

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ТАЪЛИМ, ФАН ВА ИННОВАТСИЯЛАР ВАЗИРЛИГИ
ДЕНОВ ТАДБИРКОРЛИК ВА ПЕДАГОГИКА ИНСТИТУТИ

С.Н.НОРАЛИЕВ, С.С.НОРМУРОДОВ,
С.Н.НОРАЛИЕВ, А. А.САЙТНИЯЗОВ

НОЧИЗИҚЛИ ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ
НЕЙРОН ТАРМОҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИНГ
СИНТЕЗИ

Термиз–2026

УДК 681.51:004.032.26

КБК 517.988.6

Н 82

С.Н.Норалиев, С.С.Нормуродов,

С.Н.Норалиев, А. А.Сайтаниязов

Ночизиқли динамик объектларни адаптив нейрон тармоқли бошқариш тизимларининг синтези. // Монография. – “Termiz publishing center” нашриёти, 2026. - 120 б.

Денов тадбиркорлик ва педагогика институти кенгашининг 2026-йил 8-апрелдаги 7-сонли байонномасига асосан нашрга тавсия етилган.

Мазкур монографияда талабаларга реал вақтда ўқитиладиган тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоғига зарурий бошқарувчи таъсирни ишлаб чиқариш тармоқнинг ҳар қандай ночизиқли функцияни берилган аниқлик билан аппроксиматсиялаш хусусияти динамик объектларни бошқариш масалаларида тармоқдан фойдаланиш вариантыни нейрон тармоқлардан фойдаланишга нисбатан тармоқнинг ҳар қандай ночизиқли функцияни аппроксиматсиялаш қобилиятига (аппроксиматсиялаш хусусиятига) ва аппроксиматсиялаш жараёнини тавсифлайдиган сифат функционалини минималлаштиришга (оптимизатсиялаш хусусиятига) асосланган турли ёндашувлар ишлаб чиқишга оид масалалар бўйича илмий-тадқиқот ишларида эришилган натижалари ёритилган.

Монографиядан олий таълим муассасаларининг талабалари, магистрлари, соҳага доир иш фаолияти билан шуғулланувчи ходимларга моължалланган.

Масъул муҳаррир:

Шомирзайев Махматмурод Хурамович

Педагогика фанлари доктори, профессор

Тақризчилар:

Р.Я.Мамажанов, Денов тадбиркорлик ва педагогика институти “Ахборот технологиялари” кафедраси т.ф.ф.д. (PhD), доцент.

И.П.Хурамов, Термиз давлат университети Технологик таълим кафедраси ўқитувчиси п.ф.ф.д. (PhD),

ISBN: 978-9910-13-268-1

© С.Н.Норалиев

© “Termiz publishing center” нашриёти, 2026-й

КИРИШ

Саноатнинг ривожланиши техник объектларни бошқариш тизимларини ишлаб чиқишда умумий ёндашувни талаб қилади. Бу, бир томондан, тизимларни яратишга ва эксплуатация қилишга минимал харажатларда бошқаришнинг сифатини ошириш зарурлиги билан, бошқа томонлама эса – бошқариладиган объектнинг структураси, улар томонидан бажариладиган функцияларнинг мураккаблашуви билан, бунинг оқибати сифатида объектни бошқаришда уларни ҳисобга олиш зарур бўладиган ноаниқлик омилларининг ортиши билан шартланади. Ҳозирги кунда ноаниқлик шароитларида бошқаришнинг қабул қилса бўладиган сифатини таъминлайдиган “юмшоқ ҳисоблашлар” дан кенг фойдаланилмоқда [1,2].

Бошқариш масалаларида нейрон тармоқларини қўллаш муаммоси шу билан шартланадики, чизикли бошқариш тизимлари учун уларни синтезлашнинг универсал усуллари ва зарурий бошқаришни амалга оширадиган ростлагичларнинг структураси маълум бўлади. Ночизикли тизимлар учун ҳозирча бундай усулларни таклиф қилишга муваффақ бўлинмаяпти, барча ечимлар ўзининг қўлланилиш соҳасига эга ва бу ҳар бир тизим учун индивидуал бошқариш алгоритмларини амалга ошириш заруратига олиб келади. Нейрон тармоқли технологияларни қўллаш ҳал қилинадиган вазифани анчагина соддалаштириш имконини беради, чунки кўп қатламли нейрон тармоқ ўзининг очизикли структурасида очизикли динамик объектлар синфлари учун зарурий бошқариш қонунларини амалга оширишга қодир бўлади. Бу ҳолда муаммо ўқитиш алгоритмини

танлаш ва мазкур алгоритмда фойдаланиладиган қўшимча зарурий маълумотларни қидиришга келтирилади, бунинг натижасида нейрон тармоқнинг чиқишида оптимал бошқариш функцияси шаклланади.

Ночизиқли объектларни адаптив бошқариш масалаларида тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоқларни қўллашга мамлакатимиз ва хориждаги таниқли муаллифларнинг кўпгина ишлари бағишланган [3-5]. Бу ишларнинг камчиликлари, биринчидан, олинган натижаларнинг маҳаллийлиги бўлиб ҳисобланса, иккинчидан муаллифлар одатда фақат чиқувчи чизиқли параметрнинг вазн коэффициентларигина реал вақт моментида қатламнинг ростланадиган параметрлари бўйича ростланадиган параметрлар бўлиб ҳисобланади деб фараз қилади. Бу тахмин бошқариш масалаларида кўп қатламли нейрон тармоқлардан фойдаланишни асослашни катта даражада чегаралаб қўяди, чунки айнан яширин қатламлардаги вазн коэффициентларини ростлашгана нейрон тармоқнинг ростлагичларига уларнинг “универсал” аппроксиматсиялаш хусусиятларини кафолатлайди. Кўп қатламли нейрон тармоқ танланган ихчам кўпликда ҳар қандай узлуксиз функцияни берилган аниқлик билан аппроксиматсиялаши мумкин. Аппроксиматсиялаш аниқлиги яширин қатламдаги нейронларнинг танланган сони, тўпламнинг ўлчами ва аппроксиматсияланадиган функциянинг шаклига боғлиқ бўлади [2,4].

Умумий ҳолатда нейрон тармоқли тизимда бошқаришнинг структураси ва алгоритмларини синтезлаш масаласи тармоқнинг архитектураси, ўқитиш функционали ва бошқаришнинг мақсадини танлаш, тизим учун кенгайтирилган дифференциал тенгламалар

тизимини тузиш, умумлаштирилган ўқитиш хатосини танлаш ва бошқаришни ўқитиш алгоритминини танлашни ўз ичига олади. Нейрон тармоқдан фойдаланиш билан динамик объектни бошқариш тизиминини структуравий синтезлаш жараёни қуйидаги ҳисоблаш босқичларини бажаришдан ташкил топади:

1) бошқариладиган объектда талаб қилинадиган сифатни тавсифлайдиган u чиқиш функциясини аниқлаш, $y=0$ динамик тизимнинг керакли асимптотик ўзини тутишини белгилайди;

2) δ умумлаштирилган ўқитиш ва бошқариш хатоси функциясини шакллантириш;

3) нейрон тармоқли бошқариш тизимининг хусусиятларини бошқариш назарияси позицияларидан (жараёнларнинг турғунлиги, сифат кўрсаткичлари) таҳлил қилиш ва нейрон тармоқнинг параметрлари ҳамда уни ўқитиш алгоритмларини коррекциялаш.

Юқорида санаб ўтилган вазифаларнинг ҳал қилиниши нозичлики динамик объектларни нейрон тармоқли адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш имконини беради, бу сунъий нейрон тармоғининг яширин қатламларининг коэффициентларини ростлаш ҳисобига бошқаришнинг сифатини ошириш ва жараённинг кечишининг технологик режимларини турғунлаштириш имконини беради.

I-БОБ. ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ БОШҚАРИШ МАСАЛАЛАРИДА КЎП ҚАТЛАМЛИ НЕЙРОН ТАРМОҚЛАРИНИНГ ҚЎЛЛАНИЛИШИ

Ишда реал вақтда ўқитиладиган тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоғига зарурий бошқарувчи таъсирни ишлаб чиқариш вазифаси қўйилади. Тармоқнинг ҳар қандай нозичли функцияни берилган аниқлик билан аппроксиматсиялаш хусусияти динамик объектларни бошқариш масалаларида тармоқдан фойдаланиш вариантыни танлашда ҳал қилувчи хусусият бўлиб ҳисобланади [5,6]. Нейрон тармоқлардан фойдаланишга нисбатан тармоқнинг ҳар қандай нозичли функцияни аппроксиматсиялаш қобилиятига (аппроксиматсиялаш хусусиятига) ва аппроксиматсиялаш жараёнини тавсифлайдиган сифат функционалини минималлаштиришга (оптимизатсиялаш хусусиятига) асосланган турли ёндашувлар маълум. Шу хусусиятлар боис динамик объектларни бошқариш учун мўлжалланган кўп қатламли нейрон тармоқлардан фойдаланишга бўлган иккита асосий ёндашув тўғрисида гапириш мумкин.

Замонавий бошқарув назариясининг долзарб муаммоларидан бири нозичли шароитда фаолият кўрсатувчи ҳамда мураккаб, нозичли динамик характеристикаларга эга бўлган объектларни самарали бошқариш алгоритмларини яратишдир. Айнан шу муаммони ечишда кўп қатламли нейрон тармоқлари (КҚНТ) алоҳида аҳамият касб этади. Нейрон тармоқларининг бошқарув тизимларига интеграцияси уларнинг иккита фундаментал хусусиятига асосланади: аппроксиматсиялаш ва оптимизатсиялаш қобилияти. Ушбу бандда реал вақтда ўқитиладиган тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоғи орқали зарурий бошқарувчи таъсирни ишлаб чиқариш масаласи кўриб

чиқилиб, нейрон тармоқларининг юқоридаги хусусиятлари атрофлича таҳлил қилинади.

Масалан, объектни бошқариш учун зарур бўлган, объектнинг ҳолати ва кириш таъсирлари орасидаги мураккаб нозичлиқли боғланишни ифодаловчи функция мавжуд. Агар бу функция аналитик кўринишда берилмаган бўлса, тўғри тарқалишли нейрон тармоғи уни (ўқитиш жараёнида) керакли даражадаги аниқлик билан "ўрганиб олади". Бу эса, ўз навбатида, бошқарув тизимида зарурий бошқарув сигналларини ҳисоблаш имконини беради. Бу хусусият айнан реал вақтда ишлайдиган тизимларда муҳим аҳамият касб этади, чунки объектнинг параметрлари вақт ўтиши билан ўзгариши (дрейф қилиши) мумкин ва тармоқ бу ўзгаришларга мослашиши зарур.

Нейрон тармоқларининг оптимизациялаш хусусияти. Нейрон тармоғини аппроксимациялашга ўргатиш жараёни аслида оптимизация масаласидир. Тармоқнинг чиқишидаги хатони камайтириш учун, одатда, сифат функционали (ёки йўқотиш функцияси) киритилади. Кенг тарқалган сифат функционали бу — ўртача квадратик хато бўлиб, тармоқнинг реал чиқиши билан эталон (кутилаётган) чиқиш орасидаги фарқни ифодалайди. Оптимизациялаш хусусияти шундай алгоритмларни (масалан, градиент тушиш усули, тескари хатони тарқатиш (backpropagation) алгоритми) яратиш имконини берадики, улар орқали ушбу сифат функционалини минималлаштирувчи тармоқ оғирлик коэффициентлари (параметрлари) излаб топилади.

Реал вақтда ўқитиш шароитида бу жараён янада мураккаблашади, чунки маълумотлар кетма-кет келиб тушади ва тизим бир вақтнинг ўзида ҳам ўрганиб, ҳам бошқарув сигналларини ишлаб чиқариши

керак (online learning). Бу эса, оптимизация алгоритмининг тезкорлиги ва робастлигига (барқарорлигига) юқори талаблар қўяди.

Нейрон тармоқларини бошқарувда қўллашга иккита асосий ёндашув. Юқорида баён қилинган аппроксимациялаш ва оптимизациялаш хусусиятларига таянган ҳолда, кўп қатламли нейрон тармоқларини динамик объектларни бошқаришга жалб қилишнинг иккита асосий концептуал ёндашуви шаклланган:

Тўғридан-тўғри адаптив бошқарув (Direct Adaptive Control). Бу ёндашувда нейрон тармоғининг ўзи бевосита бошқарувчи (контроллер) сифатида ишлатилади. Тармоқнинг киришига объектнинг ҳолати (ёки ҳолат хатоси) берилади, чиқишида эса объектга бериладиган бошқарув сигнали ҳосил қилинади. Тармоқнинг ўқитилиши (яъни, оғирлик коэффицентларини созлаш) тизимнинг ишлаш жараёнида, объектнинг чиқиши билан эталон модель чиқиши (ёки берилган траектория) орасидаги фарқни камайтириш орқали амалга оширилади. Бу ҳолда нейрон тармоғи объектнинг тесқари динамикасини аппроксимациялашга уринади.

Билвосита адаптив бошқарув (Indirect Adaptive Control). Иккинчи ёндашувда нейрон тармоғи объектнинг идентификацияловчи модели сифатида ишлатилади. Яъни, тармоқ объектнинг келгусидаги ҳолатини ёки чиқишини башорат қилишга ўргатилади. Сўнгра, ушбу нейрон модели асосида, алоҳида синтез қилинган бошқарув қонуни (масалан, модель прогнозли бошқарув, MPC) ёрдамида керакли бошқарув сигнали ҳисобланади. Бу усулнинг афзаллиги шундаки, нейрон тармоғи фақат объект динамикасини аниқ моделлаштиришга масъул бўлиб, бошқарув сигналининг ҳисоблаш бошқа, барқарорроқ

усуллар билан амалга оширилиши мумкин.

