= -d\Psi_b/dt - i_b r_s; \\ u_c &= -d\Psi_c/dt - i_c r_s, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где Ψ_a, Ψ_b и Ψ_c – полные потокосцепления с фазными обмотками a, b и c статора; u_a, u_b, u_c и i_a, i_b, i_c – мгновенные значения фазных напряжений и токов обмоток статора; r_s – активное сопротивление фазных обмоток статора. Для обмоток возбуждения и пусковой обмотки эти уравнения записываются в виде

$$\left. \begin{aligned} u_e &= -d\Psi_e/dt - i_e r \\ 0 &= -d\Psi_n/dt - i_n r_n \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где Ψ_B и Ψ_{II} – полные потокосцепления с обмотками возбуждения и пусковой обмоткой ротора; u_e, u_n и i_e, i_n – мгновенные значения напряжений и токов обмоток возбуждения и пусковой обмотки; r и r_n – активные сопротивления обмотки возбуждения и пусковой обмотки.

Уравнение равновесия моментов двигателя записывается в следующем виде:

$$M_c = M_{эм} + J \cdot d\omega_r / dt, \quad (9)$$

где M_c – момент сопротивления производственного механизма; $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя; J – момент инерции ротора; ω – угловая скорость вращения ротора.

В данной статье рассматривается переходный процесс прямого пуска в ход синхронного двигателя. При пуске обмотка возбуждения отключается от источника постоянного тока и замыкается на внешнее сопротивление. Пусковая обмотка является короткозамкнутой, поэтому $u_B = 0$ и $u_{II} = 0$. В них индуцируются э.д.с. от вращающегося магнитного поля статора.

Для решения системы уравнений (7) – (9) для ненасыщенного режима СД потокосцепления с соответствующими обмотками делят на отдельные составляющие Ψ_k (где вместо индекса k необходимо принять индексы соответствующих обмоток: a, b, c, B и II). Например, потокосцепление с фазной обмоткой a равно $\delta = (1.5 \div 2.0)\delta_m$:

$$\Psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{ae} i_e + M_{ald} i_n + M_{allq} i_n, \quad (10)$$

где L_a – индуктивность фазной обмотки a ; M – взаимная индуктивность между ней и другими обмотками (рис.3).

В явнополюсных синхронных машинах не все индуктивности в равенстве (10) являются постоянными коэффициентами. Они зависят от изменяющегося положения ротора относительно фазных обмоток статора при вращении ротора. Аналитические выражения взаимных индуктивностей между фазными обмотками статора и ротора (M_{ae} и M_{ald} и т.д.) представляют собой зависимости первой гармонической угла γ между магнитной осью фазы a и осью d ротора (см. рис.3).

Зависимости ряда индуктивностей от угла поворота γ ротора приводят к усложнению дифференциальных уравнений, когда равенства (10) будут подставлены в уравнения (7) и (8) – коэффициенты при переменных имеют вид гармонических функций угла γ .

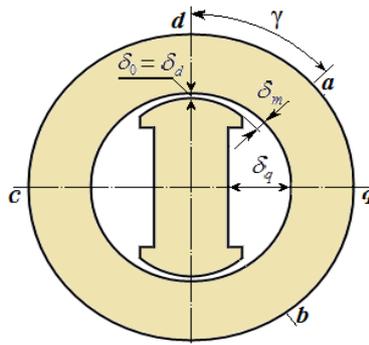


Рис. 3. Магнитные оси синхронной машины

Зависимости ряда индуктивностей от угла поворота γ ротора приводят к усложнению дифференциальных уравнений, когда равенства (10) будут подставлены в уравнения (7) и (8) – коэффициенты при переменных имеют вид гармонических функций угла γ .

Появляется необходимость в преобразовании исходных уравнений таким образом, чтобы они, по возможности, стали уравнениями с постоянными коэффициентами. Подобное преобразование становится понятным, если обратиться к теории двух реакций. Согласно этой теории, рассматривается не реальный магнитный поток в воздушном зазоре, а его составляющие по продольной и поперечной осям машины. Смысл такого разложения состоит в том, что магнитная проводимость для составляющих поля по продольной и поперечной осям постоянны. Поэтому продольный и поперечный составляющие потоки реакции якоря пропорциональны, соответственно, продольному и поперечному токам якоря.

В исследованиях, связанных с математическим моделированием идеализированных синхронных машин, используют именно этот принцип.

Таким образом, вместо реальной электрической машины с трехфазной обмоткой статора принимается идеализированная двухфазная электрическая машина, т.е. реальное результирующее потокосцепление в воздушном зазоре трех - фазной машины заменяется двумя составляющими потокосцеплений, взятыми как проекции на ортогональные оси координат $d - q$ [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ad} &= L_{ad} i_d \\ \Psi_{aq} &= L_{aq} i_q \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При этом за положительное направление тока в обмотке идеализированной машины принимается направление тока от конца катушки к ее началу, за положительное направление оси обмотки или отдельных ее частей, образующих самостоятельные цепи – направление м.д.с. катушек при протекании по ним токов в положительном направлении. В ортогональной системе координат ось d соответствует продольной оси d ротора, совпадающей с положительным направлением вектора м.д.с. обмотки возбуждения. Положительное направление оси q принимается опережающим продольную ось ротора на угол $\pi/2$. При наличии на роторе двигателя пусковой обмотки она, как правило, представляется двумя контурами. При положительном направлении тока в контурах пусковой обмотки вектор м.д.с. и ось контура Pd совпадают с осью d ротора, а вектор м.д.с. и ось Pq контура – с осью q ротора.

При выборе координатных осей для получения дифференциальных уравнений равновесия напряжений с постоянными коэффициентами при переменных рекомендуют принимать такую ортогональную систему

координатных осей, в которой преобразованные контуры обмоток были взаимно неподвижны. Например, для синхронных машин преобразованная система координат неподвижна относительно осей d и q , жестко связанных с ротором. Для электрических машин с постоянным воздушным зазором, например, асинхронных двигателей, в зависимости от скорости вращения координатных осей, кроме системы осей d и q , жестко связанных с ротором системы координатных осей, возможны следующие системы [2] ортогональных осей:

1) оси x , y вращаются с произвольной скоростью

$$\omega_x = \frac{d\gamma_{ax}}{dt},$$

где γ_{ax} – угол между осью фазы a и координатной осью x , отсчитываемый по положительному направлению от фазы a к x ;

2) α – внутренний угол, соответствующий половине ширины шлицы паза.

3) оси u , v синхронно вращаются – это частный случай осей x , y , когда скорость вращения осей, выраженная в относительных единицах, равна единице.

При анализе различных режимов работы электрических машин, особенно при теоретических исследованиях переходных процессов, принято использовать относительные единицы [1, 2].

В работе [33] отмечается, что системы дифференциальных уравнений при пуске двигателя с переменной частотой вращения ротора квазилинейны (похожи на линейные уравнения). Поэтому полагается, что к ним можно применить принцип наложения и другие любые линейные преобразования переменных, включая гармонический анализ, методы двух реакций, вращающихся полей и симметричных составляющих. Вследствие этого возможны два подхода к аналитическим и численным исследованиям переходных процессов: посредством решения дифференциального уравнения для полных мгновенных значений переменных и для компонентов переменных (отдельных симметричных составляющих, гармоник и др.).

В исследовании представлен анализ высших пространственных гармоник в динамических режимах асинхронных двигателей. Приводятся высшие гармонические токи, внесенные из сети, которые не относятся к дифференциальному рассеянию.

Пространственные гармоники поля затрудняют пуск, вызывают нестабильность частоты вращения, добавочные потери, вибрации и шумы, влияют на выбор чисел пазов и на величину пускового момента. Математическое описание гармонических составляющих поля в воздушном зазоре зависит от физической природы их появления. Вначале представлены системы дифференциальных уравнений с учетом полей, созданных гармониками магнитодвижущих сил обмоток, а затем принимается во внимание двухсторонняя зубчатость зазора. Эти задачи решаются в линейном приближении. Многофазные обмотки преобразуются в двухфазные с учетом различного направления вращения некоторых гармоник одного порядка в трехфазных и двухфазных машинах. При равномерном рабочем зазоре каждая гармоника рассматривается отдельно от других, т.е. реальная машина представляется в виде ряда элементарных, связанных общим валом. Выполнено преобразование их систем дифференциальных уравнений к координатам, вращающимся с произвольной скоростью, в которых переменные статора имеют различные частоты. Они одинаковы только в неподвижных координатах α , β , выбираемых для построения

результатирующей модели машины, где обмотки статоров элементарных соединяются последовательно. Токи их роторов нельзя объединить в результирующую единую систему координат, потому что они имеют различные частоты и параметры ротора для разных гармоник. Поэтому в математической модели используются дифференциальные уравнения для полных токов статора и отдельных составляющих токов ротора. После ее решения полный ток ротора в любом режиме определяется как сумма мгновенных значений токов элементарных машин. Электромагнитный момент в двигателе с гладким зазором создается только за счет взаимодействия пространственных гармоник с одинаковыми числами полюсов.

В работе [2] используются методы исследования, основанные на применении идеализированной электрической машины, без учета влияния степени насыщения магнитопровода.

Кроме того, расчет переходных процессов насыщенных электрических машин с учетом дискретности структуры обмоток и взаимного перемещения зубчатых сердечников возможен только на основе анализа поля в активной зоне численными методами, которые в настоящее время получили большое распространение [34]. Одним из наиболее эффективных и универсальных численных методов анализа полей и процессов насыщенных электрических машин является метод зубцовых контуров (МЗК), разработанный в МЭИ. В соответствии с методом МЗК магнитное поле в активной зоне машины представляется схемой замещения в виде дискретных линейных и нелинейных проводимостей, т.е. от локальных значений векторов напряженности и индукции переходят к интегральным скалярным значениям потока и магнитного напряжения участков магнитной цепи. Магнитное поле в активной зоне электрической машины считается плоскопараллельным, а неоднородность его структуры вдоль оси учитывается введением расчетных аксиальных длин магнитопроводов и зазора. При таком подходе индуктивности лобового рассеяния рассчитываются автономно по существующим методикам и используются в сосредоточенной форме [35].