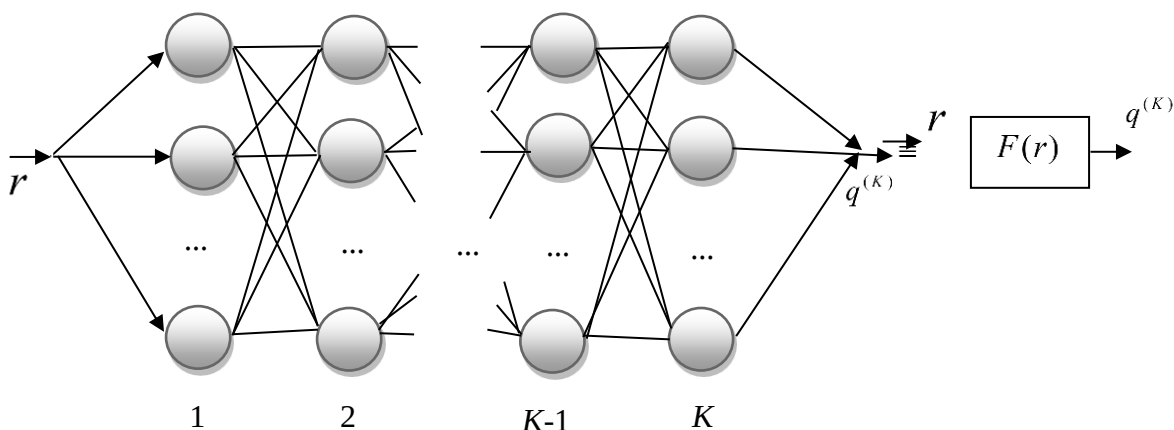
Биринчи ёндашув – статик ёндашув бўлиб, статик нейрон тармоқларнинг олдиндан берилган ночизиқли функцияни ишлаб чиқариш хусусиятига асосланади. Иккинчи ёндашув – динамик ёндашув – сунъий динамик нейрон тармоқларининг бошқариш объектининг (БО) фаолият кўрсатиш жараёнига параллел равишда ўзининг ўзини тутишини ўзгартириш қобилиятига асосланади [7]. Бунда тармоқнинг ўзини тутишининг ўзгариши деганда ростланадиган вазн коэффициентларининг ўзгариши ва бунинг оқибати сифатида тармоқ билан аппроксиматсияланган ночизиқли функциянинг ўзгариши тушунилади.

Чизиқли динамик тизимлар учун универсал бошқариш алгоритмларини ва бу синфдаги барча объектлар учун ягона бўлган синтезлаш усуллари таклиф қилиш мумкин. Бундай бошқариш алгоритми бўлиб, масалан, ҳолат вектори бўйича чизиқли манфий тескари боғланиш ёки чизиқли тизимларни илдизли синтезлаш усули хизмат қилиши мумкин [8,9]. Ночизиқли динамик тизимлар учун ҳозирча бундай ягона ёндашувни таклиф қилишга муваффақ бўлинмаган. Эҳтимолки бу ерда сабаб ночизиқли тизимларнинг анчагина мураккаб ва турли-туман ўзини тутишида яширинган бўлиши мумкин. Маълумотлар тўлиқ бўлмаган шароитларда объектни бошқариш масаласининг айнан “ночизиқли” қўйилиши нейрон тармоқлардан бошқариш тизимларида ростлагичларни қуриш учун универсал концептуал асос сифатида фойдаланиш учун асосларни беради.

1.1-§. Статик кўп қатламли нейрон тармоқлари

Базавий процессор элементининг (БПЭ) қатламларини кетма-кет туташтириш кўп қатламли нейрон тармоғи деб аталади. Кўп қатламли нейрон тармоғида (КҚНТ) қатламларни 1-кирувчи қатламдан $K - y$ чиқувчи қатламга қараб рақамлаш қабул қилинган. Одатда тармоқнинг чиқувчи қатлами мадалина (сода бирқатламли нейрон тармоқ) кўринишида ишланади, кирувчи қатлам $q^{(0)} = r$ сигнал учун буфер қатлам бўлиб ҳисобланади. Тўлиқ боғланган нейрон тармоқлар деб аталувчи тармоқларда ҳар бир қатламнинг БПЭ нинг чиқишлари кейинги қатламнинг барча БПЭ ларининг киришларига кириб келади. Агар i -қатламнинг БПЭ нинг киришлари ва k -қатламнинг БПЭ нинг чиқишлари ўртасида боғланишлар бўлмаса, кўп қатламли нейрон тармоқ тўғри таъсирли нейрон тармоқ деб аталади, бу ерда $k \geq i$.

Статик тўлиқ боғланган тўғри таъсирли кўп қатламли нейрон тармоқнинг архитектураси 1.1-расмда тасвирланган. Рамзий кўринишда нейрон тармоқни $N_{n_0, n_1, \dots, n_K}^K$ сифатида тасвирлаш мумкин, бу ерда K – тармоқдаги қатламларнинг сони; n_0 – тармоқдаги киришларнинг сони; $n_l, l = \overline{1, K-1}$ – l -х “яширин” ёки оралик қатламларда БПЭ ларнинг сони; n_K – чиқувчи K -қатламда БПЭ ларнинг сони ва бир пайтнинг ўзида тармоқнинг $q_1, \dots, q_{n_K}$ чиқишлар сони. Қатламда БПЭ лар ўртасида боғланишлар мавжуд эмас. l -қатламнинг БПЭ нинг чиқишлари ($l = \overline{1, K-1}$) фақатгина кейинги $(l+1)$ -қатламнинг БПЭ нинг киришларига кириб келади.



1.1-расм. Статик тўлиқ боғланган тўғри таъсирли нейрон тармоқ

Нейрон тармоқнинг r кириши ва $q^{(K)}$ чиқиши ўртасидаги боғланишни аниқлаймиз. l -қатламнинг БПЭ нинг вазн коэффициентларининг $(n_l \times (n_{l-1} + 1))$ матрицасидан фойдаланиш билан:

$$W^{(l)} = [w_0^{(l)} | [w_1^{(l)} | w_2^{(l)} | \dots | w_{n_l}^{(l)}]^T] = [w_0^{(l)} | W_1^{(l)}]$$

l -қатламнинг чиқишини вектор-матрица шаклида ёзамиз:

$$q^{(l)} = f(w_0^{(l)} + W_1^{(l)} q^{(l-1)}) = f^{(l)}(q^{(l-1)}), \quad l = \overline{1, K}.$$

Барча $l = K, K-1, \dots, 1$ лар учун кетма-кет қўлланилган ушбу ночизиқли рекуррент тенглама тармоқнинг r кириши ва $q^{(K)}$ чиқиши ўртасидаги боғланишни

$$q^{(K)} = f^{(K)}(w_0^{(K)} + W_1^{(K)} f^{(K-1)}(w_0^{(K-1)} + W_1^{(K-1)} f^{(K-2)}(\dots w_0^{(l)} + W_1^{(l)} f^{(l-1)}(w_0^{(l)} + W_1^{(l)} f^{(l-2)}(\dots w_0^{(2)} + W_1^{(2)} f^{(1)}(w_0^{(1)} + W_1^{(1)} q^{(0)}))\dots)). \quad (1.1)$$

кўринишда аниқлаш имконини беради.

Бу муносабатдан нейрон тармоқ ўзининг структураси туфайли $w, \dim[w] = N$ вазн коэффициентлари векторларига ва танланган $f^{(l)}$ ночизиқли функцияларни $q^{(K)}, \dim[q^{(K)}] = m$ нейрон тармоқнинг чиқиш кенглигига фаоллаштиришга боғлиқ равишда $r, \dim[r] = n$ кирувчи векторни унчалик мураккаб бўлмаган $F: R^n \times R^n \rightarrow R^m$ ночизиқли қайта шакллантириши келиб чиқади.

[5,6] да икки қатламли тармоқ берилган ихчам кўпликларда p векторни (1.1) га ва $f(\cdot)$ сигмоидли фаоллаштириш функцияларига мувофиқ қайта шакллантиришда ҳар қандай кўп ўзгарувчили узлуксиз функцияни аппроксиматсиялаши мумкинлиги кўрсатилган. Умумий ҳолатда сигмоидли ёки белгили функцияларга эга бўлган икки қатламли нейрон тармоқни қўллаш билан узлукли функцияларни аппроксиматсиялаш мумкин эмас, бу тармоқ томонидан амалга ошириладиган бошқариш синфларига ва шундан келиб чиққан ҳолда уларни бошқариш учун нейрон тармоқ ростлагичларининг бундай типидан фойдаланиш мумкин бўлган объектлар синфларига чеклаш бўлиб ҳисобланади. Бу камчиликни бартараф қилиш учун нейрон тармоқларнинг кўпроқ мураккаб архитектурасига, масалан уч қатламли нейрон тармоққа ўтиш зарур бўлади.

Нейрон тармоқларининг универсал аппроксиматорлик хусусияти уларнинг турли хил функцияларни моделлаштириш қобилиятини таъминласа-да, бу қобилият тармоқнинг архитектурасига (қатламлар сони, нейронлар сони) ва фаоллаштириш функциясининг турига бевосита боғлиқ. Ҳар қандай нейрон тармоғи, айниқса чегараланган қатламлар сони билан, фақат маълум бир функциялар синфини аниқ ифода қила олади. Бу эса, ўз навбатида, бошқарув тизимларини лойиҳалашда муҳим чекловларни келтириб чиқаради.

Икки қатламли тармоқларнинг чегараланганлиги: Узлукли функциялар муаммоси. Бироқ, "узлуксиз функция" шarti бу ерда ҳал қилувчи аҳамиятга эга. Тадқиқотлар шуни кўрсатадики, умумий ҳолда, фаоллаштириш функцияси сифатида сигмоидли ёки белгили (знаковая, sign function) функциялардан фойдаланадиган икки

қатламли нейрон тармоқлари узлукли (узилишга эга бўлган) функцияларни аппроксимациялашда етарли самара бермайди. Яъни, бундай тармоқлар узлуксизлик нуқталарига эга бўлган функцияларни (масалан, "on-off" типигаги релели бошқарув қонунларини) аниқ ифодалаш ёки уларга яқинлашиш қобилияти чекланган.

Бу ҳолат бошқарув назарияси учун қуйидаги муҳим хулосаларни беради:

Бошқарув синфларига чеклов. Икки қатламли нейрон тармоқ асосида яратилган ростлагич (контроллер) фақат узлуксиз бошқарув сигналларини ишлаб чиқаришга мослашган. Агар оптимал бошқарув қонуни ўз ичига сакрашсимон (ступенчатое) ўзгаришларни ёки релели режимни олса, бундай ростлагич самарали ишлай олмайди.

Объектлар синфига чеклов. Шунга мос равишда, икки қатламли нейрон ростлагичлардан фойдаланиш мумкин бўлган объектлар доираси ҳам чегараланади. Улар, асосан, динамикаси узлуксиз функциялар билан ифодаланадиган ва бошқарув таъсири силлиқ бўлиши талаб этиладиган объектлар (масалан, кўпчилик робототехника тизимлари, технологик жараёнлар) учун яроқлидир. Узлукли ҳаракатга эга бўлган объектлар (масалан, зарбали таъсирлар, фрикцион узилишлар) учун бундай ростлагичлар етарли даражада аниқликни таъминлай олмаслиги мумкин.

Чекловни бартараф этиш: Уч қатламли нейрон тармоқлар зарурияти. Юқоридаги камчиликни бартараф этишнинг асосий йўли нейрон тармоқ архитектурасини мураккаблаштириш, яъни қатламлар сонини оширишдир. Хусусан, иккита яширин қатламга эга бўлган уч қатламли нейрон тармоққа (кириш қатлами, биринчи яширин қатлам,

иккинчи яширин қатлам, чиқиш қатлами) ўтиш талаб этилади.

Чуқурроқ архитектура (уч ва ундан ортиқ қатлам) тармоққа маълумотларни иерархик тарзда қайта ишлаш имконини беради. Биринчи яширин қатлам оддий хусусиятларни (масалан, чизиқларни, чегараларни) ажратса, иккинчи қатлам ушбу хусусиятларни бирлаштириб, мураккаброқ, жумладан, узлуклиликини ҳосил қилувчи геометрик шаклларни яратиши мумкин. Бу дегани, уч қатламли тармоқ функционал жиҳатдан икки қатламли тармоққа нисбатан кучлироқ бўлиб, у нафақат узлуксиз, балки узлукли функцияларни ҳам, жумладан, турли хил "тўсиқлар" ва "ўйиқлар"га эга бўлган мураккаб рельефларни ҳам самарали аппроксимациялай олади [10],

1.2-§. Тўғри таъсирли КҚНТ ни ўқитиш алгоритмлари

Нейрон тармоқни ўқитиш деганда унинг БПЭ нинг $w_{i,j}$ вазн коэффициентларини ростлаш жараёни тушунилади. Бунинг натижаси тармоқ томонидан аниқ вазифанинг бажарилиши – таниб олиш, оптималлаштириш, аппроксимациялаш, бошқариш бўлиб ҳисобланади. Бу мақсадларга эришиш J сифат критерийси билан ифодаланади, унинг $\min_w J = J^*$ минимал қиймати қўйилган масаланинг энг яхши ечимига мос келади.

Хатоликнинг тескари тақсимлаш усули – ВР усули [4,11,12,13] очизикли статик нейрон тармоқларни ўқитиш учун ишлаб чиқилган ва охирги чиқувчи қатламнинг БПЭ сидан бошлаб биринчи қатламнинг БПЭ сизгача БПЭ ни кетма-кет ва қатламма-қатлам ростлаш технологиясидан фойдаланади. Тармоқни ўқитиш циклини зарурий сон марта такрорлаш мумкин. БПЭ нинг вазн коэффициентларини ростлаш учун $J(e_u)$ ўқитиш критерийсини

градиентли минималлаштириш усули қўлланилади. Бу ерда $e_u = u^* - u = u^* - q^{(K)}$ — (1.1) га мувофиқ r кирувчи векторни K охириги қатламнинг $u = q^{(K)}$ чиқувчи векторига қайта шакллантиришда u^* зарурий (эталон) чиқишга нисбатан тармоқни ўқитишнинг хато вектори.