Анализируя представленные исследования, можно отметить эволюцию взглядов на проблему моделирования насыщения магнитопровода. Ранние и классические работы дали фундамент для понимания эффектов насыщения, однако, рассматривали его в усредненном виде. Современные подходы стремятся отойти от упрощения линейности, но одновременно сталкиваются с вызовами сложности моделей. Сопоставление методов учета насыщения показывает следующие ключевые моменты: с повышением точности модели (например, переход от одной нелинейной индуктивности к подробной магнитной схеме или МКЭ) экспоненциально растут сложность и вычислительная трудоемкость. Простые модели с коэффициентом насыщения не способны отразить детали распределения поля, зато удобны в инженерных расчетах [36].

Проведен анализ существующих теоретических и численных моделей явнополюсных синхронных машин, предназначенных для исследования электромагнитных переходных процессов с учётом насыщения магнитопровода. Рассмотрены различные подходы: метод гармонической линеаризации, принцип наложения магнитных полей, классическое d - q -преобразование (двухреактивная модель Парка) трёхфазной обмотки статора, численные методы (например, метод конечных элементов), а также модели на основе эквивалентных магнитных цепей и др.

Выявлен ряд существенных недостатков у существующих моделей. Многие из них базируются на упрощённых или идеализированных

предположениях и могут частично игнорировать эффект насыщения; самые простые схемы ограничены в учёте распределения поля. С другой стороны, современные точные численные методы (МКЭ и др.) требуют больших вычислительных ресурсов и сталкиваются с трудностями обеспечения точности вблизи зубцов статора. Например, классическая d–q-модель учитывает насыщение лишь через изменение параметров, что снижает её точность при сильном насыщении.

Научные школы стран СНГ (МЭИ, ТашГТУ и др.) предложили эффективные практико-ориентированные подходы к моделированию синхронных машин с насыщением. В частности, метод зубцовых контуров (МЗК), разработанный в МЭИ, представляет магнитное поле машины через эквивалентную схему с дискретными нелинейными магнитными проводимостями, что позволяет наглядно учесть локальные нелинейности в зубцовых зонах. На кафедре электрических машин и приводов ТашГТУ разработаны инженерные методики расчёта магнитного поля в воздушном зазоре с учётом насыщения, повышающие точность моделирования в прикладных задачах. Перечисленные подходы более полно учитывают реальные свойства машины и удобны для инженерной практики.

Тем не менее выявлено, что не существует метода, одновременно обеспечивающего и высокую точность, и удобство применения при учёте насыщения в переходных режимах. Ни один из проанализированных подходов пока не даёт полного сочетания точности и практичности для динамических режимов синхронных машин с насыщением. Таким образом, задача точного и упрощённого учёта нелинейного насыщения магнитопровода остаётся актуальной и до конца не решённой.

Показана необходимость развития новых аналитико-численных моделей, учитывающих локальное насыщение и асимметрию конструкции. Требуются модели, способные отразить локальные эффекты насыщения (например, в зубцовых зонах магнитопровода), а также влияние конструктивной асимметрии или характера нагрузки на поля рассеяния. При этом такие модели должны сочетать приемлемую вычислительную сложность с высокой точностью, что важно для достоверного прогнозирования переходных процессов.

Сформулированы актуальные направления дальнейших исследований по совершенствованию моделей синхронных машин. К таким направлениям относятся: уточнение дифференциальной (зубцовой) составляющей реактивности рассеяния, разработка моделей с переменными параметрами, а также создание упрощённых инженерных методик расчёта, пригодных для практического применения. Реализация этих задач позволит устранить выявленные недостатки и обеспечить более точный учёт насыщения в переходных процессах явнополюсных синхронных машин.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков Н.А. Электрические машины. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. Учеб. для вузов. Изд. 3-е. испр. М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
3. Глухивский Л.И., Фильц Р.В. Расчет характеристик насыщенных явнополюсных синхронных машин на ЦВМ // Тезисы докладов II Республиканской конф. по подведению итогов научно-исследовательских работ в области электротехники. Запорожье, 1969.

4. Kar N.C., El-Serafi A.M. Effect of the main flux saturation on the transient short-circuit performance of synchronous machines // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005.
5. Прокудин А.В. Тиристорное устройство гашения магнитного поля синхронного генератора: Дис.... канд. техн. наук. Челябинск, 2022. – 193 с.
6. Давыдов Н.В. Электрические машины и электромагнитные устройства с многослойными магнитопроводами и улучшенными массогабаритными показателями: Автореф. дис.... канд. техн. наук. Казань, 2018.
7. Одилов Г. Исследование электромагнитного поля и параметров рассеяния обмоток машин переменного тока: Автореф. дис.... докт. техн. наук. М. МЭИ, 2004. С.40
8. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
9. Честюнина Т. В. Исследование многополюсных синхронных магнитоэлектрических генераторов с дробными зубцовыми обмотками: Автореф. дис.... канд. техн. наук. Новосибирск, 2012. – 177 с.
10. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
11. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Tom 48, 1929. P. 716 – 727.
12. Соколов В.В. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели для привода погружных плунжерных насосов: Автореф. дис.... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2006. С. 20.
13. Рихтер Р. Электрические машины. М.; Л.: ОНТИ “Госэнергоиздат”, 1962. Т. I-V.
14. Важнов А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1968. – 768 с.
15. Вольдек А.И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. 1966. №7. С. 46 – 52.
16. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Учебник для вузов. М.: Энергия, 2006. – 928 с.
17. Одилов Г. Анализ пространственных гармонических полей обмотки якоря машин переменного тока //Узб. ж. «Проблемы информатики и энергетики». 1993. №3.
18. Abdel-Halim M.A. & Manning C.D. Direct phase modelling of synchronous generators // IEE Proceeding. Vol. 137. 1990. №4. July. P. 239 – 247.
19. Sudhoff S. D., & Liang X. Elimination of double-valued magnetic characteristic in saturated synchronous machine models // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2001. 16(1). P. 51–57.
20. Varela J., Spong D.A., Garcia L., Ohdachi S., Watanabe K.Y., Seki R., Ghai Y. Theoretical analysis of the saturation phase of the 1/1 energetic-ion-driven resistive interchange mode. Published 22. Vienna, October 2021. P. 61.
21. Karol Swierczynski, Maciej Antal, Marcin Habrych, Bartosz Brusilowicz. A new approach to design line start permanent magnet synchronous motors // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 13. 2023. No. 3, June. P. 2508 – 2516.
22. Vasiliya Sarac, Goce Stefanov. Calculation of Electromagnetic Fields in Electrical Machines using Finite Elements Method // International Journal of Engineering and Industries. Vol. 2. 2011. Number 1. Macedonia, March. P. 21 – 29.

23. Kim J., & Lee S. Neural network-based magnetic saturation model for synchronous motor control // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. №54(4). P. 3240–3248.
24. Zhang Y., Li X., & Wang P. Online identification of saturated synchronous machine parameters using stochastic optimization // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021. P. 126.
25. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев.: Гос. изд. техн. литер., 1960. – 910 с.
26. Ковешникова Л.В. Исследование статических режимов синхронных машин двухосного возбуждения с учетом насыщения стали: Автореф. дис.... канд. техн. наук. Киев, 1982. – 24 с.
27. Лернер Л.Г., Рубисов Г.В. Расчет магнитного поля в зазоре синхронной явнополюсной машины в установившемся режиме на ЦВМ // Сб. “Электрические машины”. М.: Наука, 1965. С. 62 – 67.
28. Кузнецов В.А. Моделирование синхронной машины в установившихся режимах: Автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 1969.
29. Одилов Г., Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н. Расчет электромагнитного поля многофазных обмоток статора в воздушном зазоре турбогенератора ТВВ-200-2 // Актуальные вопросы в области гуманитарных, социально-экономических и технических наук: Межвуз. сб. науч. тр. ТашГТУ. Ташкент, 2016.
30. Мустафакулова Г.Н. Расчет дифференциального рассеяния магнитного поля обмотки статора турбогенератора // Журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». 2005. №4.
31. Холбутаева А.К., Пирматов Н.Б. Method of calculating the leakage flux taking into account nonlinear saturation of the magnetic circuit // European Applied Science. 2015. №12. P.30.
32. Najafi Sh., Kar N. Impact of Saturation on Transient Behavior of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2006.
33. Холбутаева А.К. Дифференциальное рассеяние обмотки якоря явнополюсной синхронной машины: Дис.... магистра техн. наук. Ташкент, 2005. С.96.
34. Slobodan N. Vukosavic. Electrical Machines: Dept. of Electrical Engineering University of Belgrade Belgrade, Serbia. Springer Science+Business Media. New York, 2013.
35. Zhumagulov K., Sarsikeyeva Y., Kapanova D. Calculation of the magnetic field of the stator windings of the synchronous machine: MATEC Web of Conferences. 2018. №155. P. 1 – 6.
36. Пирматов Н.Б., Халбутаева А.К. Математическая модель для учёта влияния насыщения магнитопровода на пусковые характеристики синхронного двигателя // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Вып. 70. Иркутск, 2019. С. 257 – 262.

QUYOSH KONSENTRATORLARINING SAMARADORLIGI

Mazkur tadqiqotda quyosh konsentratrlarining samaradorligining usullari ko'rib chiqilib, quyosh intensivligiga bog'liq holda qanday o'zgarishi o'rganildi. Tadqiqot davomida quyosh intensivligining vaqt bo'yicha o'zgarishi kuzatilib, bu o'zgarishlarning konsentratrlarining samaradorligiga ta'siri baholandi. Eksperimental tadqiqotlar va hisoblash usullari yordamida konsentratrlarining samaradorligi uchun optimal sharoitlar aniqlandi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, quyosh intensivligi eng yuqori bo'lgan paytlarda, ayniqsa kunning o'rtalarida, parabolik konsentratrlarining ishlash ko'rsatkichi ham yuqori bo'ladi. Bundan tashqari, tadqiqotda quyosh energiyasidan foydalanish imkoniyatlarini kengaytirish bo'yicha ilmiy-amaliy takliflar ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: quyosh konsentratrlari, issiqlik uzatish, energiya samaradorligi, optik reflektivlik, eksperimental tadqiqotlar, quyosh nurlanishi, Namangan iqlimi.