$J(e_u)$ функция стандарт ВР усулда оний хатонинг квадратик функцияси сифатида қабул қилинади:

$$J(e) = 0.5e^T e. \quad (1.2)$$

$J(e_u)$ ни $w_{i,j}^{(l)}$ $l = K - 1, K - 2, j = 1$ ростланадиган вазн коэффициентлари бўйича градиент усулига мувофиқ минималлаштириш ва K қатламнинг хатосини l -қатламнинг умумлаштирилган хатосига қайта ҳисоблаш кўп қатламли нейрон тармоқларни ВР ўқитиш технологиясининг моҳиятини белгилайди. Унга мувофиқ ВР алгоритми қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$w^{(l)} = - \Gamma f'(s^{(l)}) \frac{\partial J}{\partial q^{(l)}} (q^{(l-1)})^T, \quad \Gamma = \Gamma^T > 0, \quad (1.3)$$

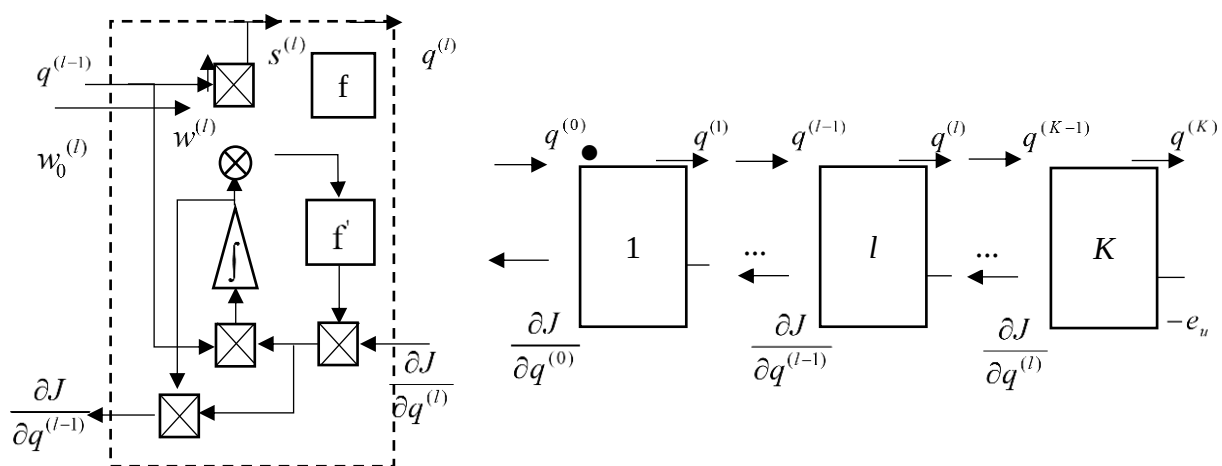
$$\frac{\partial J}{\partial q^{(l)}} = (w^{(l+1)})^T f'(s^{(l+1)}) \frac{\partial J}{\partial q^{(l+1)}}, \quad (1.4)$$

бу ерда $\frac{\partial J}{\partial q^{(l)}}$ векторлар l қатламда БПЭ ни ўқитишнинг

умумлаштирилган хатоси; $l, f'(s^{(l)}) = \left. \frac{\partial f(s)}{\partial s} \right|_{s=s^{(l)}}$ — диагонал матрица. $l = K$

да (1.4) муносабат чиқувчи қатламни ўқитиш хатосига мос келади:

$$\frac{\partial J}{\partial q^{(k)}} = - e_u. \quad (1.5)$$



1.2-расм. Тармоқнинг фаолият кўрсатишининг структура
схемаси.

(1.2) – (1.4) га мувофиқ синтезланадиган бошқариш тизимининг динамик звеноси сифатидаги ўқитиладиган нейрон тармоқнинг фаолият кўрсатишини акс эттирувчи эквивалент структуравий схема 1.2-расмда кўрсатилган.

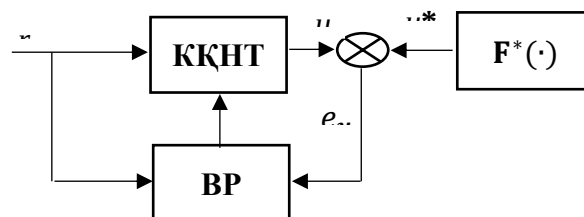
1.2,а-расмда тармоқнинг ростланадиган l -қатламининг эквивалент схемаси тасвирланган; 1.2,б-расмдаги схема K та қатламдан ташкил топган тармоқнинг эквивалент схемасини акс эттиради. Эквивалент схеманинг киришлари $q^{(0)}$ ва e_u векторлар бўлиб ҳисобланади. Тармоқнинг чиқишлари бўлиб $q^{(K)}$ ва $\frac{\partial J}{\partial q^{(0)}} = e_{(0)}$ векторлар хизмат қилади. $e_{(0)}$ векторга тармоқнинг ўқитилганлигининг ўлчови сифатида қараш мумкин ва ундан ўқитиш “дарс” ларининг сонини танлаш ва тизимни моделлаштириш жараёнида қатламларнинг зарурий сонини коррекциялаш учун фойдаланиш мумкин. 1.2-расмда келтирилган структура схемасини уларни ўқитиш жараёни узлуксиз дифференциал тенгламалар билан тасвирланадиган КҚНТ лар учун

сунъий нейрон тармоқларининг фаолият кўрсатишининг икки ёқламалилиги тамойилини қўллаш натижасида олиш мумкин [11,13,14,15,16]. ВР алгоритмнинг оптимал хусусиятлари [4,12] ишларда таҳлил қилинган.

1.3 - §. Динамик объектларни бошқариш масалаларида статик КҚНТ лардан фойдаланиш

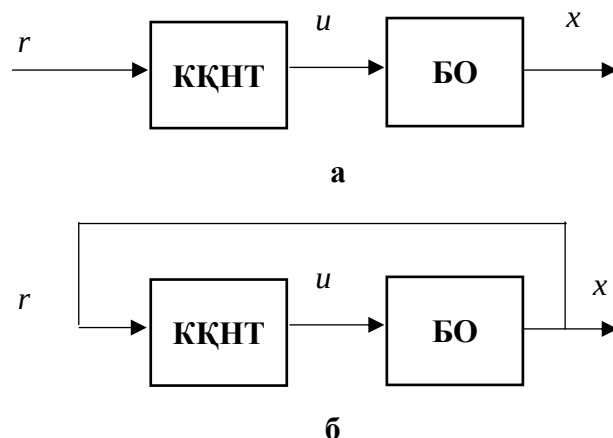
Динамик объектларни бошқариш тизимларида статик нейрон тармоқлардан фойдаланишга бизга маълум мисолларни кўриб чиқамиз. Одатда бошқариш тизимида тармоқнинг фаолият кўрсатиш жараёни иккита босқичда кечади.

Биринчи босқичда тармоқни бошқарувчи таъсирнинг берилган функциясини ишлаб чиқаришга ўқитиш бажарилади. Тармоқни ўқитиш 1.3-расмда кўрсатилган схема бўйича ўтказилади, бу ерда u – тармоқнинг чиқиши, e_u – ўқитишнинг хатоси, F^* – зарурий u^* бошқариш функциясини (тармоқнинг чиқишининг керакли қийматини) шакллантирувчи блок, r – тармоқнинг киришларининг вектори. Энг оддий ҳолатда u^* зарурий бошқарувчи таъсир бошқариш объектининг тескари операторидан фойдаланиш билан берилади ёки бошқариладиган объектда ўтиш жараёнларининг талаб қилинадиган сифатни таъминлайдиган бошқа ҳар қандай u^* бошқарувчи таъсир танланади.



1.3-расм. КҚНТ ни ўқитиш схемаси

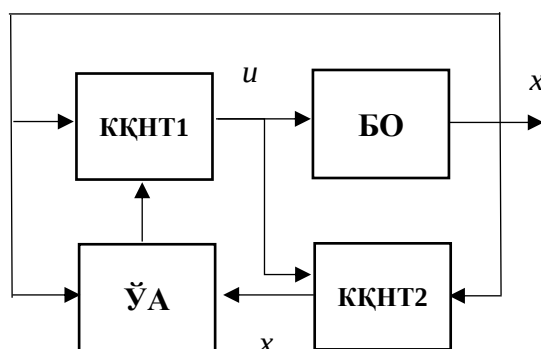
Ўқитишнинг иккинчи босқичида нейрон тармоқ бошқариладиган объектга уланади. Ишлаб чиқариладиган функциянинг кирувчи аргументлари бошқариш тизимида тармоқнинг боғланишларининг таркибини белгилайди. Кўпроқ маълум структура схемаларига нейрон тармоқ ва бошқариладиган объектни 1.4-расмда кўрсатилганидек тескари ва тўғри улаш мисол бўлиб хизмат қила олади. Бу ерда 1.4,а-расмда бошқариш объектининг тескари оператори функциясини ишлаб чиқарадиган тармоққа мисол келтирилган, унинг аргументи бўлиб r вақт функцияси хизмат қилади. 1.4,б-расмдаги схемада нейрон тармоқ бошқариладиган объектнинг ҳолат вектори бўйича зарурий бошқарувчи таъсирни ишлаб чиқаради.



1.4-расм. КҚНТ ли бошқариш тизими

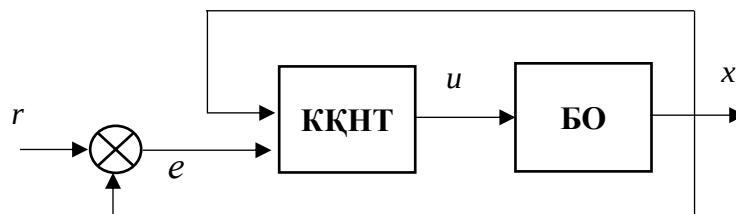
Тармоқни бундай улашнинг камчилиги бошқариладиган объектнинг параметрлари ва структураси тўғрисида априор (олдиндан берилган) маълумотларнинг бўлиши зарурлиги бўлиб ҳисобланади. Бошқариш тизимининг структурасига бошқариш объектини идентификатсиялаш блогини киритиш ва тармоқни объектнинг модели бўйича бошқариш жараёнининг суръатига ростлаш билан бундан қочиш мумкин. Бундай ечим бошқариш тизимидаги

контроллернинг талаб қилинадиган ҳисоблаш қувватининг кескин ортишига олиб келади. Бир қатор ҳолларда [4,12] идентификатсиялаш блогини идентификатор сифатида яна бир нейрон тармоқдан фойдаланиш билан ростлагич билан бир хил ҳисоблаш муҳитида ишлаш мақсадга мувофиқ бўлади. Бошқариш тизимининг структура схемаси 1.5-расмда келтирилган, бу ерда КҚНТ1 дан ростлагич сифатида, КҚНТ2 дан идентификатсиялаш блоги сифатида фойдаланилади. Ҳар бир қадамда аввал КҚНТ2 ростланади, сўнгра у бўйича ЎА (ўқитиш алгоритми) ростлагични – КҚНТ1 ни ростлайди. Бундай бошқариш тизими адаптивлик хусусиятига эга бўлади.



1.5-расм. КҚНТ ли бошқариш тизими

Статик нейрон тармоқ ёрдамида икки контурли бошқариш тизимини қуриш варианты 1.6-расмда келтирилган. Ички контурда бошқарувчи таъсир бошқариладиган объектнинг ҳолат векторидан функция сифатида шакллантирилади. Ташқи контурда бошқарувчи таъсир бошқариш тизимидаги жорий боғланмаслик функцияси сифатида шакллантирилади. Ички ва ташқи контурларнинг бошқарувчи таъсирлар функциялари битта нейрон тармоқ билан амалга оширилади.



1.6 расм. КҚНТ ли бошқариш тизими

Кўпинча кўп қатламли нейрон тармоқлардан бошқариладиган объектнинг номаълум нозичиликларини аппроксиматсиялаш, сўнгра олинган аппроксиматсияланган функцияларни бошқариш қонунларига ўрнига қўйиш учун фойдаланилади [15].

Кўриб чиқилган бошқариш тизимларининг ажралиб турувчи хусусияти нейрон тармоқдан динамик объектларни бошқариш масалаларида ўқитиш алгоритмида бошқариладиган объектнинг динамикасини ҳисобга олмасдан берилган қонун бўйича маълумотларни статик қайта шакллантиргич сифатида фойдаланиш бўлиб ҳисобланади. Бундай ёндашув тармоқдан статик объектларни бошқариш масалаларида функцияларнинг берилган синфини ишлаб чиқаришда анъанавий фойдаланиш билан тушунтирилади. Тармоқни ўқитиш алгоритмида бошқариладиган объектнинг динамикасини ҳисобга олиш зарурлиги динамик тармоқлар базасидаги бошқариш тизимларига ўтиш заруратини шартлайди.

Нейрон тармоқларнинг реал вақтда ўқитилиши уларни ноаниқлик шароитида ишлайдиган бошқарув тизимлари учун бебаҳо воситага айлантиради. Ушбу жараённинг асосий моҳияти шундаки, нейрон тармоғини параметрларини созлаш (оғирлик коэффицентларини коррективировка қилиш) процедураси объектни бошқариш жараёнига параллел равишда амалга оширилади. Бошқача айтганда, тизим бир

вақтнинг ўзида ҳам бошқарув сигналларини ишлаб чиқаради, ҳам ўрганади. Бу эса, дастлабки бошқарув қонунини яратиш учун объектнинг тўлиқ ва аниқ математик моделига эга бўлиш шарт эмаслигини англатади. Объектнинг параметрлари вақт ўтиши билан ўзгарганда (масалан, механизмларнинг ейилиши, муҳит ҳароратининг ўзгариши) ёки объектга ташқи номаълум таъсирлар бўлганда, нейрон тармоғи ўқитиш процедураси орқали бу ўзгаришларни "сезади" ва ўз параметрларини шунга мослаб, бошқарув сифатини сақлаб қолади. Натижада, бундай тизимлар классик, доимий созланган ростлагичлардан фарқли ўлароқ, ишлаб чиқариш жараёнида юзага келадиган турли хил номаълум омилларга автоматик тарзда мослашиш (адаптатсияланиш) хусусиятига эга бўлади.

1.4-§. Адаптив автоматик бошқариш тизимларида динамик КҚНТ лардан фойдаланиш

Бошқариш масалаларида динамик нейрон тармоқларни қўллашга бағишланган кўпчилик ишларда Ж. Хопфилднинг рекуррент тармоғидан фойдаланилади [17,18]. Динамик фаоллаштириш функцияларига эга бўлган тармоқлардан фойдаланиш камроқ учрайди. Бунга 1971 йилда эълон қилинган иш мисол бўлиб хизмат қилиши мумкин, унда динамик фаоллаштириш функциясига эга бўлган сунъий нейрон тармоғи базасида объектнинг узатиш функциясини ортогонал кўпаъзолар бўйича спектрга ёйиш процедураси амалга оширилган.