Н.Ю. Шарibaев, Х.М. Махмудова, Б.М. Махмудов

Эффективность солнечных концентраторов

Статья посвящена изучению влияния интенсивности солнечного излучения на эффективность параболических солнечных концентраторов в условиях Наманганской области. В ходе исследования проанализированы изменения солнечной интенсивности в течение дня и их влияние на производительность концентраторов. Посредством экспериментальных измерений и аналитических расчетов были определены оптимальные условия работы солнечных концентраторов. Полученными данными установлено, что эффективность концентраторов достигает максимума в полуденное время, когда солнечная интенсивность наиболее высока. Кроме того, в исследовании разработаны практические рекомендации по увеличению использования солнечной энергии в данном регионе.

Ключевые слова: солнечные концентраторы, передача тепла, энергетическая эффективность, оптическая отражательная способность, экспериментальные исследования, солнечное излучение, климат Намангана

N.Y. Sharibayev, X.M. Mahmudova, B.M. Makhmudov

Efficiency of solar concentrators

This research investigates the impact of solar intensity on the efficiency of parabolic solar concentrators under the climatic conditions of Namangan region. The study analyzes how variations in solar radiation throughout the day affect concentrator performance. Using experimental measurements and analytical calculations, optimal operational conditions for solar concentrators were identified. The results indicate that efficiency peaks during noon, when solar intensity is at its highest. Additionally, the study proposes practical solutions to enhance the utilization of solar energy in this region.

Keywords: solar concentrators, heat transfer, energy efficiency, optical reflectivity, experimental research, solar radiation, Namangan climate.

Quyosh energiyasi bugungi kunda energiya manbalarining ekologik va iqtisodiy samaradorligi bo'yicha asosiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Parabolik quyosh konsentratrlari quyosh energiyasini yuqori haroratga aylantirish uchun eng samarali texnologiyalardan biridir [1]. Namangan shahrida quyosh energiyasidan foydalanish uchun mavjud sharoitlarni tahlil qilish va samaradorlikni aniqlash bo'yicha tadqiqot o'tkazildi. Namangan viloyati O'zbekistonning sharqiy hududida joylashgan bo'lib, quyosh energiyasidan foydalanish uchun qulay tabiiy sharoitlarga ega. Namangan viloyatida yillik quyosh nurlanishi 1500 – 1600 kVt·soat/m² ni tashkil qiladi [2]. Quyosh nurlanishining eng yuqori darajasi yoz oylarida kuzatiladi, qishda esa kamayadi, ammo qishloq xo'jaligi yoki sanoat isitish tizimlari uchun yetarli darajada hisoblanadi [3]. Yiliga 280 dan ortiq quyoshli kunlar qayd etiladi, bu yil davomida quyosh energiyasidan foydalanishni samarali ekanligini tasdiqlaydi [4].

Quyosh energiyasidan foydalanish ekologik tozaligi, energiya xavfsizligini oshirishi va uzoq muddatli iqtisodiy tejamkorligi bilan ajralib turadi. Quyosh energiyasidan foydalanish imkoniyatining yetarli ekanligini “*Solar resource map* © 2021 *Solargis*” (<https://solargis.com>) ma’lumotlariga ko’ra olingan tasvirdan bilish mumkin.

Dastlabki yuqori investitsiyalarga qaramasdan, quyosh energiyasi tizimlari uzoq muddatda iqtisodiy foyda keltiradi. Biroq bulutli va yomg’irli kunlarda quyosh energiyasidan samarali foydalanish cheklangan. Ushbu holatlarda samarali quyosh konsentratorlaridan foydalanish zarur [5]. Quyosh konsentratorlarida energiyani bir nuqtaga to’plash orqali yuqori haroratda issiqlik energiyasini hosil qilish imkoniyati mavjud. Samarali parabolik quyosh konsentratorlari quyosh intevligi pastroq bo’lgan hollarda ham o’zini oqlaydi [6]. Quyosh intensivligini konsentratorning samaradorligiga bog’liqligi ushbu tadqiqot ishida ko’rib chiqilgan. Unga ko’ra yuqori sifatli quyosh konsentratorlari va texnologiyalarini import qilish zaruratiga ehtiyoj mavjud. Yoki quyosh konsentratorlarini mahallay ishlab chiqarish (yasash) ishlarini amalga oshirishimiz kerak. Bundan tashqari bu sohadagi ilmiy – tadqiqot ishlarini kuchaytirish lozim. Olib borilgan ilmiy – tadqiqot ishlarini ko’radigan bo’lsak,. I.A. Yuldoshev, M.N. Tursunov, S.Q. Shog’o’chqorov, T.R. Jamolovlarning “Quyosh energetikasi” nomli o’quv qo’llanmasida quyosh energetik qurilmalaridan foydalanish usullari va ularning energetik xarakteristikallari haqida hamda quyosh konsentratorlari bo’yicha yetarli ma’lumotlar berilgan (1-rasm) [7].



1-rasm. Farg’ona vodiysidagi geografik quyosh intensivligi.

Parabolik quyosh konsentratorlari sohasida turli olimlar tomonidan qator tadqiqotlar olib borilgan. Masalan, Hani Beltagy “A secondary reflector geometry optimization of a Fresnel type solar concentrator” maqolasi Fresnel turdagi quyosh konsentratorining ikkilamchi reflektori geometriyasini optimallashtirishga bag’ishlangan. Yangi shakl - Double Parabolic Concentrator (DPC) bilan prototipning samaradorligi 10 – 13% ga oshganini va qabul qilgichning optik samaradorligi 100% ga yetganini aniqlagan. Kalidasan B., Muhammed A. Hassan va boshqalar muallifligidagi “Linear cavity solar receivers: A review” nomli maqola chiziqli bo’shliq qabul qilgichlarining samaradorligini oshirish bo’yicha keng ko’lamli tahlillarni taqdim etadi.

Termal samaradorlikni 77% gacha oshiruvchi va ishlash haroratini 627 °C dan yuqori ko'taruvchi konstruktsiya taqdim etilgan. Bunday maqolalardan yana biri Fares Touarefning "Design and implementation of parabolic through solar concentrator distiller" nomli tadqiqot ishida quyosh distillyatori konstruktsiyasini tahlil qilib, samaradorligini oshirish uchun avtomatik quyosh izlash (solar tracer) tizimini joriy etdi. Suvni 10 soatda 160 litr distillyatsiya qilishga muvaffaq bo'ldi va umumiy termal samaradorlik 70.3% ga yetkazildi. Jinwoo Jung o'zining "Optical Module for Simultaneous Crop Cultivation and Solar Energy Generation: Design, Analysis, and Experimental Validation" nomli maqolasida o'simliklarni yetishtirish va quyosh energiyasini ishlab chiqarishni birlashtiruvchi optik modulni yaratdi. Ushbu modul yordamida quyosh energiyasi 54% ga samarali o'zgartirildi va agrar energiya tizimlarining samaradorligini oshirish uchun innovatsion yechimlar sifatida tan olindi. Bunday tadqiqotlardan yana biri "Flux profile at focal area of concentrating solar dishes" nomli M. Ebrahim Foulaadvand, Amir Aghamohammadi, Parvin Karimi, Hadi Borzoueilarning maqolasida konsentratsiyalovchi quyosh konsentratorlaridagi issiqlik oqimi taqsimotini o'rgandi. Bunday tadqiqot ishlarini juda ko'plab keltirish mumkin. Ushbu olib borilayotgan tadqiqot ishlari quyosh konsentratorlarining rivojlanish istiqbollari sifatida xizmat qiladi. Ushbu maqolada ham quyosh konsentratorining samaradorligi o'rganilib, uning bir nechta usullari quyida keltirib o'tilgan [8].

Ushbu tadqiqotda parabolik quyosh konsentratorlarining samaradorligini quyosh intensivligiga bog'liqligini aniqlash uchun eksperimental va hisoblash usullari ko'rib chiqildi. Parabolik quyosh konsentratorlarining samaradorligini aniqlash uchun bir nechta usul (metod) mavjud:

Optik samaradorlikni aniqlash. Optik samaradorlik quyosh konsentratorining quyosh energiyasini yutish va konsentratsiya qilish qobiliyatini o'lchaydi. Bu quyosh nurlarining yo'qotilishini va reflektivlikni hisobga oladi. Bunday asosiy ko'rsatkichlar quyidagilar:

–Reflektivlik (**R**): Konsentrator yuzasining quyosh nurini qaytarish qobiliyati [9].

–Absorptivlik (**A**): Materialning quyosh nurini yutish qobiliyati [10].

–Geometrik samaradorlik (**G**): Quyosh nurlarini fokuslashga yo'naltirish aniqligi.

Ushbu ko'rsatkichlar foiz (%) larda keltiriladi. Hisob ishlarida esa foizga proporsional ravishda 0 dan 1 gacha bo'lgan qiymatlarda koeffitsiyent ko'rinishida ifodalanadi. Optik samaradorlikni aniqlash formulasi:

$$\eta_{optik} = R \times A \times G. \quad (1)$$

Issiqlik samaradorligini aniqlash.

Issiqlik samaradorligi quyosh energiyasining qanchalik samarali ravishda issiqlikka aylantirilganligini ko'rsatadi. Bu issiqlik yo'qotishlarini va energiyaning foydali ishlatilishini ko'rsatadi. Issiqlik samaradorlik formulasi quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_{issiqlik} = \frac{Q_{foйда}}{Q_{kelgan}} = \frac{m \cdot c \cdot (T_1 - T_2)}{I \cdot A \cdot t} \quad (2)$$

bu yerda, $Q_{foйда}$ – foydali issiqlik miqdori; Q_{kelgan} – quyoshdan olingan umumiy issiqlik miqdori; m – vaqt birligi ichida quyosh konsentratoridan o'tgan issiqlik tashuvchining massasi; c – issiqlik tashuvchining issiqlik sig'imi; $T_1 - T_2$ – issiqlik tashuvchining quyosh konsentratoriga kirishdagi va chiqishdagi haroratlar farqi; I – quyosh intensivligi; A – quyosh konsentratorining yuzasi; t – quyosh konsentratorining ishlagan vaqti.

Umumiy samaradorlikni aniqlash.

Umumiy samaradorlik quyosh energiyasini issiqlik energiyasiga aylantirishdagi umumiy samaradorlikni ko'rsatadi. U quyosh intensivligi, konsentrator materiallari va

issiqlik yo‘qotishlari hisobga olingan holda aniqlanadi. Quyosh konsentratorlarining umumiy samaradorlik formulasi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\eta_{umumiy} = \eta_{optik} \times \eta_{issiqlik} \quad (3)$$

Intensivlik orqali samaradorlikni aniqlash. Quyosh intensivligi va samaradorlik o‘rtasidagi bog‘liqlik quyidagi formula asosida aniqlanadi:

$$\eta = \eta_{min} + k * \left(\frac{I}{I_{max}} \right), \quad (4)$$

bu yerda, η_{min} – minimal samaradorlik; k – samaradorlik o‘shish koeffitsiyenti; I – kuzatilgan quyosh intensivligi (W/m^2). I_{max} : – maksimal intensivlik (W/m^2) [11].

Eksperimental usullar. Laboratoriya va maydon sharoitida tajribalar yordamida samaradorlikni aniqlash eng keng qo‘llaniladigan usul hisoblanadi. Tajribada quyidagilar o‘lchanadi:

- Quyosh intensivligi.
- Ishchi harorati.
- Issiqlik yo‘qotishlar.
- Ishlatilgan materiallarning optik va termal xususiyatlari [12].

Energiya balansi usuli. Bu usulda quyosh intensivligi (I) va konsentrator orqali uni issiqlik energiyasiga aylantirilishi o‘rtasidagi balans hisoblanadi:

$$I_{umumiy} = I_{foйда} + I_{yo‘qotish}, \quad (5)$$

bu yerda, samaradorlik quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$\frac{I_{umumiy} - I_{yo‘qotish}}{I_{umumiy}} \quad (6)$$

Real sharoitda monitoring. Parabolik quyosh konsentratorining samaradorligi uzoq muddatli monitoring va real sharoitlarda o‘lchanadi. Quyosh intensivligi, harorat, shamol tezligi va boshqa meteorologik omillar ta’siri tahlil qilinadi. Ushbu usulda aniqlangan samaradorlik aniqroq natijaga ega bo‘ladi. Ammo, bu o‘z navbatida ko‘p vaqt talab etadi [13].

Quyosh intensivligi ma’lumotlari Namangan shahrining geografik joylashuvi va mavsumiy o‘zgarishlariga asoslangan holda olindi. Eksperimentlar quyidagi sharoitlarda bajarildi:

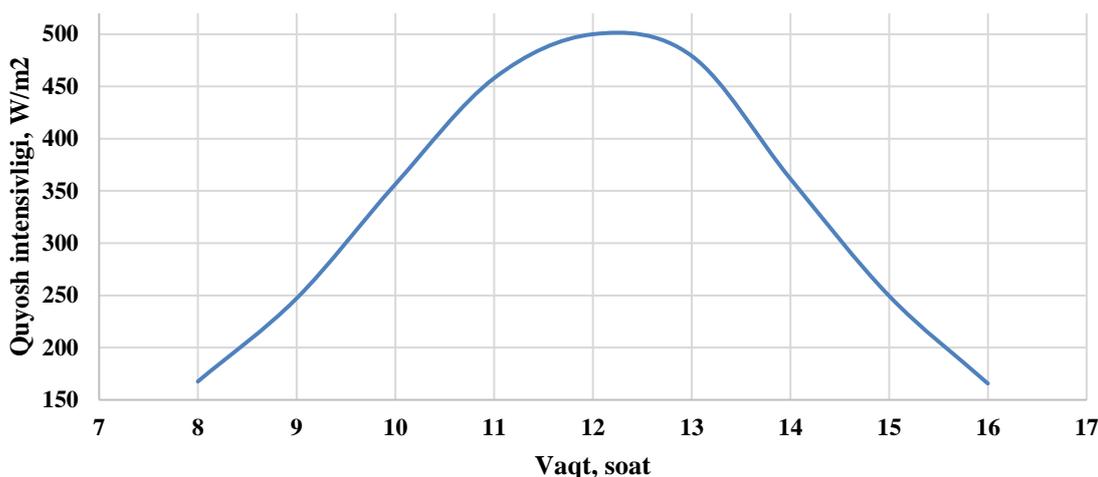
- Geografik koordinatalar: Namangan viloyati ($40.99^{\circ}N$, $71.67^{\circ}E$).
- Tadqiqot muddati: Noyabr oyining 10 – kuni tushdan oldin va keyin o‘lchovlar o‘tkazildi.
- Ob-havo sharoiti: O‘rtacha harorat $10 - 15^{\circ}C$, havo ochiq (qisman bulutli).
- O‘lchov natijalariga ko‘ra olingan ma’lumotlar (1-jadval).

1-jadval

Vaqt birligida quyosh intensivligining o‘zgarishi

t/r	Soatlar	Quyosh intensivligi (W/m^2)	Havo harorati ($^{\circ}C$)
1	2	3	4
1	8:00	165.6053	10
2	9:00	246.1818	11
3	10:00	355.7422	12
4	11:00	456.9997	14
5	12:00	500.0007	15
6	13:00	477.5857	15
7	14:00	360.3122	12
8	15:00	249.0081	11
9	16:00	165.1143	10

Ushbu ma'lumotlarni grafik ko'rinishi quyida keltirib o'tilgan [14 – 15].



2-rasm. 10-noyabr kungi quyosh intensivligi (Namangan sharoitida).

Ushbu olingan natijalar asosida quyosh konsentratorlarining samaradorligini intensivlikga bog'liqligini o'rganish maqsadida ushbu maqolaning usullar bo'limida keltirilgan 4-metod qo'llanildi (2-rasm) [16]. Ya'ni quyosh intensivligi va samaradorlik o'rtasidagi bog'liqlik quyidagi formula asosida tadqiq qilingan va intensivlikni ortishi bilan samaradorlikning ortish grafigi va boshqalar olingan. Minimal samaradorligi 60% bo'lgan quyosh konsentratorida samaradorlikning o'zgarishi o'rganilgan [17]:

$$\eta = \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right), \quad (7)$$

bu yerda, $\eta_{\min}=0.60$: minimal samaradorlik; $k=0.08$: samaradorlik o'sish koeffitsiyenti (samaradorlik o'sish koeffitsiyenti $k=0.05 - 0.15$ oraliqda bo'lib, konsentratorning optik xususiyatlariga bog'liq koeffitsiyent). I : kuzatilgan quyosh intensivligi (W/m^2); $I_{\max}=500 W/m^2$: maksimal intensivlik [18].

Misol tariqasida, 1-jadvalda olingan o'lchov natijalariga ko'ra quyosh konsentratorining samaradorligini aniqlaylik:

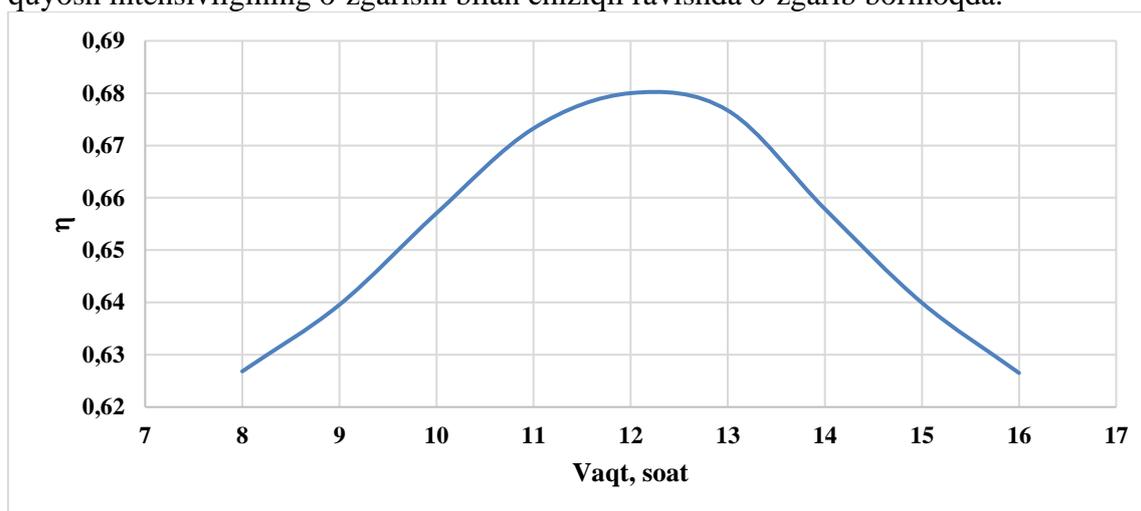
$$\begin{aligned} 1) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{165.6053}{500}\right) = 0.626496848 \\ 2) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{246.1818}{500}\right) = 0.639389088 \\ 3) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{355.7422}{500}\right) = 0.656918752 \\ 4) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{456.9997}{500}\right) = 0.673119952 \\ 5) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{500.0007}{500}\right) = 0.680000112 \\ 6) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{477.5857}{500}\right) = 0.676413712 \\ 7) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{360.3122}{500}\right) = 0.657649952 \\ 8) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{249.0081}{500}\right) = 0.639841296 \\ 9) \eta &= \eta_{\min} + k * \left(\frac{I}{I_{\max}}\right) = 0.6 + 0.08 * \left(\frac{165.1143}{500}\right) = 0.626418288 \end{aligned} \quad (8)$$

Olingan quyosh konsentratorining samaradorligi natijalari quyidagi 2-jadvalga kiritilgan [19].