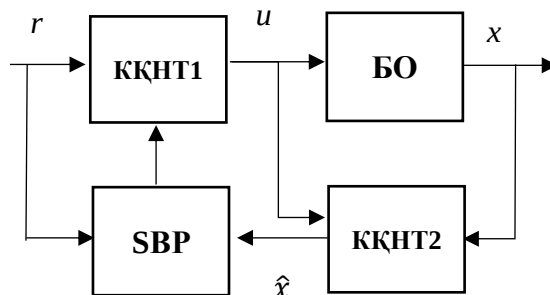
Кейинги ишларда [19] нозикли динамик объектларни идентификатсиялаш ва адаптив бошқариш масалаларида кўп қатламли нейрон тармоқлардан фойдаланишнинг самараси яна бир бор намоёни қилинган. Бироқ дарҳол бу ёндашувнинг асосий камчилиги ҳам

маълум бўлган: реал вақтда ростланадиган кўп қатламли тармоқларга эга бўлган нейрон тармоқли бошқариш тизимларида ўтиш жараёнларининг турғунлигини таҳлил қилишнинг мураккаблиги. Мазкур камчиликни компенсациялаш мақсадида [18] ишда очизикли фаоллаштириш функцияларига эга бўлган яширин қатламларда жойлашган вазн коэффицентларига эга бўлган кўп қатламли нейрон тармоқлардан фойдаланиш таклиф қилинган. Бундай тармоқда фақатгина чиқувчи қатламнинг коэффицентлари ростлайди – бу ҳолда ростлаш жараёнларининг турғунлигини таҳлил қилишга нисбатан адаптив бошқариш тизимларида маълум бўлган ёндашувлардан фойдаланиш мумкин. Бироқ муаллиф яширин қатламларнинг коэффицентларини самарали танлаш процедурасини таклиф қила олмаган. Кейинги ишларда реал вақтда ўқитиладиган сигмоидли тармоқларга эга бўлган нейрон тармоқли бошқариш тизимларининг турғунлигини исботлашнинг муқобил вариантлари келтирилган. Нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларида яширин қатламларни радиалбасис фаоллаштириш функциясига эга бўлган тармоқлар (РБФ-тармоқлар) кенг тарқалишга эга бўлган. Уларнинг ютуқлари, биринчидан, ростланадиган коэффицентлар бўйича чизиклилик, иккинчидан, очизикли фаоллаштириш функцияларининг барча параметрларини маълум усулларга мувофиқ олдиндан танлаш мумкинлиги бўлиб ҳисобланади [10]. Бўлакли-чизикли фаоллаштириш функцияларига эга бўлган чизикли параметрлаштирилган нейрон тармоқларнинг бошқа бир типи [10] да келтирилган. Умуман олганда шуни айтиш мумкинки, тармоқнинг яширин қатламларининг реал вақтда ростланадиган

коэффициентларига эга бўлган нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини таҳлил қилиш ва синтезлаш масаласи умумий ҳолатда ҳал қилинмаганлигича қолмоқда. Мазкур масаланинг долзарблиги шу билан тушунтириладики, фақат нозичли фаоллаштириш функцияларининг параметрларини ростлаш билангина ўқитиладиган кўп қатламли нейрон тармоқнинг универсал аппроксиматсиялаш хусусиятларидан тўлақонли фойдаланишни кафолатлаш мумкин. Юқорида санаб ўтилган ишларнинг кўпчилигида динамик объектнинг моделида ёки параметрик, ёки функционал ноаниқлик бор деб фарз қилинган. Ташқи ғалаёнлар шароитларида бундай объектларни бошқариш масаласи кўриб чиқилмаган.

Юқорида қайд қилиб ўтилганидек, статик нейрон тармоқлардан динамик нейрон тармоқларга ўтишнинг сабаби тармоқни ростлаш ва динамик объектни бошқаришни бир вақтда бирлаштириш, шунингдек тармоқни реал вақтда ростлаш алгоритмида бошқариладиган объектнинг динамикасини ҳисобга олиш зарурлиги бўлиб ҳисобланади. Бундай ғояни амалга оширишга хатонинг тезкор тескари тарқалиш алгоритми – СБП алгоритм мисол бўлиб хизмат қилиши мумкин [19,20]. Уни яратиш учун адаптив бошқариш назариясининг тезкор градиент алгоритми база бўлиб хизмат қилган. $u = b^T x$ (b – ростланадиган параметрлар вектори) бошқариш алгоритмини тармоқ томонидан амалга ошириладиган алгоритм билан алмаштириш ва ВР усулни ҳисобга олиш билан тармоқнинг ростланадиган вазн коэффициентлари бўйича бошқариш критерийсининг ҳосилаларини очиш билан – бошқариладиган объектнинг динамикасини ҳисобга олиш билан тармоқнинг вазн коэффициентларини ростлаш

алгоритмини олағиз. СБП алгоритм яққол тарзда бошқариладиган объектнинг параметрлари ва структурасига боғлиқ бўлади. Бошқариш тизимининг структура схемаси 1.7-расмда келтирилган.



1.7-расм. СБП алгоритмли бошқариш тизими

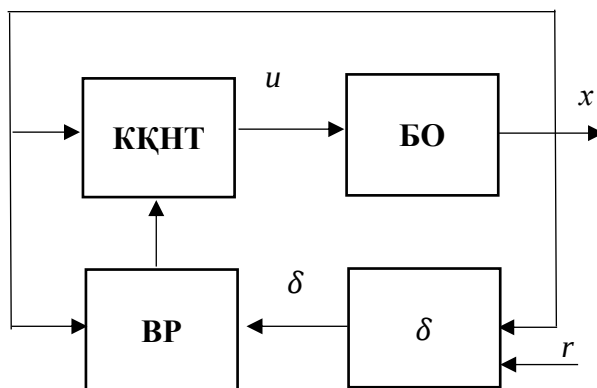
Тармоқнинг оптималлаштириш масалаларини ҳал қилиш – ВР алгоритми билан (1.2) ўқитиш функционалини минималлаштириш қобилияти юқорида қайд қилиб ўтилди. Тармоқни ўқитиш функционалининг аргументи сифатида унинг аргументи ўз навбатида e бошқариш векторининг хатоси бўлиб ҳисобланадиган δ умумлаштирилган хатонинг функциясини бериш билан тармоқнинг J функционални минималлаштириш қобилиятидан фойдаланамиз. Тармоқни ўқитиш функционалида бошқариладиган объектнинг ҳолат векторини ҳисобга олиш тармоқнинг коэффицентларини ростлаш ва динамик объектни бошқариш жараёнларини мувофиқлаштиришни таъминлайди. Нейрон тармоқни ростлаш учун стандарт ВР алгоритмдан фойдаланиш бошқариш алгоритмини ҳисоблашнинг мураккаблигининг ортишига олиб келмайди. Одатда [19,20,21] δ умумлаштирилган хато сифатида

$$\delta = Ke = 1 \cdot e + k^{(1)}\dot{e} + \dots + k^{(n-1)}e^{(n)},$$

$$K^T = (1, k^{(1)}, \dots, k^{(n-1)}), \quad e = \text{col}[e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}].$$

чизиқли шаклдан фойдаланилади.

Бундай бошқариш тизимининг структура схемаси 1.8-расмда келтирилган, ўқитиш алгоритми эса прогнозли ВР алгоритм (ВРР) номини олган.



1.8-расм. x ҳолат векторидан фойдаланадиган КҚНТ ли бошқариш тизими.

ВРР алгоритмда бошқариладиган объект тўғрисидаги ўлчаш маълумотларидан фойдаланиш бу алгоритмга адаптивлик хусусиятларини таъминлайди. Унинг камчилиги δ умумлаштирилган хатонинг функцияси берилганда K нинг параметрлари матричасини танлаш қоидасининг йўқлиги бўлиб ҳисобланади. Бу ишлар сериясида объектнинг моделининг тенгламалари параметрик охиригача аниқланмаган деб тахмин қилинган.

Келтирилган шарҳ динамик объектларни бошқариш учун кўп қатламли нейрон тармоқларидан фойдаланиш бўйича адабиётларда учрайдиган асосий йўналишлар ва ғояларни ўз ичига олади. Хатонинг тескари тарқалиши бўйича стандарт ўқитиш алгоритмлари битта асосий камчиликка эга: уларда динамик объектнинг ҳолати тўғрисидаги жорий маълумотлар ҳисобга олинмайди. Ростлаш алгоритмларининг параметрларини танлаш усули йўқ ва бошқариш масаласига мос келувчи тармоқни ўқитиш хатоларини шакллантиришга яққол етарлича эътибор қаратилмайди. Нейрон

тармоқни ўқитиш усулидан қатъий назар (босқичма-босқич ёки реал вақтда) одатда нейрон тармоққа қандайдир бир “эталон” бошқаришни амалга ошириш вазифаси юкланади, бу бошқаришни ночизиқли динамик тизимларни аналитик синтезлаш усуллари билан олиш мумкин.

1.5 -§. Ночизиқли динамик тизимларни аналитик синтезлаш усуллари

нинг шарҳи

Кейинги ўн йилликларда ривожланишга эга бўлган ночизиқли бошқариш тизимларини синтезлаш усуллари

нинг кенг аналитик шарҳи Я.З.Цыпкин ва Г.Замес нинг хотирасига бағишланган маърузада келтирилган [20]. Бу ишдан келиб чиқиш билан динамик тизимларни ночизиқли синтезлашнинг қуйидаги асосий йўналишларини ажратиш мумкин:

1. Интеграторни тескари айланиб ўтиш усули технологияси асосида динамик тизимлар учун Ляпунов функцияларини конструкциялаш. Мазкур усул билан синтезланган тизим ўтиш жараёнларининг сифатига қўйиладиган аддитив кўзғатувчиларга нисбатан мустақиллик, берилган функционалнинг оптималлиги ёки объектнинг моделида ноаниқликларнинг маълум бир синфи учун адаптивлик каби турли талабларга жавоб бериши мумкин [20]. Бироқ бундай ечим интеграторни тескари айланиб ўтиш усули доирасида фақатгина динамик тизимларнинг моделларининг етарлича тор синфи учун олинган (пастки учбурчак шаклидаги дифференциал тенгламалар тизими билан тақдим қилинадиган моделлар).

2. Мазкур камчиликни компенсациялаш ва улар учун Ляпунов функцияларини қадамли синтезлаш мумкин бўлган тизимлар синфини кенгайтириш мақсадида интеграторларни тўғри айланиб ўтиш усуллари (Ляпунов форвардинг) [11] ва тизимлар дизайнининг

нестедсатуратион усули таклиф қилинган. Бу усуллар уларнинг моделлари юқориги учбурчак шаклидаги дифференциал тенгламалар тизими билан тақдим қилинадиган динамик тизимларни синтезлашга йўналтирилган.

3. Координаталарни ночизикли қайта шакллантиришлар усули, ночизикли нисбий даража ва нолли динамика концепциясига асосланади [10]. Мазкур ёндашувнинг асосий ғояси динамик тизимнинг асосий моделини қандайдир бир эквивалент кўринишга келтириш, сўнгра эквивалент модель учун бошқаришларни синтезлашдан иборат. Кўриб чиқиладиган ночизикли динамик тизимни чизикли кўринишга келтириш энг кенг тарқалишга эга бўлган (аниқ чизиклаштириш масаласи). Маълумки [10], бу масала фақатгина ночизикли динамик тизимларнинг тор синфи учун ечимга эга.

4. Пассив ва пассивлашган тизимларни синтезлаш усуллари [22,23]. Интеграторни айланиб ўтиш усулидан фарқли ўлароқ бу технология рекурсив бўлмаган характерга эга. У гамильтон тизимларини синтезлаш, шунингдек нолли киришда барқарор бўлган динамик объектларни асимптотик турғунлаштириш масалаларида кенг қўлланилишга эга бўлган. Олдинги учта ёндашувлар синтезланадиган тизимнинг минимал-фазалилик хусусиятига асосланган [24,25]. Мазкур усул бундай чеклашдан холи. Бундан ташқари, 1-3 усуллардан фарқли ўлароқ, пассив тизимларни турғунлаштириш усуллари объектнинг моделининг тенгламаларини ёзиш шаклига кам боғлиқ бўлади. Шунини таъкидлаймизки, пассив тизимлар чиқиш бўйича манфий тескари боғланиш қанчалик кичик бўлсаям асимптотик турғунлаштиришга йўл қўяди.

5. Ляпунов назорат қилувчи функциялари (ЛНҚФ) усули [7,26]. Мазкур усулнинг ғояси олдинги тўртта усулдан тубдан фарқ қилади:

1-4 ёндашувларда аввал қандайдир бир бошқариш қонуни ҳисобланади, сўнгра эса берк тизим учун Ляпунов функцияси таклиф қилинади. Охирги усул тескари тахмин қилишдан келиб чиқади, ЛНҚФ – масалан, керакли ҳаракат модели учун Ляпунов функцияси маълум бўлади, сўнгра бу функция ва объектнинг моделининг дифференциал тенгламаларининг ўнг қисмлари бўйича турғунлаштирувчи бошқариш қонуни конструкцияланади. Асимптотик турғунлаштириладиган тизим учун ЛНҚФ нинг мавжуд бўлиши зарурий ва етарли характерга эга бўлади. Бу усулнинг уни амалиётда кенг қўллашни қийинлаштирадиган асосий камчилиги ЛНҚФ ни танлаш муаммоси бўлиб ҳисобланади.

Мураккаб нозизиқли объектларни бошқариш тизимларини конструкциялашнинг шарҳга кирмаган замонавий ғоялари орасидан [27], афтидан, бор-йўғи синергетик бошқариш назарияси ва агрегатланган нозизиқли ростлагичларни аналитик конструкциялаш усулини (АРАК) ажратиб кўрсатиш мумкин [28]. Бу усулнинг асосий ютуқлари, биринчидан, синтезлаш концепциясининг объектнинг моделининг дифференциал тенгламалар тизимининг ўнг қисмларига боғлиқ бўлмаган умумийлиги, иккинчидан, техник нуқтаи-назардан қўл келадиган ва бошқариладиган тизимнинг табиий хусусиятларини ҳисобга олишни таъминлайдиган бошқаришларни амалга оширишга йўналтирилганлик бўлиб ҳисобланади. Мазкур усулнинг камчилиги умуман олганда ёпиқ бошқариш тизимининг асимптотик барқарорлик хусусиятини аналитик асослашнинг йўқлиги бўлиб ҳисобланади, шунингдек усулнинг муаллифи томонидан синтезланган тизимнинг ташқи ғалаёнлантирувчи таъсирлар бор бўлганда ўзини қандай тутиши таҳлил қилинмаган.

Маъруза [20] да чизиқли тизимларни синтезлаш усулларининг

шарҳидан ташқари динамик моделларни синтезлаш ва таҳлил қилишнинг асосий “ҳосил қилувчи” концепцияларининг шарҳи ҳам келтирилган. Маърузада бундайлар қаторига юқорида санаб ўтилганларда 3- ва 5-ёндашувлар, шунингдек Виллемс бўйича диссипатив тизимлар назарияси [24] киритилган, у Ляпунов бўйича барқарорлик концепциясининг давоми бўлиб ҳисобланади. 1-5 синтезлаш процедураларида Виллемс бўйича диссипатив тизимлар назариясининг натижаларидан фойдаланиш очик динамик тизимларни (яъни ташқи киришга эга бўлган тизимларни) таҳлил қилишни амалга ошириш имконини беради. Диссипатив тизимларнинг кенг тарқалган турларидан бири ҳолат векторига нисбатан барқарор бўлган тизимлар бўлиб ҳисобланади (ХВК, инглизча инпут-то-статестабле) [27].