Quyosh konsentratorining samaradorligini vaqt bo'yicha o'zgarishi

t/r	Soatlar	η_{\min}	k	I (W/m ²)	I _{max} (W/m ²)	Quyosh konsentratori samaradorligi η
1	8:00	0.6	0.08	165.6053	500	0.626496848
2	9:00	0.6	0.08	246.1818	500	0.639389088
3	10:00	0.6	0.08	355.7422	500	0.656918752
4	11:00	0.6	0.08	456.9997	500	0.673119952
5	12:00	0.6	0.08	500.0007	500	0.680000112
6	13:00	0.6	0.08	477.5857	500	0.676413712
7	14:00	0.6	0.08	360.3122	500	0.657649952
8	15:00	0.6	0.08	249.0081	500	0.639841296
9	16:00	0.6	0.08	165.1143	500	0.626418288

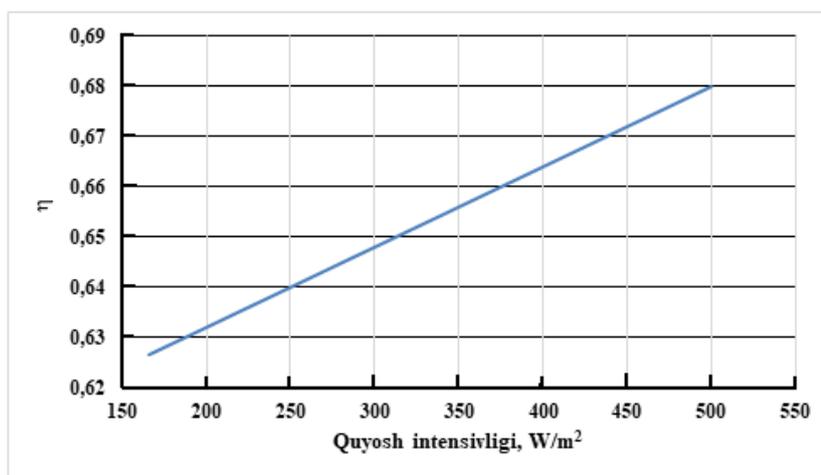
Muhokama. Yuqorida olingan natijalar asosida parabolik quyosh konsentratorlari samaradorligining quyosh intensivligiga bog'liqligini muhokama qiladigan bo'lsak, hisob natijalaridan ko'rinib turibdiki, konsentrator samaradorligi quyosh intensivligining o'zgarishi bilan chiziqli ravishda o'zgarib bormoqda.



3-rasm. Quyosh konsentratorining samaradorligi (vaqt bo'yicha o'zgarishi).

2-rasm va 3-rasmda keltirilgan grafiklardan ko'rinib turibdiki, vaqt bo'yicha quyosh konsentratori samaradorligining o'zgarishi va quyosh intensivligining o'zgarishi deyarli bir xil. Demak, quyosh intensivligini konsentrator samaradorligiga to'g'ridan to'g'ri bog'liq ekanligini ko'rish mumkin. Konsentrator samaradorligini quyosh intensivligi bilan bog'langan grafigini quyidagi rasmda ham ko'rish mumkin.

4-rasmda ham quyosh konsentratorining samaradorligini quyosh intensivligiga chiziqli bog'liq ekanligi ko'rsatilgan. Quyosh intensivligi yarim sinusoidal o'zgarishlarni ko'rsatadi, bunda noyabr oyida kunning o'rtasida eng yuqori qiymatlar kuzatildi. O'rtacha intensivlik 331.71 W/m² ni tashkil etdi. Parabolik konsentrator samaradorligi quyosh intensivligiga to'g'ridan to'g'ri bog'liq bo'lib, yuqori intensivlik davrlarida samaradorlik 68% gacha yetdi.



4-rasm. Quyosh konsentratorining samaradorligi va quyosh intensivligining bog‘liqligi.

Ushbu olib borilgan amaliy va nazariy o‘rganilishlar natijasida bajarilgan ushbu maqolaga xulosa sifatida shuni aytish mumkinki, Namangan sharoitida noyabr oyida parabolik quyosh konsentratorlarining samaradorligining quyosh intensivligiga bog‘liqligi tahlil qilindi. Olingan natijalarga ko‘ra quyidagilarni tavsiya (xulosa) sifatida keltirish mumkin:

- Quyosh intensivligi va samaradorlik orasida to‘g‘ridan to‘g‘ri bog‘liqlik mavjud.

- Eksperimental natijalar quyosh intensivligi oshgan sari quyosh konsentratori samaradorligi ham oshishini ko‘rsatdi.

- Kunning o‘rtalarida (11:00 – 14:00) maksimal samaradorlikka erishildi. Bu vaqtda quyosh intensivligi yuqori bo‘lgani sababli, parabolik quyosh konsentratori 68% gacha samaradorlikni namoyon etdi.

- Minimal samaradorlik 62% atrofida bo‘ldi, bu esa quyosh intensivligi past bo‘lganda ham kollektor nisbatan samarali ishlashini ko‘rsatdi.

Bulardan tashqari quyosh konsentratori samaradorligini oshirish uchun quyidagi tavsiyalarni keltirishimiz mumkin:

- Yuqori reflektivlikka ega materiallardan foydalanish (masalan, alyuminiy va kumush rangli qoplamalar).

- Absorber yuzasining issiqlik yutish qobiliyatini oshirish.

- Fokuslash aniqligini yaxshilash.

- Issiqlik izolyatsiyasini kuchaytirish.

Namangan sharoitida quyosh nurlanishining yillik potentsiali yuqori, bu esa kelajakda quyosh energiyasidan sanoat va uy xo‘jaliklarida foydalanish imkoniyatini kengaytirish zaruriyatini ko‘rsatadi. Ushbu tadqiqot ishida quyosh energiyasidan foydalanish bo‘yicha muhim natijalar ishlab chiqildi va parabolik quyosh konsentratorlarining samaradorligini quyosh intensivligiga bog‘liqligi o‘rganildi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley Sons, 2013.
2. Kalogirou S.A. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. №30(3). P. 231 – 295.
3. Yuldoshev I.A., Tursunov M.N., Shog‘o‘chqorov S.Q., Jamolov T.R. *Quyosh energetikasi. O‘quv qo‘llanma*, 2022.

4. Hani Beltagy. A secondary reflector geometry optimization of a Fresnel type solar concentrator. *Renewable Energy Journal*, 2021.
5. Kalidasan B., Muhammed A. Hassan. Linear cavity solar receivers: A review. *Energy Science Engineering*, 2023.
6. Fares Touaref. Design and implementation of parabolic through solar concentrator distiller. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022.
7. Jinwoo Jung. Optical Module for Simultaneous Crop Cultivation and Solar Energy Generation: Design, Analysis, and Experimental Validation. *Applied Energy*. 2021.
8. Ebrahim Foulaadvand M., Amir Aghamohammadi, Parvin Karimi, Hadi Borzouei. Flux profile at focal area of concentrating solar dishes. *Solar Energy Materials Solar Cells*, 2023.
9. Zondag H. A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004. №8(3). P.231 – 245.
10. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Standard 93-2003: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, 2003.
11. Paitoonsurikarn S., Lovegrove K. Development of a Parabolic Through Solar Concentrator System in Australia. *Solar Energy*. 2006. №80(10). P.1284 – 1290.
12. Rabl A. Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*. 1976. №18(2). P.93 – 111.
13. Mills D.R., Morrison G.L. Compact linear Fresnel reflectors for solar thermal power. *Solar Energy*. 2000. №68(3). P.263 – 283.
14. Montes M.J., Abánades A., Martínez-Val J.M., Valdés M. Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant. *Solar Energy*. 2010. №84(4). P. 679 – 689.
15. Reddy K.S., Sendhil Kumar, N. Combined heat loss analysis of parabolic through receiver by analytical and CFD simulations // *Solar Energy*. 2009. №83(1). P.49 – 62.
16. Morin G., Dersch J., Platzer W., Eck M., Häberle A. Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants. *Solar Energy*. 2012. №86(1). P. 1 – 12.
17. Lovegrove K., Luzzi A. Solar thermal power systems. *Advances // Solar Energy*, 2009. №17. P.343 – 407.
18. Mills D. *Advances in solar thermal electricity technology // Solar Energy*, 2004. №76(1-3). P.19 – 31.
19. Tyagi V.V., Kaushik S.C., Tyagi S.K. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. №16(3). P.1383 – 1398.

УДК 371.38

3.3. ШАМСИЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР БЕЗОПАСНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ РИСКОВ

Показано, что безопасность полётов в условиях растущей интенсивности воздушного движения требует от авиадиспетчеров принятия решений в условиях неопределённости и высокой ответственности. В данной статье рассмотрено построение концепции модели управления безопасностью на основе байесовской сети рисков, позволяющей учитывать причинно-следственные связи между ключевыми факторами риска и принимать решения на основе вероятностной оценки последствий. Отмечено, что метод предусматривает форму интерактивной системы поддержки принятия решений, интегрируемой в рабочее место диспетчера. Установлено, что ожидаемые результаты моделирования на основе реальных сценариев выражаются в повышении устойчивости управления и снижении вероятности инцидентов. Статья содержит оригинальный алгоритм выбора безопасного решения с минимизацией условного риска на основе текущих наблюдений и априорных знаний.

Ключевые слова: управление воздушным движением, безопасность полётов, байесовская сеть, принятие решений, оценка рисков, вероятностное моделирование.

Z.Z. Shamsiev

Bayesian xavf tarmog‘i asosida havo harakatini boshqarishda xavfsiz qarorlarni modellashtirish va tanlash

Havo harakatining intensivligi ortib borayotgan sharoitda parvozlarning xavfsizligi havo harakati dispetcherlaridan noaniqlik va yuqori mas‘uliyat sharoitida qaror qabul qilishni talab qiladi. Ushbu maqolada asosiy xavf omillari o‘rtasidagi sabab-ta‘sir munosabatlarini hisobga olish va oqibatlarni ehtimoliy baholash asosida qarorlar qabul qilish imkonini beruvchi Bayes xavf tarmog‘iga asoslangan xavfsizlikni boshqarish modeli konsepsiyasini qurish muhokama qilinadi. Usul nazoratchining ish joyiga integratsiyalangan interaktiv qarorlarni qo‘llab-quvvatlash tizimining shaklini nazarda tutadi. Haqiqiy ssenariylarga asoslangan modellashtirishning kutilayotgan natijalari boshqaruv barqarorligini oshirish va hodisalar ehtimolini kamaytirishda ifodalanadi. Maqolada joriy kuzatuvlar va aprior bilimlar asosida shartli xavfni minimallashtirish bilan xavfsiz yechimni tanlash uchun original algoritmi mavjud.