Ночизикли динамик объектларни бошқариш масаларида нейрон тармоқлардан фойдаланишга 1.3 – 1.4 пунктларда келтирилган кўпчилик мисолларда ўқитиладиган нейрон тармоққа ёки бошқариш қонунини, ёки унинг алоҳида таркибий қисмларини аппроксиматсиялаш вазифаси қўйилган, бунда бошқаришнинг ўзи 1-5 усуллар бўйича ҳисобланган. Худди шу ёндашувдан асос сифатида АРАК усулини олиш, унинг учун олдиндан барқарорликни аналитик асослашни бажариш, шунингдек ташқи ғалаёнланларнинг ушбу усул бўйича олинадиган ечимга таъсирини тадқиқ қилиш билан ҳам фойдаланиш мумкин (охирги масала учун ХВК тизимлар назариясининг натижаларидан фойдаланиш мумкин).

Муаллифнинг (жумладан бошқа муаллифлар билан биргаликда) ишларида [12,29,30] умуман нейрон тармоқли бошқариш тизимларини [31] ва хусусан адаптив бошқариш тизимларини синтезлашга бўлган синергетик ёндашув таклиф қилинган. Бу ёндашув ўзининг конструктив қисмида агрегатланган ростлагичларни аналитик

конструкциялаш усулидан фойдаланган. Санаб ўтилган ишларнинг асосий натижалари [32] китобда ва И.Ю. Тюкиннинг Монографиясида [33] келтирилган. Бу ишларда кўп қатламли нейрон тармоқларни танланадиган макроўзгарувчилар асосида шаклланадиган хато бўйича ўқитиш нейрон тармоқ ўқитиш жараёни давомида (синаптик боғланишларнинг вазн коэффицентларини ростлаш) чизиқли объектни унда “ҳамроҳлик қилувчи” функционалларнинг аргументлари сифатида худди ўша макроўзгарувчилардан фойдаланиладиган АРАК усули асосида аналитик конструкцияланган оптимал бошқариш функциясига яқин келадиган бошқариш функциясини шакллантириши мумкинлиги кўрсатилган. Бунда, бунинг оқибати сифатида нейрон тармоқдан динамик объектни реал вақтда ростланадиган (онлайн режимида) бошқариш контурида фойдаланилган ҳолатда объектни бошқаришнинг оптимал функциясини аналитик бериш талаб қилинмайди. Айнан ана шу хусусият нейрон тармоқли бошқаришнинг мақсадга мувофиқлиги ва афзаллигини белгилайди. Нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлаш учун АРАК усулидан фойдаланишнинг бошқа натижалари қаторида олинган АРАК нинг қўлланилувчанлик шартлари, АРАК усули бўйича синтезланган оптимал бошқариш қонунларининг мавжуд бўлиш шартларини кўрсатиш мумкин. Санаб ўтилган натижалар билан тўлдирилган АРАК усулига бошланғич объект тўғрисида худди ўша бошланғич маълумотлар, бошланғич шартлар, мақсадлар ва танланган макроўзгарувчиларда ўқитиладиган нейрон тармоқли тизимнинг аналитик прототипи сифатида қараш мумкин. Агар очизиқли объектлар синфи учун оптимал бошқариш қонунларини синтезлаш масаласининг аналитик ечими мавжуд бўлса, у ҳолда ўқитиш алгоритмида худди ўша макроўзгарувчини қўллаш

билан ўқитиладиган кўп қатламли нейрон тармоқ оптимал бошқариш қонунининг функциясини шакллантиради. Бу хулоса кўп қатламли нейрон тармоқни кўп ўлчовли нозизиқли объектларда ростлагич сифатида қўллашга асос сифатида қабул қилинган. Нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлаш масаласида тизимни аналитик синтезлаш, сўнгра компьютерда амалга ошириш масаласи танланган нейрон тармоқни умумлаштирилган ўқитиш хатоси сифатида макроўзғарувчиларни ёки макроўзғарувчиларнинг функцияларини қўллаш билан ўқитиш масаласи билан алмаштирилади.

Бироқ бу хулоса бир қатор ҳозирча ўз ечимини топмаган янги масалаларни ҳам қўяди.

Биринчидан, худди АРАК усулидаги каби, нейрон тармоқли тизимларни синтезлаш масаласида объектнинг қабул қилинган моделига боғлиқ равишда, айтиқса ташқи ғалаёнлавнтирувчилар бор бўлганда, макроўзғарувчиларни асосланган танлаш муаммоси кўндаланг бўлади.

Иккинчидан, кўп қатламли нейрон тармоқларнинг тармоқнинг деярли ҳар қандай функцияни (жумладан зарурий оптимал бошқариш функцияларини) шакллантириш қобилиятини асослайдиган универсал аппроксиматсиялаш хусусияти тармоқнинг яширин қатламларини ростлашга боғлиқ бўлади. Бироқ уларни ростлаш масаласи нозизиқли параметрлаштирилган бўлиб ҳисобланади ва шу сабабли ростлаш функционалини минималлаштириш масаласи кўпэкстремал бўлиб ҳисобланади ва оптималлаштириш масаласининг ечими ягона бўлмаслигига олиб келади. [36] ишда масалани ечишга нисбатан умумий планда параметрлар бўйича қавариқ бўлмаган нозизиқли масалаларни ечиш ёндашуви таклиф қилинган, бироқ бу ёндашувни кўп қатламли нейрон тармоқларни ўқитадиган мос келувчи

алгоритмларни синтезлашга татбиқ қилишга ҳозирча иш бориб етгани йўқ.

Замонавий кўп ўлчовли нозичиқли объектларни бошқариш назариясида синергетик бошқариш назариясининг ғояларини нейрон тармоқли тизимларга тарқатиш истиқболли йўналиш бўлиб ҳисобланади. Иккита тушунча – синергетика ва нейроинформатика концепцияларининг “иттифоқи” ўқитиладиган кўп қатламли нейрон тармоқлар асосида динамик бошқариш тизимларини структуравий синтезлаш усулини яратиш учун назарий асос бўлиб хизмат қилиши мумкин.

1.6 -§. Тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари

Монография ишининг мақсади ўлчанмайдиган ташқи ғалаёнланлар шароитларида параметрик жиҳатдан охиригача аниқланмаган кўп ўлчовли нозичиқли динамик объектлар синфини тўғри таъсирли нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини сунъий нейрон тармоғининг яширин қатламларининг коэффициентларини ростлаш билан синтезлаш алгоритмини ишлаб чиқиш бўлиб ҳисобланади.

Қўйилган мақсадга эришиш ишда синергетик бошқариш назарияси, тизимнинг ҳолат векторига нисбатан барқарорлик усули, сингуляр ғалаёнланлар усули ва динамик тизимларда тўғри таъсирли кўп қатламли нейрон тармоқларни ўқитиш хатосининг тескари тарқалиш усулидан умумий фойдаланиш асосида амалга оширилади. Нейрон тармоқни ўқитиш алгоритмида бошқариладиган объектнинг жорий ҳолати тўғрисидаги маълумотлардан фойдаланилади. Бу маълумотларнинг мазмуни бошқариш тизимининг функционал вазифаларининг таркибига, шундан келиб чиққан ҳолда,

синтезланадиган структуранинг таркибига бевосита таъсир кўрсатади. Бунинг учун қуйидаги вазифаларни ҳал қилиш зарур бўлади:

- ночизикли динамик объектларни нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмларининг ривожланишини тизимли таҳлил қилиш;

- агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш усулидан фойдаланиш билан очиқ тизимларни турғунлаштириш процедурасини киритиш ва асослаш;

- олинган бошқаришнинг энергияни тежаш функцияларини кафолатлайдиган макроўзгарувчиларни синтезлаш процедурасини олиш;

- ташқи ғалаёнлар таъсири мавжуд бўлганда параметрик жиҳатдан охиригача аниқланмаган ночизикли аффин бошқариш объектлари синфи учун нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимини синтезлаш усулини олиш;

- нейрон тармоқнинг яширин қатламларининг реал вақтда ростланадиган коэффициентларига эга бўлган адаптив бошқариш тизимларида ўтиш жараёнларининг яқинлашувчанлик шартини аниқлаш.

- Нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларининг амалий қиммати уларнинг ноаниқлик шароитида ҳам берилган сифат кўрсаткичларини таъминлаш қобилияти билан белгиланади. Бу эса, бевосита, тизимдаги ўтиш жараёнларининг яқинлашувчанлик (конвергенция) хусусиятига боғлиқ. Яқинлашувчанлик деганда, объектнинг ҳақиқий ҳолатининг берилган эталон траекториясига ёки мақсадли тўпламга интилиши ва нейрон тармоғи оғирлик

коэффициентларининг оптимал қийматларга яқинлашиши тушунилади. Ушбу жараённинг кафолатланганлигини таъминлаш тизимнинг ишончлилиги ва самарадорлигининг асосий шарти ҳисобланади.

– Реал вақтда ишловчи тизимларда нейрон тармоғининг яширин қатламлари коэффициентларини ростлаш бир вақтнинг ўзида иккита мураккаб динамик жараёни амалга оширади: объектни бошқариш ва тармоқни ўқитиш. Бу жараёнларнинг ўзаро таъсири тизимда кутилмаган ҳаракатларга, масалан, параметрларнинг тебранишига ёки беқарорликка олиб келиши мумкин.

– Юқорида санаб ўтилган вазифаларнинг ҳал қилиниши нозичлиқли динамик объектларни нейрон тармоқли адаптив бошқариш алгоритмларини ишлаб чиқиш имконини беради, бу сунъий нейрон тармоғининг яширин қатламларининг коэффициентларини ростлаш ҳисобига бошқаришнинг сифатини ошириш ва жараённинг кечишининг технологик режимларини турғунлаштириш имконини беради.

Боб бўйича хулосалар

Нозичлиқли динамик объектларни нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини синтезлаш алгоритмларининг ривожланиши тизимли таҳлил қилинди. Таҳлил натижалари мавжуд усулларнинг афзалликлари ва камчиликларини аниқлаш ҳамда уларни такомиллаштириш йўллари белгилаш имконини берди.

Агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш усулидан фойдаланиш асосида очик тизимларни турғунлаштириш процедураси ишлаб чиқилди ва назарий жиҳатдан асосланди. Бу

процедура бошқарув тизимининг дастлабки структурасини шакллантиришда муҳим қадам бўлиб, кейинги синтез жараёнлари учун замин яратади.

Синергетик бошқариш назарияси принципларидан фойдаланиб, олинган бошқаришнинг энергияни тежаш функцияларини кафолатлайдиган макроўзгарувчиларни синтезлаш процедураси ишлаб чиқилди. Ушбу процедура бошқарув тизимининг оптималлигини ва ресурс тежамкорлигини таъминлашга хизмат қилади.

Ўлчанмайдиган ташқи ғалаёнлар таъсири мавжуд бўлганда параметрик жиҳатдан охиригача аниқланмаган нозизиқли аффин бошқарув объектлари синфи учун тўғри таъсирли нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимини синтезлаш усули ишлаб чиқилди. Усул сунъий нейрон тармоғининг яширин қатламлари коэффицентларини бошқариш жараёнига параллел равишда ростлаш орқали объектнинг номаълум динамикаси ва ташқи таъсирларга мослашиш имконини беради.

II- БОБ. КЎП ҚАТЛАМЛИ НЕЙРОН ТАРМОҚЛАРДАН ФОЙДАЛАНИШ БИЛАН НОЧИЗИҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИ СИНТЕЗЛАШ

Монография ишининг мазкур бобида ночизиқли динамик тизимларни нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлашнинг асосий босқичлари таклиф қилинади [34]. Синтезлаш процедураси давомида ҳал қилинадиган масалалар рўйхати ифодаланади ва уларни ҳал қилиш йўллари аниқланади.

Қуйида кўриб чиқиладиган назариянинг асосида тизимнинг — агрегатланган макроўзгарувчиларнинг ўзини қандай тутиши тўғрисидаги макромаълумотлардан фойдаланиш билан оптимал синергетик бошқариш қонунларини синтезлаш концепцияси ётади [28], бу макроўзгарувчилар ёрдамида бошқариш тизимининг ҳолатлар кенглигида зарурий инвариант структуралар берилади. Оптимал синергетик бошқариш тизимларини синтезлашнинг калит ғояси синтезланадиган тизимларнинг ҳолатлар кенглигига олдиндан зарурий ост хилма-хилликларни киритиш бўлиб ҳисобланади, уларда объектнинг табиий хусусиятлари бошқариш масаласининг талаблари билан мувофиқлаштирилади, бу тизимда жараёнларнинг табиий кечишига минимал аралашиш талабининг бажарилишига кўмаклашади, бу талаб мақсадга эришиш учун “минимал бошқариш” зарурлиги талабига эквивалент бўлади [35]. Бошқариш тизимларини синтезлашга бўлган бу ёндашувнинг асосий ғоясини тизимнинг фаза кенглигида бошқаришнинг берилган мақсадларига жавоб бера оладиган ички диссипатив структураларни дунёга келтирадиган ички ўзаро таъсирлашиш кучларини шакллантириш ва қўзғатиш сифатида таърифлаш мумкин.

2.1-§. Кўп қатламли нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлаш босқичлари

Умумий ҳолатда нейрон тармоқли бошқаришнинг структураси ва алгоритмларини синтезлаш тармоқнинг архитектураси, ўқитиш функционали ва бошқаришнинг мақсадини танлаш, тизим учун кенгайтирилган дифференциал тенгламалар тизимини тузиш, умумлаштирилган ўқитиш хатосини танлаш ва ўқитиш/бошқариш алгоритмларини синтезлашни ўз ичига олади [34,36,37].

Нейрон тармоқдан фойдаланиш билан динамик объектни бошқариш тизимини структуравий синтезлаш жараёни қуйидаги ҳисоблаш босқичларини бажаришдан ташкил топади:

1) бошқариладиган объектда жараёнларнинг талаб қилинадиган сифатини тавсифлайдиган y чиқиш функциясини аниқлаш, $y = 0$ динамик тизимнинг зарурий асимптотик ўзини тутишини белгилайди;

2) δ ўқитиш ва бошқаришнинг умумлаштирилган хатоси функциясини шакллантириш;

3) нейрон тармоқли бошқариш тизимининг хусусиятларини бошқариш назарияси позицияларидан (жараёнларнинг турғунлиги, сифат кўрсаткичлари) таҳлил қилиш ва нейрон тармоқнинг параметрлари ҳамда уни ўқитиш алгоритмларини коррекциялаш.

Бу босқичларнинг ҳар бирининг умумий тавсифини тузамиз.

Биринчи босқичда бошланғич маълумотларни тайёрлаш амалга оширилади, масаланинг расмий тасвирланиши берилади. Нейрон тармоқли бошқариш тизимини синтезлаш учун зарур бўладиган

бошланғич маълумотларга бошқариладиган объект, нейрон тармоқнинг математик моделлари ва бошқаришнинг мақсади киради.