Kalit so‘zlar: havo harakatini boshqarish, parvozlarning xavfsizligi, Bayes tarmog‘i, qaror qabul qilish, xavfni baholash, ehtimollik modellashtirish.

Z.Z. Shamsiev

Modelling and selecting safe decisions in air traffic control based on a Bayesian risk network

Flight safety in conditions of increasing air traffic intensity requires air traffic controllers to make decisions under conditions of uncertainty and high responsibility. This article discusses the construction of a concept of a safety management model based on a Bayesian risk network, which allows taking into account the cause-and-effect relationships between key risk factors and making decisions

based on a probabilistic assessment of consequences. The method provides for the form of an interactive decision support system integrated into the controller's workplace. The expected results of modeling based on real scenarios are expressed in increasing the stability of control and reducing the likelihood of incidents. The article contains an original algorithm for choosing a safe solution with minimization of conditional risk based on current observations and a priori knowledge.

Keywords: air traffic control, flight safety, Bayesian network, decision making, risk assessment, probabilistic modeling.

Введение. Современная система управления воздушным движением (УВД) функционирует в условиях постоянно возрастающей сложности и плотности воздушного пространства. Рост количества рейсов, развитие беспилотной авиации, а также необходимость координации с системами обеспечения безопасности и мониторинга создают дополнительные риски, требующие оперативного и обоснованного принятия решений. В таких условиях особенно важным становится внедрение инструментов интеллектуальной поддержки диспетчеров, способных учитывать неопределённости и скрытые зависимости между событиями в динамично изменяющейся среде.

Одним из наиболее перспективных подходов к формализации рисков и оптимизации решений в условиях неопределённости является байесовская сеть – вероятностная графовая модель, позволяющая количественно учитывать влияние множества факторов на вероятность возникновения критических событий. В контексте УВД такие модели могут быть использованы для оценки риска столкновений, определения степени надёжности диспетчерских решений, анализа человеческого фактора и прогнозирования последствий тех или иных сценариев развития событий. При этом важным преимуществом байесовской модели является возможность адаптации к новым данным, что критически важно для среды с высокой степенью изменчивости, каковым и является воздушное пространство.

Настоящее исследование предусматривает разработку общей концепции моделирования и выбора безопасных решений при УВД на основе байесовской сети риска, обеспечивающей интеграцию вероятностного анализа, экспертных оценок и машинного обучения. Предложенный подход направлен на повышение надёжности УВД-систем за счёт интеллектуальной поддержки операторов и адаптации к изменяющимся условиям полётной обстановки.

В рамках настоящего исследования ставятся следующие задачи:

- построить концептуальную организационно-функциональную структуру байесовской сети риска, отражающую ключевые параметры процесса УВД;
- формализовать причинно-следственные зависимости между параметрами риска;
- построить механизм вычисления апостериорных вероятностей на основе текущей информации;
- провести машинный эксперимент для валидации предложенной модели на примере типовых сценариев диспетчерского управления.

Развитие методов обеспечения безопасности в управлении воздушным движением требует интеграции как традиционных регламентирующих подходов, так и современных инструментов искусственного интеллекта. Одним из таких перспективных направлений является использование причинно-следственного анализа и байесовских сетей для моделирования и предсказания рисков. Современная научная литература свидетельствует о значительном прогрессе в этой области, включая как теоретические разработки, так и практические приложения.

Базовые принципы и требования к системам УВД определяются на международном уровне. В документе ICAO Manual on Air Traffic Management System Requirements (ICAO, 2020) [1] подчёркивается необходимость адаптации к сложным, высоконагруженным воздушным пространствам и переходу к траекторно-ориентированному управлению. Особое внимание уделяется гибкости, надёжности и способности к прогнозированию рисков в системах УВД.

В дополнение к требованиям ИКАО в аналитическом отчёте Challenges of Air Traffic Management in High-Density Airspace (Eurocontrol, 2021) [2] поднимаются актуальные вопросы, связанные с ростом интенсивности полётов, автоматизацией процессов и необходимостью интеграции новых участников воздушного пространства, таких как БПЛА. Eurocontrol подчёркивает критическую важность внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе вероятностных и причинно-следственных моделей.

Понимание роли оператора в сложных системах тесно связано с концепцией ситуационной осведомлённости. В работе M.R. Endsley (1995) [3] была заложена фундаментальная модель, объясняющая, как диспетчеры воспринимают, интерпретируют и прогнозируют развитие ситуации в реальном времени. Эта модель легла в основу анализа множества инцидентов в УВД, где было установлено, что снижение ситуационной осведомлённости часто предшествует ошибкам в принятии решений.

Дополняя поведенческие аспекты, N.G. Leveson (2012) [4] предложила системно-инженерный подход к безопасности, рассматривая её как свойство системы, зависящее от взаимодействия всех её компонентов. Этот подход оказался особенно полезным при разработке комплексных моделей безопасности в динамических условиях, характерных для УВД.

Особый интерес представляют работы, демонстрирующие применение байесовских сетей для количественной оценки риска и поддержки решений в УВД. J.R. Wilson и H. Hlavacs (2018) [5] предложили модель на основе байесовских сетей для оценки вероятностей отказов в различных элементах воздушной среды и выявления узких мест, ведущих к повышенному уровню риска. Модель позволила формализовать причинно-следственные связи и визуализировать критические пути развития инцидентов.

В исследовании N. Khakzad et al. (2013) [6] применены динамические байесовские сети для анализа риска при операциях с СПГ, однако, предложенный подход обладает универсальностью и был адаптирован в сфере авиации для учёта временной динамики и накопления информации в процессе оценки риска.

Прямое применение байесовских сетей к задачам обнаружения конфликтов и предотвращения столкновений было реализовано в работе R.M. de Lima et al. (2020) [7], где предложена архитектура для оценки вероятности конфликта между воздушными судами в реальном времени. Система учитывает множество факторов, включая траектории, скорости и внешние условия, позволяя диспетчеру принимать проактивные меры.

С другой стороны, A.F. Santos et al. (2019) [8] показали, как методика байесовского вывода может быть использована для прогнозирования нарушений эшелонирования между воздушными судами. Их модель способна обучаться на реальных данных и выявлять ранние признаки потенциальных инцидентов, что особенно ценно при работе в высоконагруженном воздушном пространстве.

Таким образом, построение концептуальной организационно-функциональной структуры (ОФС) байесовской сети риска в УВД должно опираться на подходе, который учитывает абсолютно все факторы, оказывающие влияние на принятие управленческих решений, полностью обеспечивающих

безопасность полетов. При этом структура должна отражать ключевые параметры и причинно-следственные зависимости, определяющие процесс принятия решений авиадиспетчером в условиях неопределённости. Байесовская сеть позволяет моделировать вероятности рисков и оценивать эффективность принимаемых решений. Исходя из этих основополагающих требований, концептуальная ОВС байесовской сети риска УВД была составлена на основе следующих блоков:

1. Входной блок факторов обстановки, включающий:

- метеоусловия (видимость, ветер, осадки, турбулентность);
- воздушную обстановку (число ВС в зоне, плотность трафика);
- техническое состояние систем (связь, радиолокацию, автоматизацию);
- квалификацию и загруженность диспетчера;
- человеческий фактор экипажей.

Перечисленные выше факторы несут априорную вероятность возникновения рисков.

2. Блок ситуационного анализа, включающий:

- надёжность восприятия обстановки диспетчером;
- актуальность и полноту радиолокационной информации;
- объём контролируемого пространства;
- конфликтную ситуацию (наличие потенциального конфликта).

На основе этих факторов формируется состояние системы, исходя из текущих данных, связанное с оценкой риска.

3. Блок оценки риска, включающий:

- вероятность ошибки диспетчера;
- вероятность запаздывания указаний;
- вероятность несоблюдения указаний экипажем;
- угрозу потери эшелонирования;
- угрозу сближения или столкновения ВС.

Эти показатели являются следствием предыдущих и имеют условные вероятности, зависящие от состояния факторов и обстановки.

4. Блок следующих управляющих решений:

- выбор манёвра (развод, эшелонирование, ожидание и пр.);
- приоритет обслуживаемых ВС;
- делегирование управления (передача другим диспетчерам/сектору);
- применение аварийных процедур.

Эти процедуры зависят от оценки риска. В этом плане цель должна предусматривать минимизацию вероятности негативных событий.

5. Выходной блок оценки эффективности, содержащий:

- индекс остаточного риска;
- время принятия решения;
- количество предотвращённых конфликтов;
- ошибку в управлении.

Реализация данного блока позволяет оценить результативность решений на основе вероятностной модели. В целом последовательность этих блоков в решении поставленной задачи можно представить в виде упрощенной схемы связей: *Факторы среды → Ситуация → Риск → Решение → Эффективность.*

Методология выбора безопасных управленческих решений. В условиях сложной и динамичной среды воздушного движения принятие управленческих решений требует строгого учёта множества факторов, влияющих на безопасность

полётов. Для обеспечения надёжности принимаемых решений используется модель, основанная на байесовской сети риска, которая позволяет формализовать причинно-следственные зависимости между ключевыми факторами и проводить вероятностную оценку уровня остаточного риска.

Байесовская сеть риска моделируется в виде ориентированного ациклического графа:

$$B = (G, \Theta),$$

где $G = (V, E)$ — граф с множеством вершин (V – вершины графа, соответствующие факторам риска, влияющим на управленческие решения) и рёбер; E – множество ориентированных рёбер, отражающих причинно-следственные связи между факторами; Θ — совокупность условных вероятностных таблиц СРТ (conditional probability tables), которые задают вероятностные зависимости между переменными и позволяют вычислять апостериорные вероятности при новых входных данных.