Объектнинг математик модели $u \in R^m$ бошқарувчи таъсирлар ва киришга олиб келинган ва тўғридан-тўғри ўлчаб бўлмайдиган $v \in R^m$ ғалаёнларнинг таъсири остида $x \in R^n$ ҳолат векторининг вақтда ўзгаришини аниқлайдиган ҳолат тенгламалари кўринишида ёзилади. $y \in R^m$ ҳолат вектори функциясини ўлчаб бўлади деб тахмин қилинади. Келгусида бошқариш бўйича чизиқли дифференциал тенгламалар тизими билан тасвирланадиган Σ бошқариш объектлари синфини кўриб чиқиш билан чекланамиз:

$$e : \begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)[u + v], \\ y = \Psi(x), \end{cases}$$

бу ерда узлуксиз ва маҳаллий $f(\cdot), G(\cdot)$ Липшицев функциялари параметрларнинг қийматларига қадар аниқлик билан аниқланган. Σ тизимнинг моделида ўлчаб бўлмайдиган ғалаёнларнинг борлиги тизимнинг очиқ тизим эканлигини билдиради. Бу тизимни асимптотик турғунлаштириш талаб қилинади.

y чиқиш функциясининг (агрегатланган макроўзгарувчининг функциясининг) амплитудаси тизимнинг траекториясининг объектнинг ҳолатлар кенглигида зарурий ост хилма-хилликлардан четлашишини тавсифлайди деб тахмин қилинади. Бу таг хилма-хилликка чиқиш v халақит берувчи бўлмаганда Σ тизим учун глобал асимптотик барқарорликни билдиради, ҳар қандай $v \in L_1^m$ чегараланган ғалаёнлантирувчи учун эса траекторияларнинг энг чекка чегараланганлиги кафолатланади. бошқариш қонуни бу таг хилма-хилликка инвариантлик ва аттрактивлик хусусиятларини

таъминлайди. Бу ҳолда нейрон тармоқ ростлагичини ростлаш жараёнида чиқиш функциясининг қийматини минималлаштириш билан ғалаёнлар бор бўлганда Σ тизимни асимптотик турғунлаштиришни таъминлаш мумкин.

Бошқарувчи таъсир эса объектнинг ҳолат векторининг функцияси бўлиб ҳисобланади:

$$u = F(x, w),$$

бу ерда $w \in R^N$ – вазн коэффициентларининг вектори, $F: R^n \times R^N \rightarrow R^m$ – кўп қатламли нейрон тармоқнинг кириш-чиқиш айлантиришини акс эттирувчи силлиқ функция. Монография ишида ўқитиш алгоритми градиент алгоритмлар синфидан танланган:

$$\dot{w} = -\gamma \nabla_w Q(x, w),$$

бу ерда γ – нейрон тармоқни ростлаш коэффициенти, ўқитиш жараёнининг тезлигини белгилайди, $Q = Q(\delta)$ – δ умумлаштирилган хатонинг функциясидан маҳаллий мақсад функционали, бошқаришнинг ва бир пайтнинг ўзида тармоқни ростлашнинг мақсадини беради. Агар бунинг акси кўрсатилмаган бўлса, у ҳолда Монография ишида бу функционал квадратик функционаллар синфидан қабул қилинган:

$$Q(x, w) = 0.5 d(x, w)^T d(x, w) .$$

Φ функциянинг тури, шунингдек градиент алгоритмлар синфида ўқитиш алгоритмини танлаш бўйича асосларни [38,39] да топиш мумкин.

Кирувчи ва чиқувчи сигналларнинг ўлчамини ҳисобга олиш билан тармоқнинг қатламларининг тахминий сони, қатламдаги базавий элементларнинг сони ва ҳар бир элемент учун синаптик боғланишлар векторининг ўлчами аниқланади. Тармоқнинг синаптик

боғланишларнинг вазн коэффициентларининг бошланғич шартлари берилади.

(x, w) кенгайтирилган ҳолатлар кенглигида нейрон тармоқли бошқариш тизимининг биргаликдаги тенгламалар тизимини ёзамиз:

$$w \leftarrow -\gamma (C_w d(x, w))^T d(x, w);$$

$$x \leftarrow f(x) + G(x)[u + v];$$

$$y = \Psi(x),$$

$\tilde{x} = \text{col}[w, x]$ деб белгилаймиз, шунда бу тенгламалар тизимини қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\begin{cases} \delta \leftarrow a(x) + b(x)d + c(x)v, \\ y = \Psi(x), \end{cases}$$

$$\alpha(\tilde{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ f(x) + G(x)F(x, w) \end{pmatrix}, \beta(\tilde{x}) = \begin{pmatrix} -\gamma(\nabla_w \delta(x, w))^T \\ 0 \end{pmatrix}, \chi(\tilde{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ G(x) \end{pmatrix}.$$

Бу нозичли тенгламалар тизими, янги бошқариш функцияси – δ умумлаштирилган ўқитиш хатоси бўйича аффин бўлиб ҳисобланади.

Иккинчи босқичда нейрон тармоқни ўқитиш алгоритми учун зарур бўладиган δ умумлаштирилган хатонинг функцияси шакллантирилади. Умумлаштирилган хатонинг функциясини танлаш тармоқни ўқитиш ва бошқаришнинг мақсадига эришиш жараёнларининг бирлаштирилиши билан шартланган. Равшанки, бу функция бир томондан бошқаришнинг мақсадини ўз ичига олиши, иккинчи томондан, синаптик боғланишларнинг вазн коэффициентларини ростлашга яққол кўринишда боғлиқ бўлиши лозим. Бу δ хатонинг функциясининг аргументлар кўплиги умумлаштирилган шайланадиган объектнинг кенгайтирилган

тизимининг фаза кенглигининг таркибий қисмларидан ташкил топиши лозимлигини билдиради. Нейрон тармоқли бошқариш ушбу мақсад учун $y = \Psi(x)$ чиқиш функцияларидан фойдаланишни кўзда тутди.

Шунда бошқариш $d(x, w) = d(y(x), y(x)) \dots y^{(k)}(x, w)$ бўлади – бу Σ тизимни чиқиш ва унинг ҳосилалари бўйича бошқаришдир. Бу бошқаришни синтезлаш масаласининг ўзига хос хусусияти шундан иборатки, тизимни фақатгина x ўзгарувчилар қисми бўйича асимптотик турғунлаштириш зарур бўлади. $\tilde{x}$ ҳолат векторининг w таркибий қисми бўйича бор-йўғи траекторияларнинг энг чекка чегараланишини таъминлаш талаб қилинади. Σ дифференциал тенгламанинг ўнг қисмининг мураккаб нозикли характери ва тўғридан-тўғри ўлчаб бўлмайдиган ϵ ғалаёнларнинг борлиги мазкур масалани ечиш йўлидаги қўшимча тўсиқ бўлиб ҳисобланади, бу δ ни бошқаришни ҳисоблаш учун маълум нозикли тизимларни аналитик синтезлаш усуллари қўллашни қийинлаштиради.

Учинчи босқичда биринчи иккита босқични бажариш натижасида олинган тизимнинг ишлаш қобилиятини текшириш амалга оширилади. Коррекцияланадиган параметрларга қуйидагилар киради: тармоқнинг қатламларининг сони, қатламдаги базавий элементларнинг сони, тармоқнинг вазн коэффициентларининг бошланғич қийматлари, умумлаштирилган хато функциясининг тури, Γ тармоқни ростлаш коэффициентлари матрицаси.

Барча юқорида айтилганларга мувофиқ қуйидаги вазифалар доирасини ҳал қилиш зарур бўлади:

- 1-босқичда киритилган талабларга жавоб бера оладиган y чиқиш функцияларини танлаш процедурасини таклиф қилиш,

бошқариладиган объектнинг ўзининг ҳаракатларига “минимал” аралашиш зарурлиги талабини бажариш мақсадида бу чиқишнинг модификациясини аниқлаш;

- δ умумлаштирилган хато функциясининг (Σ тизимни янги бошқаришнинг) турини таклиф қилиш ва синтезланган тизимда бошқаришнинг мақсадига эришилганини асослаш, нейрон тармоқнинг параметрларини танлаш бўйича тавсияларни таклиф қилиш.

2.2-§. Нейрон тармоқли бошқаришнинг ўзига хос хусусиятлари

Агар бу қонунлар сунъий нейрон тармоқлардан фойдаланиш билан, авваламбор тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоқларидан фойдаланиш билан автоматик бошқариш тизимида амалга оширилса — динамик объектларни бошқариш қонунларига қўйиладиган махсус талабларни кўриб чиқамиз.

Сунъий нейрон тармоқларининг, хусусан, тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоқларининг (ТТКҚНТ) автоматик бошқариш тизимларига интеграцияси бошқарув қонунларини шакллантиришга принципиал жиҳатдан янгича ёндашувни тақозо этади. Анъанавий бошқарув усулларида фарқли ўлароқ, нейрон тармоқлари асосидаги бошқарув қонунлари ўз ичига олган мураккаб нозичли трансформациялар, ўрганиш қобилияти ва мослашувчанлик хусусиятлари туфайли ушбу қонунларни ишлаб чиқиш ва амалга оширишда қатор махсус талабларни ҳисобга олиш зарурати пайдо бўлади. Бу талабларни шартли равишда учта асосий гуруҳга бўлиш мумкин: функционал-структуравий, динамик-барқарорлик ва ҳисоблаш-амалий талаблар.

1. Функционал-структуравий талаблар

Мазкур талаблар нейрон тармоғининг тузилиши ва унинг бажарадиган функционал вазифаси билан бевосита боғлиқдир.

Универсал аппроксимация талаби. Бошқарув қонуни объектнинг нозичли динамикасини, тескари боғланишни ва зарурий ҳисоблашларни ифодадай олиши керак. Нейрон тармоғи эса, назарий жиҳатдан, ҳар қандай узлуксиз функцияни аппроксимациялаш қобилиятига эга. Бироқ, бу қобилиятни амалда рўёбга чиқариш учун тармоқ архитектураси (қатламлар сони, ҳар бир қатламдаги нейронлар сони) етарли даражада мураккаб бўлиши лозим. Архитектурани танлаш бошқарилувчи объектнинг мураккаблигига ва бошқарув қонунига қўйиладиган аниқлик талабларига мос равишда амалга оширилиши зарур.

Генерализация (умумлаштириш) қобилияти. Нейрон тармоғи фақат ўқитиш маълумотларида мавжуд бўлган ҳолатларда эмас, балки умумий ҳолатда ҳам тўғри бошқарув сигналларини ишлаб чиқариши керак. Яъни, тармоқ ўқитиш жараёнида учрамаган, аммо шу синфга мансуб бўлган кириш сигналларига ҳам мос равишда жавоб бера олиши лозим. Бу хусусият, айниқса, реал вақтда ишлайдиган тизимларда, объектнинг ҳолати турли хил бўлиши мумкин бўлган шароитларда муҳим аҳамият касб этади. Генерализация қобилиятининг етарли эмаслиги (переобучение) бошқарув тизимининг ишдан чиқишига олиб келиши мумкин.

Модуллиқ ва интеграциялашувчанлик. Нейрон тармоқли бошқарув қонуни одатда тизимнинг бошқа қисмлари (фильтрлар, баҳоловчилар, хавфсизлик блоклари) билан узвий боғлиқ ҳолда

ишлайди. Шу сабабли, ишлаб чиқиладиган қонун мавжуд тизим архитектурасига осон интеграцияланадиган ва керак бўлганда модификацияланадиган (масалан, янги қатламлар қўшиш, нейронлар сонини ўзгартириш) бўлиши талаб этилади.

2. Динамик-барқарорлик талаблари

Нейрон тармоғининг бошқарув контурига киритилиши тизимнинг динамик хусусиятларига бевосита таъсир кўрсатади. Бу эса қатор динамик талабларни келтириб чиқаради.

Барқарорлик кафолати. Нейрон тармоғи нозичли элемент бўлгани учун, уни ўз ичига олган ёпиқ контурли тизимнинг барқарорлигини кафолатлаш мураккаб масаладир. Анъанавий чизикли усуллар бу ерда тўлиқ қўлланилмайди. Шу сабабли, бошқарув қонунини синтез қилишда Ляпуновнинг бевосита усули, гипертўғри юзалар усули ёки пассивлик назарияси каби нозичли тизимлар таҳлили усулларидадан фойдаланиш зарур. Бошқарув қонуни тизимнинг барқарорлигини кафолатлайдиган тарзда ишлаб чиқилиши лозим.

Робастлик (мустаҳкамлик). Бошқарув қонуни объект параметрларининг ўзгаришига, ташқи ғалаёнларга ва нейрон тармоғининг аппроксимация хатосига нисбатан кам сезувчан бўлиши керак. Яъни, тизим турли хил ноаниқликлар шароитида ҳам ўзининг иш қобилиятини ва сифат кўрсаткичларини сақлаб қолиши лозим. Бу, айниқса, амалиётда объектнинг тўлиқ математик модели мавжуд бўлмаган ҳолатларда муҳимдир.

Яқинлашувчанлик тезлиги. Адаптив тизимларда нейрон тармоғининг параметрлари реал вақтда ростланади. Бу ростлаш жараёнининг тезлиги (яъни, параметрларнинг оптимал қийматларга

яқинлашиш тезлиги) тизимнинг умумий ишлаб чиқариш қобилиятига таъсир кўрсатади. Яқинлашув жуда секин бўлса, тизим тез ўзгарувчан муҳитга мослаша олмайди. Шу сабабли, бошқарув қонуни ва ўқитиш алгоритми биргаликда мақбул яқинлашув тезлигини таъминлаши зарур.

3. Ҳисоблаш-амалий талаблар

Реал вақтда ишловчи тизимлар учун нейрон тармоқли бошқарув қонунларига қуйидаги амалий талаблар қўйилади.

Ҳисоблаш самарадорлиги. Нейрон тармоғи орқали бошқарув сигналини ҳисоблаш жараёни (тўғри тарқалиш) бошқарув циклининг вақт оралиғи (такт частотаси) доирасида бажарилиши керак. Бу, айниқса, юқори тезликдаги тизимларда муҳимдир. Шу сабабли, тармоқ архитектураси (қатламлар ва нейронлар сони) мавжуд ҳисоблаш ресурсларига мос равишда танланиши лозим. Айрим ҳолларда, нейрон тармоғини ихчамлаштириш (pruning) ёки квантлаш усуллари қўлланилиши мумкин.

Ўқитишнинг реал вақтда амалга оширилиши. Агар тармоқни онлайн режимида ўқитиш назарда тутилган бўлса, ўқитиш алгоритми (масалан, тескари хатони тарқатиш) ҳам бошқарув цикли доирасида бажарилиши керак. Бу эса қўшимча ҳисоблаш ресурсларини талаб қилади ва алгоритмнинг оптималлаштирилган версияларидан фойдаланиш заруратини туғдиради.

Дастигий ва аппарат таъминоти билан мослик. Ишлаб чиқилган нейрон тармоқли бошқарув қонуни амалий тизимда қўлланиладиган контроллерлар (микроконтроллерлар, DCP, FPGA) ва дастурий воситалар билан мос келиши керак. Кўпгина замонавий платформалар

нейрон тармоқларини жойлаштириш учун махсус оптимлаштирилган библиотекалар (TensorFlow Lite для микроконтроллеров, ONNX ва бошқалар) билан таъминланган.

[40,41] да кўрсатилганидек, кўп қатламли нейрон тармоқ танланган ихчам кўпликда ҳар қандай узлуксиз функцияни берилган аниқлик билан аппроксиматсиялаши мумкин. Аппроксиматсиялаш аниқлиги яширин қатламда танланган нейронлар сони, кўпликнинг ўлчами ва аппроксиматсияланадиган функциянинг шаклига боғлиқ бўлади.

Расман бу қуйидагини англатади. Айтайлик, унинг модели умумий кўринишдаги

$$x \in f(x, u), \quad x \in X \subset \mathbb{R}^n, \quad u \in U \subset \mathbb{R}^m,$$

дифференциал тенгламалар тизими билан берилган бошқариладиган объект учун, бу ерда f функция – узлуксиз ва маҳаллий Липшицев функцияси, $u^*: X \rightarrow U$ бошқаришни турғунлаштириш қонунининг силлиқ функцияси маълум бўлсин. Бунда бошқариладиган тизим учун шундай V Ляпунов силлиқ функцияси мавжуд бўладики, бунда " $x \in X$ " учун

$$\underline{a}(|x|) \leq V(x) \leq \bar{a}(|x|), \quad L_{f(x, u^*(x))} V(x) \leq -\underline{a}(|x|)$$

бўлади. Бу ерда $\bar{a}$, $\underline{a}$ баҳолар функцияси K_Γ ва $a \in O_K$ га тегишли, бу функциялар Ляпунов функцияларининг танланган синфига чегаралашларни белгилайди.

Айтайлик энди $u^*(x)$ функция эталон бошқариш қонуни сифатида танланган бўлсин ва

$$u(x) = u^*(x) + e(x, w^*),$$

кўп қатламли нейрон тармоқни қўллаш билан аппроксиматсияланган бўлсин, бу ерда $w^* \in W \subset \mathbb{R}^n$ — нейрон тармоқнинг шайланган коэффициентларининг вектори, $\varepsilon: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \otimes \mathbb{R}^m$ — унинг учун $\forall x \in X, w \in W$ бўлганда

$$|\varepsilon(x, w^*)| \leq \delta_\varepsilon$$

шарт бажарилган аппроксиматсиялаш хатосининг функцияси, бу ерда δ_ε — олдиндан берилган аппроксиматсия аниқлиги, $|\cdot|$ — худди аввалгидан, векторнинг Евклид меъёри. Шунини таъкидлаймизки, аппроксиматсия хатосининг чегараланиши $(w - w^*)$ ўқитилган нейрон тармоқ учун фақатгина берилган $X \times W$ кўпликда кафолатланади. Тизимнинг траекторияси бу кўпликдан чиққанда аппроксиматсия хатосининг функцияси чексиз ўсиши мумкин, Шу сабабли тизимнинг ε сабабли ғалаёнлантирилган траекториясининг $X \times W$ кўпликка тегишлилигини таҳлил қилиш зарур бўлади.

Тизимни u^* бошқариш учун B Ляпунов функцияси мавжуд бўлиши сабабли, [42] га мувофиқ, $\bar{\delta}_\varepsilon > 0$ нинг қандайдир бир шундай қиймати мавжуд бўладики, бунда $X \times W$ кўпликда ҳар қандай $\delta_\varepsilon \leq \bar{\delta}_\varepsilon$ аппроксиматсиялаш аниқлиги учун " $x \in X$ бўлганда $L_{f(x, u(x, w^*))} V(x) \leq -\alpha(|x|)$ " шарт бажарилади.

Бошқача қилиб айтганда, $\bar{\delta}_\varepsilon$ аппроксиматсия аниқлигининг қандайдир бир шундай катталиги мавжуд бўладики, бунга эришилганда ўқитилган нейрон тармоқ тизимдаги жараёнларнинг зарурий сифатини таъминлайди. Бундай кўриб чиқишда тармоқни ўқитиш офф-лине режимда содир бўлади деб тахмин қилинган. Бу ҳолда бу кўпликларда аппроксиматсиялашнинг зарурий аниқлигига

эришиш учун яширин қатламда нейронлар сонини рекуррент тарзда танлаш ва ўқитиш процедурасини зарурий сон марта такрорлаш мумкин.

Энди тармоқ бошқариш жараёнига параллел равишда реал вақтда, яъни он-лине режимда ўқитилади деб тахмин қиламиз. Бу ҳолда тизимнинг траекторияси айнан қайси кўпликка тегишли бўлишини олдиндан тахмин қилиш мумкин бўлмайди. Шу сабабли $X \text{ г } W$ кўпликнинг ўрнига бу тизимнинг бутун $R^n \text{ г } R^N$ ҳолатлар кенглигини кўриб чиқиш зарур бўлади. Шундан келиб чиққан ҳолда, танланган динамик тизимни глобал асимптотик турғунлаштирадиган u^* бошқариш қонунини ҳисоблаш керак бўлади. Бундай хулосага келиш u^* бошқаришни мумкин бўлган синтезлаш усуллариининг сонига маълум бир чегаралашларни қўяди.

Шундай бошқариш топилган деб фараз қиламиз. Бу " xOR " учун

$$\underline{a}(|x|) \leq V(x) \leq \bar{a}(|x|), \quad L_{f(x, u^*(x))} V(x) \leq -\alpha(|x|),$$

хусусиятларга эга бўлган V Ляпунов функцияси мавжудлигини билдиради. Бу ерда $\bar{a}, \underline{a} \in OK_r$ ва $\alpha \in OK$ — функциялар. Шунини қайд қилиш жоизки, бу ерда биринчи тенгсизликдан V функциянинг мусбат аниқланганлиги ва унинг радиал чегараланмаганлиги хусусиятлари келиб чиқади (маҳаллий асимптотик турғунлаштириш учун бу хусусият талаб қилинмайди).

Агар бу қонун реал вақтда ўқитиладиган нейрон тармоқда амалга оширилса, худди аввалгидай

$$u(x) = u^*(x) + \varepsilon(x, w),$$

формула адолатли бўлади, бу ерда $w \in R^n$ — нейрон тармоқнинг шайланадиган коэффициентларининг вектори. Берилган ҳолатда

аппроксиматсиялаш хатосининг функцияси учун юқоридан берилган қандайдир бир баҳони таклиф қилиш мумкин эмас. Бу функциянинг хусусиятлари тўғрисида тахмин қилиш мумкин бўлган биргина нарса – унинг чегараланганлиги бўлиб ҳисобланади, яъни $e(t) = e(x(t), w(t))$ функция охириги L_T меъёрга эга бўлади. Бошқача қилиб айтганда, бу ҳолда аппроксиматсиялаш хатоси $d_\varepsilon = +\Gamma$ бўлади. Бу умумий ҳолатда

$$x = f(x, u^*(x) + \varepsilon(t))$$

тизим $t \geq 0$ учун $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}^m$ бўлганда асимптотик турғунлигини йўқотишини билдиради. Шундан келиб чиққан ҳолда, ўқитиладиган нейрон тармоқларда бошқаришларни амалга оширишда u^* эталон бошқариш қонунидан фақатгина тизимни глобал асимптотик турғунлаштиришни эмас, балки яна бу хусусиятнинг бошқариш каналида L_T да чегараланган аддитив халақит берувчига нисбатан қўполлигини ҳам талаб қилиш зарур бўлади. $t \geq 0$ учун $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}^m$ бўлганда бундай бошқариш қонуни тизимнинг глобал асимптотик турғунлигини кафолатлаши, ғалаёнлантирувчи нолдан фарқли бўлганда эса x бўйича траекторияларнинг чегараланганлигини таъминлаши лозим.

Бу амалда динамик тизимнинг унинг ташқи боғланишларини ҳисобга олмайдиган бошланғич консерватив моделининг ўрнига динамик тизимнинг унинг киришига олиб келинган мумкин бўлган ташқи таъсирларни ҳисобга оладиган очик моделини турғунлаштириш зарурлигини билдиради:

$$\dot{x} = f(x, u + v),$$

бу ерда $v: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ – ташқи ғалаёнлантирувчи – ўлчаса бўладиган ва деярли ҳамма жойда чегараланган вақт функцияси.

Барча юқорида айтилганлар асосида қуйидаги хулосаларга келиш мумкин.

1) Динамик тизимнинг очик моделини киришга олиб келинган ташқи таъсирларнинг векторини ҳисобга олиш билан кўриб чиқиш талаб қилинади, бу турғунлаштириш масаласининг формулировкасини ўзгартиришни ва бундай турдаги тизимларни синтезлаш ва таҳлил қилишнинг янги концепцияларини қўллаш зарурлигини билдиради.

2) $u^*(x)$ сифатида глобал асимптотик турғунлаштирадиган бошқариш қонунини танлаш зарур.

Бундай очик ночизиқли кўп боғланишли динамик тизимларни синтезлаш тамойилларини ўрганиш билан синергетик бошқариш назарияси шуғулланади, унинг мазмуний асосини агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш (АРАК) усули ташкил қилади.

Бундай очик динамик тизимдаги жараёнларни таҳлил қилиш учун диссипатив тизимлар назариясининг натижаларидан [42,43], янаям аниқроқ қилиб айтадиган бўлсак – “ҳолат векторининг киришига нисбатан барқарор тизимлар” (инпут-то-статестабле) (ХВКНБТ) назариясининг натижаларидан [43] фойдаланиш қулай бўлади.

2.3 - §. Агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш усулини қўллаш билан ҳолат вектори киришининг турғунлик масаласи

Бошқариш тизими термодинамик маънода очик бўлиб ҳисобланади ва у орқали энергия, модда ёки бизнинг ҳолатимизда –

тегишли манбадан келадиган информатсия оқиб ўтади деб фараз қилинади. Бундай информатсияни конструктив ташувчилар – синтезланадиган бошқаришлар, деструктив ташувчилар эса – ғалаёнлар бўлиб ҳисобланади. Шу сабабли бундай тизимда бошқариш масаласи кенгайтирилган тизимнинг таркибий қисмлари ўртасида ўз-ўзидан ташкил бўлиш жараёнларининг вужудга келишини таъминлайдиган ўзаро ҳаракатлар алгоритмини шакллантириш масаласи сифатида қўйилади. Бундай алгоритм $Q(d)$ функционалнинг минимуми шартида кўп қатламли нейрон тармоқни ўқитиш жараёнида шакллантирилади, бу ерда δ – бир пайтнинг ўзида ўқитиш ва бошқаришнинг умумлаштирилган хатоси. Тизимнинг структураси ва хусусиятлари бу хатонинг мавжуд ўлчаш информатсиясига боғлиқ равишда шаклланиш усули билан ҳам, $Q(d)$ функционални танлаш билан ҳам белгиланади.

Бошқариладиган ўз-ўзидан ташкил бўлиш хусусияти тизимнинг фаза кенглигини динамик декомпозициялашда намоён бўлади, бунинг оқибати мақсад таг хилма-хилликлари – ночизикли тизимларнинг фаза кенглигида уларга яқин бўлган фаза траекториялари уларга тортиладиган ва уларда қоладиган аттракторлар, тагкўпликларнинг ҳосил бўлиши бўлиб ҳисобланади. Бошқача қилиб айтганда, аттракторлар – ночизикли тизимнинг ҳолатлар кенглигидаги тортувчи инвариант тагкўпликлардир. $t = t_0$ да инвариант тагкўплик билан умумий нуқтага эга бўлган ҳар қандай траектория барча $t \in t_0$ лар учун тўлиғича унга тегишли бўлади.

Динамик тизимларнинг хатти-ҳаракатини таҳлил қилишда уларнинг фаза фазосидаги тортувчи тўпламлар – аттракторлар муҳим

ўрин тутати. Чизиқли тизимларда тизимнинг асимптотик хатти-ҳаракатини ифодаловчи махсус нуқталар (масалан, турғун фокус, турғун тугун) аттрактор вазифасини ўтайди. Бундай тизимларнинг фаза фазоси нисбатан содда тузилишга эга бўлиб, барча траекториялар мазкур махсус нуқтага интилади.

Ночизиқли тизимларда эса вазият тубдан ўзгаради. Уларда аттракторларнинг шакллари ва турлари анча мураккаблашади ҳамда ранг-баранг бўлади. Чизиқли тизимларга хос бўлган махсус нуқталардан ташқари, ночизиқли тизимларда қуйидаги аттрактор турлари учрайди:

Чизиқлар ва гиперюзалар. Баъзи ночизиқли тизимларда траекториялар мувозанат нуқтасига эмас, балки маълум бир чизиқ ёки гиперюза (кўп ўлчовли сирт) бўйлаб интилади. Бундай аттракторларга мисол сифатида Ван дер Поль осциллятордаги лимит циклни келтириш мумкин.

Лимит цикллар (чегаравий цикллар). Бу ёпиқ траектория бўлиб, унга яқиндан бошланган траекториялар вақт ўтиши билан шу ёпиқ траекторияга ўралади. Тебранувчи жараёнлар, масалан, маятникнинг сўнмас тебранишлари лимит циклга мисол бўла олади.

Торлар (torus). Бир нечта частотали даврий тебранишлар мавжуд бўлганда, аттрактор тор кўринишини олади. Бундай ҳаракат квазидаврий деб аталади.

Ғалати аттракторлар (strange attractors). Ночизиқли тизимларнинг энг мураккаб ва қизиқарли кўринишларидан бири бу — ғалати аттракторлардир. Улар детерминатсияланган тизимлардаги тартибсиз (хаотик) ҳаракатни ифодалайди. Ғалати аттракторлар иккита муҳим

хусусиятга эга: биринчидан, улар геометрик жихатдан фрактал тузилишга эга, яъни уларнинг ўлчови каср сон билан ифодаланади; иккинчидан, улардаги ҳаракат дастлабки шартларга ўта сезгир бўлади (капалак эффекти). Лоренц тизими ғалати аттракторга эга бўлган машҳур мисолдир.