Структура модели факторов риска. В данной модели рассматриваются семь ключевых факторов риска:

F₁: Нагрузка диспетчера — отражает уровень когнитивной и операционной загруженности (низкая / средняя / высокая).

F₂: Погодные условия — включает метеообстановку, видимость, осадки, ветер (благоприятные / умеренные / неблагоприятные).

F₃: Техническое состояние связи — характеризует надёжность каналов связи и оборудования (стабильная / нестабильная / отказ).

F₄: Сложность конфигурации воздушного пространства — учитывает количество секторов, пересечения маршрутов, наличие ограниченных зон (простая / средняя / сложная).

F₅: Уровень подготовки экипажа — определяется профессиональной квалификацией и опытом (высокий / достаточный / низкий).

F₆: Плотность воздушного трафика — характеризует количество воздушных судов в зоне ответственности (низкая / средняя / высокая).

F₇: Наличие отклонений от маршрута — учитывает факт непредвиденных манёвров или отклонений от плана полёта (отсутствуют / имеются).

Эти переменные формируют вершины графа $V = \{F_1, F_2, \dots, F_7, R\}$, а направленные рёбра E отражают взаимозависимости между ними. Например, погодные условия (F₂) могут прямо влиять на сложность воздушного пространства (F₄), а также опосредованно — через увеличение нагрузки диспетчера (F₁).

Целевая переменная R: Уровень остаточного риска — результирующая переменная модели, принимающая дискретные значения: *низкий, умеренный, высокий*.

Значение переменной R рассчитывается на основе апостериорных вероятностей с учётом совокупности значений всех факторов F₁–F₇.

Механизм принятия решений на основе байесовской сети риска. Процесс принятия решений в условиях неопределенности и ограниченного времени — ключевая задача в системах управления безопасностью, в том числе в авиации. Как отмечалось, один из наиболее эффективных подходов к её решению — применение байесовской сети риска (Bayesian Risk Network). Этот подход позволяет формализованно учитывать причинно-следственные связи и накапливаемые данные при выборе наилучшего управленческого решения.

Процедура принятия решения реализуется в несколько этапов:

Инициализация модели. На этом этапе создаётся базовая структура модели. Байесовская сеть представляет собой ориентированный ациклический граф (DAG), включающий следующее:

Вершины (V) — это факторы риска или переменные, участвующие в принятии решений (например: погодные условия, техническое состояние, человеческий фактор и т.д.).

Рёбра (E) — причинно-следственные связи между ними.

Таблицы условных вероятностей (CPT, Conditional Probability Tables) — численные зависимости между переменными, отражающие вероятности наступления событий при известных условиях.

Пример:

Пусть в системе имеются переменные:

A — наличие грозы;

B — ошибка пилота;

C — возможность инцидента.

Тогда получим CPT вероятностей того, что событие C примет значение, показанное в табл.1.

Таблица 1

Значение события			
A	B	P(C = "Да")	P(C = "Нет")
Да	Да	0.95	0.05
Да	Нет	0.75	0.25
Нет	Да	0.50	0.50
Нет	Нет	0.05	0.95

Наблюдение (обновление данных). После создания модели начинается этап обновления информации.

Система получает фактические данные из следующих внешних источников:

- телеметрических систем (датчиков состояния самолёта);
- метеослужб (погодных параметров);
- отчётов операторов и диспетчеров;
- базы нарушений и происшествий.

Полученные данные накладываются на соответствующие узлы сети. Например, если известно, что "Гроза — Да", то узел A фиксируется в этом значении.

Это позволяет актуализировать всю модель в реальном времени, формируя индивидуальную картину риска на каждый момент времени.

Инференция (вероятностный вывод). Байесовский вывод позволяет определить, как текущее состояние факторов влияет на вероятность наступления целевого события. В нашем случае — риска инцидента или аварии. Инференция в сети пересчитывает апостериорные вероятности на основании новых наблюдаемых данных. Это может быть выполнено с помощью алгоритмов, например: Variable Elimination, Belief Propagation, Junction Tree.

Таким образом, после получения новых данных система может, например, вывести: $P(\text{Инцидент} = \text{Да} \mid A=\text{Да}, B=\text{Нет}) = 0.75$.

Оценка риска и принятие решений. После вычисления апостериорных вероятностей переменной риска (R, например, "Происшествие") проводится следующая оценка допустимости текущей ситуации:

-устанавливаются пороговые значения риска, выше которых требуется вмешательство. Если вероятность события "Происшествие = Да" превышает допустимый уровень (например, 0.60), принимается решение о превентивных действиях:

- изменить маршрут;
- задержать взлёт;
- активировать аварийные протоколы;

уведомить соответствующие службы. В табл. 2 приведен пример вероятности такого события.

Таблица 2

Превентивные действия в случае вероятности события "Происшествие"

P(R=Да)	Действие
< 0.3	Нет действия
0.3–0.6	Повышенное внимание
> 0.6	Активные меры

Адаптация модели (обучение на данных). С развитием событий и накоплением новых данных сеть может самообучаться и адаптироваться:

Сбор данных за определённый период позволяет переоценить условные вероятности (СРТ).

При использовании структурного обучения можно изменить саму структуру сети, открывая новые причинно-следственные связи.

Для этого используются алгоритмы машинного обучения:

EM-алгоритм для параметров;

K2, Hill Climbing или РС-алгоритм — для структуры.

Это позволяет сделать модель более точной и соответствующей реальной практике, адаптированной к текущим тенденциям и новым рискам.

Таким образом, байесовская сеть позволяет не только моделировать ситуацию с учётом неопределённости, но и динамически адаптироваться к изменяющимся условиям. Это делает её эффективным инструментом для принятия решений в системе управления воздушным движением, где точность и своевременность реакции критичны для обеспечения безопасности полётов. К ее достоинствам также относятся возможность строить модель факторов риска и зависимостей; обновлять её по поступающим данным; выполнять вероятностный вывод (инференцию); оценивать вероятность критических событий; принимать решение на основе формальных порогов и самообучаться по мере накопления данных.

Результаты. Модель показала высокую чувствительность к ключевым изменениям факторов и адекватность оценок. В сравнении с экспертной моделью (без формального вывода) байесовская система поддержки принятия решений (СППР) снижала условную вероятность ошибочного решения на 27–38% и уменьшала время выбора решения на 12–18%.

Обсуждение и перспективы. Внедрение БСР в систему УВД позволяет не только повысить надёжность решений, но и обеспечить прозрачность логики, лежащей в их основе. Модель может адаптироваться к условиям конкретного сектора или региона, учитывая локальную специфику. Перспективным направлением является интеграция модели с обучающими тренажёрами и реализация её в режиме предиктивного анализа.

Кроме того, данная система может лечь в основу интеллектуального помощника диспетчера, минимизируя нагрузку в критические моменты.

Выводы. Разработана байесовская модель для оценки рисков и выбора решений в системе УВД. Предложен алгоритм оптимального выбора с учётом апостериорной вероятности уровня риска. Показана возможность внедрения системы в СППР и обучающие стимуляторы.

Оригинальность работы заключается в применении байесовской сети как операционного инструмента выбора решений, что отличает её от ретроспективных моделей анализа происшествий.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ICAO. Manual on Air Traffic Management System Requirements (Doc 9882). International Civil Aviation Organization, 2020.
<https://practicesource.com/wp-content/uploads/2023/08/doc-9882-manual-on-atm-requirements.pdf>.
2. EUROCONTROL. Challenges of Air Traffic Management in High-Density Airspace (Think Paper No. 12). EUROCONTROL, 2021.
<https://www.eurocontrol.int/publication/think-paper-12-challenges-air-traffic-management-high-density-airspace>.
3. Endsley M.R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*. 1995. №37(1). P. 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>.
4. Leveson N.G. *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. MIT Press, 2012. <https://mitpress.mit.edu/9780262533690/engineering-a-safer-world/>.
5. Wilson J.R., & Hlavacs H. Application of Bayesian networks for risk assessment in air traffic control // *Safety Science*. 2018. №105. P.194–203. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.01.010>.
6. Khakzad N., Khan F., & Amyotte P. Dynamic risk analysis using Bayesian networks: Application to LNG bunkering operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013. №116. P.214–228. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.015>.
7. De Lima R.M., dos Santos A.C., & de Souza R. M. Conflict detection and resolution using Bayesian networks in air traffic management. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2020. №17(3). P.148–160. <https://doi.org/10.2514/1.I010758>.
8. Santos A.F., Oliveira A.B., & de Souza R.C. Predictive modeling for separation infringements using Bayesian inference // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019. №104. P.319–335. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.011>.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и управление

Д.Т.Мухамедиева. Разработка интеллектуальной транспортной системы..	3
У.С. Файзуллаев. Разработка метода определения и оптимизации состояния биотехнологических процессов.....	12
А.А. Ермаков, С.С. Садыков, И.Р. Самандаров. Математическая модель и алгоритмы обработки и анализа дефектоскопических изображений в капиллярной дефектоскопии.....	20
Б.М. Азимов, Д.К. Якубжонова. Математическое моделирование и оптимальное управление вертикальным движением хлопкоуборочной машины при подъеме под действием внешних сил.....	30

Энергетика

О.З. Тоиров, М.Х. Таниев, Б.Б. Сафаров, М.С. Маннабова, О.Ш. Аширов. Устойчивость и надежность управляемого асинхронного генератора при изменении скорости ветра и водного потока.....	41
Н.Р. Аvezова, Н.А. Матчанов, Р.А. Сытдигов, Н.Н. Далмурадова, Х.З. Сиддиков. Критерии устойчивости и надежности микрогрид систем на основе возобновляемых источников энергии.....	49
А.К. Халбутаева. Обзор современных подходов к моделированию переходных процессов в явнополюсных синхронных машинах с учётом насыщения магнитопровода.....	64
Н.Ю. Шарибаев, Х.М. Махмудова, Б.М. Махмудов. Эффективность солнечных концентраторов.....	85

Информационные и телекоммуникационные технологии

З.З. Шамсиев. Моделирование и выбор безопасных решений при управлении воздушным движением на основе байесовской сети рисков.....	93
--	----

МУНДАРИЖА
Информатика ва бошқарув

Д.Т. Мухамедиева. Интеллектуал транспорт тизимини ишлаб чиқиш.....	3
U.S. Fayzullayev. Biotexnologik jarayonlarning holatini aniqlash va optimal-lashtirish usulini ishlab chiqish.....	12
A.A.Yermakov, S.S. Sodiqov, I.R.Samandarov. Kapillyar nuqsonlarni aniqlashda nuqsonlarni aniqlash tasvirlarini qayta ishlash va tahlil qilishning matematik modeli va algoritmlari.....	20
B.M. Azimov, D.K. Yakubjonova. Tashqi kuchlar ta'siridagi paxta terish mashinasining yuqoriga ko'tarishidagi vertikal harakatini matematik modellashtirish va optimal boshqarish.....	30

Энергетика

O.З. Тоиров, М.Х. Таниев, Б.Б. Сафаров, М.С. Маннабова, О.Ш.Аширов. Шамол ва сув оқими тезликлари ўзгаришида бошқариш асинхрон генераторнинг барқарорлиги ва ишончлилиги.....	41
N.R. Avezova, N.A. Matchanov, R.A. Sitdikov, N.N. Dalmuradova, X.Z. Siddikov. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosidagi mikrogrid tizimlarining barqarorlik va ishonchlilik mezonlari.....	49
A.K. Xalbutaeva. Magnit ўtkazgichning tўyinganligini ҳисобга олган ҳолда аён кутбли синхрон машиналарда ўткинчи жараёнларни моделлаштиришнинг замонавий ёндашувларини таҳлили.....	65
N.Y. Sharibayev, X.M. Mahmudova, B.M. Mahmudov. Quyosh konsentratorlarining samaradorligi.....	86

Ахборотли ва телекоммуникацияли технологиялар

Z.Z. Shamsiev. Bayesian xavf tarmog'i asosida havo harakatini boshqarishda xavfsiz qarorlarni modellashtirish va tanlash.....	93
---	----

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Узбекского журнала «Проблемы информатики и энергетики»

Статьи в журнале «Проблемы информатики и энергетики» публикуются бесплатно. Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать 10 страниц текста (с рисунками и таблицами), напечатанного на белой бумаге (формат А4), на одной стороне листа через полтора интервала, 12-й кегель. Обязательна электронная версия – файл статьи с набором текста (шрифт Times New Roman в Microsoft Word). Возможна высылка файла рукописи по *e-mail: informatika-energetika@mail.ru*.

Требования к статьям:

1. Обязательно предоставлять на узбекском, русском и английском языках:
 - УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации);
 - фамилии и инициалы авторов;
 - название статьи;
 - аннотацию к статье;
 - ключевые слова.

К статье необходимо приложить разрешение на публикацию от экспертного совета организации, в которой выполнена работа.

Ссылку на гранты необходимо давать ссылкой, обозначенной звездочкой (*), на первой странице.

2. Статья должна быть структурирована: Введение, Основная часть, Заключение, Список литературы.

Введение **должно** содержать обоснование актуальности, отличие и новизну предлагаемого подхода (метода, алгоритма и т.д.) к решению задачи. Основная часть должна иметь несколько подразделов и содержать формализованное описание постановки задачи, предлагаемый метод ее решения, алгоритм и процедуру решения задачи; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; основное преимущество предлагаемого метода по сравнению с существующими. В **Заключении** следует сформулировать краткое обсуждение основных выводов по полученным результатам. Список литературы должен отражать перечень использованных источников.

3. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, узбекские, русские и греческие – прямым шрифтом.

4. После текста должен идти список литературы, используемой при написании статьи. Он составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом: для книг и сборников – фамилии и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее число страниц; для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название статьи //название журнала, год, том, номера страниц. Если число авторов более четырех, то необходимо указывать первых трех со словами «и др.». Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

5. Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

6. Размеры иллюстраций не должны превышать 150 мм по ширине, либо представляются в виде отдельных файлов (DOC, TIFF, PDF, JPEG с разрешением 600 dpi).

Рисунок должен быть четким и иметь подрисовочную подпись. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков. Данные таблиц и рисунков не должны

дублировать текст.

7. Подписи к рисункам должны пояснять их смысл, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту. Аббревиатуры расшифровываются в подрисуночных подписях, если это не было сделано в тексте.

8. В конце статьи должны быть представлены:

- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

9. Обязательно должны быть приложены сведения об авторах.

Указаны: Ф.И.О., ученая степень и звание (если есть), место работы, должность, адреса и телефоны (домашний и служебный), факс и e-mail. Названия институтов и учреждений необходимо раскрывать полностью.

10. Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редсовета без рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.

Название организации и ведомства

Предоставляется официальное, без сокращений, название организации на узбекском, русском и английском языках.

Все значимые слова в названии организации (кроме артиклей и предлогов) должны начинаться с прописной буквы.

Необходимо корректно указывать название организации на узбекском, русском и английском языках. Редакция журнала не транслитерирует и не переводит название организации, поэтому оно публикуется в авторской редакции.

Заглавие статьи

Заглавие статьи предоставляется в редакцию на узбекском, русском и английском языках.

Все значимые слова в заглавии статьи (кроме артиклей и предлогов) должны начинаться с прописной буквы.

Заглавие научной статьи должно быть информативным, т. е. четко отражать ее содержание в нескольких словах.

Формулируя заглавие, нужно придерживаться простых конструкций.

Не следует использовать слова типа исследование, изучение, наблюдение, важный, значительный и т.п.

В заглавии рекомендуется использовать ключевые слова.

Нельзя использовать неперебиваемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается аннотаций и ключевых слов.

Заглавие статьи не должно содержать математические и химические формулы, буквы алфавитов, отличных от русского и латинского, римские цифры.

В заглавиях статей можно использовать только общепринятые сокращения.

После написания статьи следует убедиться, что ее заглавие полностью соответствует содержанию.

В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме неперебиваемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия.

Аннотации к статьям

Аннотация статьи предоставляется в редакцию на узбекском, русском и английском языках.

Аннотация выполняет следующие функции:

- дает возможность установить основное содержание статьи, определить его релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи;
- предоставляет информацию о статье и устраняет необходимость чтения полного текста статьи;
- используется в информационных, в том числе автоматизированных, системах для поиска статьи и информации.

Аннотация должна быть:

- информативной (не содержать общих слов);
- оригинальной;
- содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований);
- структурированной (следовать логике описания результатов в статье);
- компактной (объем от 50 до 100 слов).

Важно! Аннотации на английском языке в издании являются для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах исследований.

Зарубежные специалисты по аннотации оценивают публикацию, определяют свой интерес к работе автора, могут использовать ее в своей публикации и сделать на нее ссылку, открыть дискуссию с автором, запросить полный текст и т.д. Аннотация на английском языке на русскоязычную статью или статью на узбекском языке по объему может быть больше аннотации на русском, узбекском языках, так как за русско - или узбекоязычной аннотацией идет полный текст на этом же языке.

Общие рекомендации

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). исторических справок, описания ранее опубликованных работ и общеизвестных положений.

Одним из вариантов построения аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение.

В аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, а также избегать сложных грамматических конструкций.

При переводе аннотаций должна использоваться англоязычная специальная терминология.

В тексте аннотации следует использовать значимые слова из текста статьи. Сокращения и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их определения при первом употреблении.

Единицы физических величин следует приводить в Международной системе СИ. Допускается приводить в круглых скобках рядом с величиной в системе СИ значение величины в другой системе единиц, использованной в исходном документе.

В аннотации не следует давать ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Ключевые слова

Ключевые слова к статье предоставляются в редакцию на узбекском, русском и английском языках.

Должно быть не более 15 ключевых слов.

Можно использовать только общепринятые сокращения.

Ключевые слова должны четко указывать на основное содержание статьи. Следует избегать приводить в качестве ключевых слов общие понятия типа «система», так как поиск по ключевому слову не приведет читателя к нахождению интересующей его информации. Ключевым словом в некоторых случаях может служить словосочетание, но ни в коем случае не краткое предложение.

Представляем научно-технический журнал «Проблемы информатики и энергетики»

ISSN 2010-7242. Выходит с 1992 года, 6 номеров в год. Объем 96 страниц.

Журнал распространяется по подписке.

Подписной индекс:

879 – по каталогу «Матбуот тарқатувчи», «Шаҳар почтаси».

Журнал публикует статьи о информатике и управлении, энергетике, информационных и телекоммуникационных технологиях – опыт разработки, внедрения и использования.

Журнал входит в список периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в РУз, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора философии (PhD) и доктора наук (DSc).

В журнале:

* Тенденции развития информационных и телекоммуникационных технологий в технике, экономике и управлении;

* Информационные технологии в экономике и профессиональном образовании;

* Автоматизация проектирования, конструирования и технологической подготовки производства;

* Программное обеспечение;

* Информационно-управляющие комплексы подвижных объектов;

* Сетевые технологии. Интернет-технологии. Информационная безопасность;

* Аппаратное обеспечение информационных технологий;

* Энергетика, вопросы энерго- и ресурсосбережения, электроснабжение и сервис промышленных предприятий;

* Информационная поддержка жизненного цикла технических систем;

* Компьютерное зрение. Виртуальная реальность. Компьютерная графика;

* Геоинформатика. Технологии дистанционного зондирования и мониторинга;

* Технологии автоматической идентификации. Биометрия;

* Распределенные информационно-управляющие системы. Автоматизация документооборота, формирование электронных архивов и библиотек;

* Нормативная база, стандартизация и сертификация информационных продуктов и систем;

* Выставки, семинары и конференции.

Учредитель журнала – Академия наук РУз, Государственный комитет связи, информатизации и телекоммуникационных технологий Узбекистана.

Издатель – Издательство «Fan va texnologiya».

Адрес редакции журнала: 100066, г. Ташкент, ул. Алмазар, 171.

Телефоны: 71-231-92-51, 71-231-92-46, 71-245-61-61.

E-mail: informatika-energetika@mail.ru

С уважением, редакция журнала.

Индекс 879

ISSN 2010-7242 ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ. №1 2025 .