Ушбу аттракторларнинг барчаси инвариант тўпламлар ҳисобланади. Инвариантлик деганда, агар тизимнинг дастлабки ҳолати шу тўпламга тегишли бўлса, унинг кейинги барча ҳолатлари ҳам шу тўпламда қолади, деган маънони англатади. Ночизикли дифференциал тенгламаларнинг тортувчи инвариант тўпламларга (аттракторларга) мос келувчи ечимлари бутун бир ечимлар синфининг асимптотик хатти-ҳаракатини ифодалайди. Бошқача айтганда, турли хил бошланғич шартлардан бошланган траекториялар вақт ўтиши билан мана шу аттракторга "тортилади" ва унинг атрофидаги ҳаракатни такрорлайди.

Мураккаб ночизикли тизимларнинг фаза фазоси битта эмас, балки бир нечта турли хил аттракторларни ўз ичига олиши мумкин. Бундай ҳолат кўплаб (кўп аттракторли) тизимлар деб аталади. Тизимнинг қайси аттракторга интилиши унинг бошланғич шартларига боғлиқ бўлади. Бошланғич шартларни ўзгартириш орқали тизимни бир аттрактордан бошқасига "ўтказиш" мумкин. Бу хусусият бошқарув назарияси учун катта аҳамиятга эга, чунки у тизимнинг иш режимини мақсадли равишда ўзгартириш имконини беради.

Кўп ҳолларда, айниқса бошқарув масалаларида, тизимни фаза фазосининг координаталар бошига (нолга) олиб келиш талаб этилади. Яъни, тизимнинг барча ўзгарувчилари нолга интилиши лозим. Бунда

координаталар боши аттрактор вазифасини ўтайдиган инвариант тўплам бўлиб хизмат қилади. Бироқ, ночизиқли тизимларда координаталар бошининг тортувчилик хусусиятига эга бўлиши учун тизимнинг динамикасига фаол аралашиниш – бошқарув сигналларини киритиш зарур бўлади. Бошқарув назариясининг асосий вазифаси ҳам айнан тизимнинг фаза фазосидаги траекторияларини керакли аттракторга (масалан, берилган ҳолатга ёки траекторияга) йўналтира оладиган бошқарув қонунларини синтез қилишдан иборат. Тизимнинг эркинлик даражаларининг ўлчамини кичрайтириш билан бир хилма-хилликдан бошқасига бундай кетма-кет ўтиши синергетика позициясидан зарурий диссипатив структураларга қараб ҳаракатланиш сифатида талқин қилинади. Бундай талқин қилишда бошқариш қонуни тасвирлайдиган нуқтани $kJ n$ ўлчамли бериладиган бошланғич хилма-хилликдан кейинги $k-1$ ўлчамли хилма-хилликка, сўнгра зарурий финиш хилма-хилликкача мунтазам ўтказиш процедурасидан ташкил топади. Энг оддий процедура фаза оқимини бор-йўғи бир марта “сиқиш” дан ташкил топиши мумкин, шунда тизим берилган бошланғич шартларда ташқи бошқаришни киритиш билан зарурий хилма-хилликка ўтказилади.

Шундай қилиб, синергетик бошқариш концепцияси қуйидаги масалаларни ҳал қилиш заруратини дунёга келтиради:

Шундай қилиб, синергетик бошқариш концепцияси қуйидаги масалаларни ҳал қилиш заруратини дунёга келтиради:

а) ночизиқли тизимларнинг талаб қилинадиган хусусиятларини акс эттирадиган ва бошқариладиган объектнинг

табiiй хусусиятлари билан зиддиятга киришмайдиган таг хилма-хилликларни бериш;

б) бошқариш тизимининг ҳолатлар кенглигида шундай хилма-хилликларга эришишни кафолатлайдиган бошқариш қонунини (алгоритмини) синтезлаш;

в) эришилган хилма-хилликларда тизимнинг ҳаракатларининг барқарорлик шартлари ва ўтиш жараёнларининг сифатига қўйиладиган техник табiiй талабларининг бажарилишини таъминлаш.

2.3.1-§. Масаланинг расмий қўйилиши

Ночизиқли объектни бошқариш моделини (2.1) дифференциал тенгламалар тизими кўринишида ифодалаймиз:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + G_1(x)x_2, \quad (2.1a)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x) + G_2(x)[u + v], \quad (2.1б)$$

бу ерда $x = (x_1 M_2)$ — ҳолат вектори, $x_1 \in R^k$, $x_2 \in R^m$, $x \in R^n$, $n = k + m$, $u \in R^m$; $u \in R^m$ — бошқариш вектори; $v \in R^m$ — ташқи ғалаёнлар вектори ва $v(t)$ — ўлчанадиган ва деярли ҳамма жойда чегараланган вақт вектор функцияси (эслатиб ўтамизки, бу — объектнинг киришига олиб келинган ғалаёнлардир); $G_1(x) = [g_{11}(x), \dots, g_{1m}(x)]$, $G_2(x) = [g_{21}(x), \dots, g_{2m}(x)]$ ва $f_1, f_2, g_{11}, \dots, g_{1m}, g_{21}, g_{2m}$ вектор майдонлари барча $x \in R^n$ лар учун узлуксиз ва маҳаллий Липшицев функциялари бўлиб ҳисобланади, G_1 матрица функциянинг барча элементлари x_2 бўйича узлуксиз дифференциалланади. v вектор фақатгина ташқи муҳитнинг объектнинг динамикасига таъсирини акс эттириб қолмасдан, бошқа

динамик осттизимнинг чиқиши бўлиб ҳисобланиши ҳам мумкин, бундай осттизим сифатида, масалан, ўқитиладиган нейрон тармоқ ёки (2.1) динамик тизимнинг моделида яққол кўринишда ҳисобга олинмаган бошқа динамик осттизим чиқиши мумкин.

Олдинги параграфнинг охирида $u(x)$ ҳисобланадиган бошқаришга қўйиладиган асосий талаблар ифодаланган эди. Шу муносабат билан бу ерда (2.1) тенглама билан берилган “очиқ тизимни турғунлаштириш” тушунчасига тўхталиб ўтамиз. АРАК усулида [18] бу масала қуйидагича ечилади: ғалаёнлантирувчи таъсирнинг динамик модели маълум деб фараз қилинади, унинг тенгламалари билан бошқариладиган объектнинг тенгламалари тўлдирилади, сўнгра бу кенгайтирилган тизимда тизимни аналитик синтезлаш процедураси бажарилади. Бунда амалда очиқ тизимни “консервативлаш” содир бўлади, чунки барча ташқи боғланишлар умумий тенгламалар тизимига юкланади ва бошқа аҳамиятга молик ташқи ғалаёнлар йўқ деб тахмин қилинади. Бундан ташқари, қўзғатувчи таъсир моделининг тенгламаларининг структураси ва параметрлари маълум деб тахмин қилиш ҳар доим ҳам асосланган бўлиб чиқавермайди. Бу олинган ечимнинг киритилган чегаралашларга мувофиқлигини таъминлаш мақсадида АРАК усулининг маълум бир модификатсияси зарур бўлишини англатади. Шундай $u(x)$ бошқариш қонунини синтезлаш талаб қилинадики, бунда:

- а) ғалаёнлар бўлмаганда тизим глобал асимптотик барқарор бўлсин;
- б) агар ғалаён нолдан фарқли бўлса, у ҳолда бошқариладиган тизимнинг траекториялари энг чекка чегараланган бўлиши лозим.

Бу талабларни “тизимнинг ҳолат векторининг киришига нисбатан турғунлиги” хусусиятидан (ТХВКНБ) фойдаланиш билан ифодалаш мумкин. ТХВКНБ хусусияти берилган динамик тизим бу иккита талабга айнан жавоб беради. Динамик тизимларни шу ва унга яқин хусусиятлардан фойдаланиш билан таҳлил қилиш концепцияси Е.Д. Сонтаг томонидан таклиф қилинган.

Ҳолат векторининг киришидан турғунлаштириш (ХВК турғунлаштириш) масаласини иккита босқичга ажратиш мумкин. Биринчи босқичда (2.1) тизим учун барча $t \geq 0$ ларда $v(t) \in 0$ ҳолат учун глобал асимптотик турғунлаштирувчи қонун таклиф қилинади. Иккинчи босқичда Берк тизимга нолдан фарқли ε кириш бўйича ТХВКНБ хусусиятини кафолатлайдиган зарурий чегаралашлар киритилади. ТХВКНБ хусусиятидан фойдаланиш билан бошқариш тизимларини синтезлашнинг бошқа усуллари [22] да келтирилган.

2.3.2-§. Асимптотик турғунлаштириш масаласи

Динамик тизимнинг хусусиятларига нисбатан қуйидаги шарт бажарилган деб фараз қиламиз.

2.1-шарт. Айтайлик, (2.1a) осттизим учун шундай $a: R^k \rightarrow R^m$, $a \in C^r$ $r \geq 1$, $a(0) = 0$ вектор функция мавжудки, бунда $x_2 = a(x_1)$ ўрнига қўйишда $x_1 = 0$ нуқта (2.1a) осттизим учун Ляпунов бўйича глобал асимптотик мувозанат ҳолати бўлиб ҳисобланади, яъни қандайдир бир $\omega_1, \omega_2 \in K_\infty$, $\omega_3 \in K$ функциялар учун

$$\omega_1(\|x_1\|) \leq V_1(\|x_1\|) \leq \omega_2(\|x_1\|), \quad L_{f+a} V_1(\|x_1\|) \leq \omega_3(\|x_1\|),$$

шартларни қаноатлантирадиган V_1 Ляпунов функцияси мавжуд бўлади.

Бу шарт ички осттизимни глобал асимптотик турғунлаштирадиган бошқариш қонуни маълум деб фараз қилинишини билдиради. u қидирилаётган бошқариш қонуни кейингисини a дан интегратор орқали “кўчириб ўтказиш” билан олинади. Бу масалани ечадиган усуллардан бири сифатида интеграторни тескари айланиб ўтиш усулини кўрсатиш мумкин. Фақат шунини айтиш лозимки, қуйида келтириладиган АРАК усулига асосланадиган ёндашув интеграторни тескари айланиб ўтиш усулидан анчагина фарқ қилади.

Келтирилган 2.1-шартдан (2.1) тенгламалар тизими иккита осттизимдан - (2.1а) ички ва (2.1б) ташқи осттизимдан тузилганлиги келиб чиқади. 2.1-шартда ички осттизим учун бошқариш қонуни маълум деб фараз қилинади. Бунда x_2 координата ўзида ички бошқариш функциясини, u эса – ташқи бошқариш функциясини тақдим қилади. Ички бошқаришдан ташқи бошқаришга ўтиш талаб қилинади. Агар $u = x_3$ ва (2.1) тизим кейинги даражадаги

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + G_1(x_1, x_2)x_2;$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + G_2(x_1, x_2)x_3;$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + G_3(x_1, x_2, x_3)u,$$

тизимнинг таркибий қисми бўлиб ҳисобланса, бу процедурани рекуррент тарзда такрорлаш мумкин, энди бу ерда x_3 – ички бошқариш бўлиб ҳисобланади.

(2.1) тизим учун қуйидаги чиқиш функциясини таклиф қилиш мумкин:

$$y = \Psi(x) = x_2 - a(x_1), \quad (2.2)$$

АРАК усулида Ψ функция агрегатланган макроўзгарувчи деб аталади. (2.1) тизимнинг нолли динамикасининг ост хилма-хиллигида

$$Z = \{x : \Psi(x) = 0\},$$

тенглама билан бериладиган (2.2) чиқиш бўйича бу тизим глобал асимптотик барқарор бўлади.

2.2-шарт. (2.1) тизим (2.2) чиқиш бўйича глобал аниқланган бирлик нисбий даражага эга бўлади. Бу шарт (2.1) тизимнинг чиқиш бўйича минимал-фазалилиқ хусусиятини билдиради.

АРАК усулида бундай минимал-фазали тизимни турғунлаштириш учун қуйидаги ёндашувдан фойдаланилади. Бошқариладиган тизимнинг ҳаракатининг барча траекторияларида унинг минимумига эришиш лозим бўлган

$$J = \int_0^{\infty} \dot{\Psi}(t)^T \dot{\Psi}(t) + \varphi(\Psi(t))^T \varphi(\Psi(t)) dt, \quad (2.3)$$

ёрдамчи функционал берилади. Вариацион оптималлаштириш усуллариға мувофиқ бу Ψ функциянинг ўзгариш динамикаси (2.3) функционалнинг экстремалининг тенгламасига бўйсундирилиши лозимлигини билдиради:

$$\dot{\Psi}(t) + \varphi(\Psi(t)) = 0 \text{ учун } \forall t \geq 0, \quad (2.4)$$

Бу ерда барча $\Psi \neq 0$ ларда $\Psi^T \varphi(\Psi) > 0$. АРАК усулида қидирилаётган бошқариш қонуни (2.4) функционал тенгламанинг ечими сифатида олинади. Ҳақиқатан ҳам, (2.2) чиқиш бўйича (2.1) тизимнинг бирлик нисбий даражасини аниқлашға мувофиқ

$$\dot{y}(t) = \dot{\Psi}(t) = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \dot{x} = f_2(x) + \frac{\partial a(x_1)}{\partial x_1} (f_1(x_1) + G_1(x)x_2) + G_2(x)u$$

дифференциал тенгламада $m \times m$ ўлчамли $G_2(x)$ матрица функция барча $x \in R^n$ лар учун ўйлаб топилмаган бўлиб ҳисобланади. Шундан келиб чиққан ҳолда

(2.4) тенгламани

$$f_2(x) + \frac{\partial a(x_1)}{\partial x_1} (f_1(x_1) + G_1(x)x_2) + G_2(x)u + \varphi(x_2 - \alpha(x_1)) = 0$$

кўринишда тақдим қиламиз ва уни

$$u = -G_2^{-1}(x) \left[f_2(x) + \frac{\partial a(x_1)}{\partial x_1} (f_1(x_1) + G_1(x)x_2) + \varphi(x_2 - \alpha(x_1)) \right], \quad (2.5)$$

бошқариш қонунига нисбатан ечиш мумкин. (2.1), (2.5) тизим учун (2.4) бажарилади. Шунда, агар бу тизим тўлиқ бўлса, (2.1), (2.5) тизим (2.2) чиқиш бўйича глобал асимптотик барқарор.

(2.1), (2.5) тизим учун (2.2) чиқиш бўйича қуйидаги Ляпунов функциясини таклиф қилиш мумкин [24,72]:

$$V_2(x) = 0.5y^T y, \quad \omega'_1(|y|) \leq V_2(x) \leq \omega'_2(|y|), \quad \dot{V}_2(x) \leq -\omega'_3(|y|),$$

бу ерда $\omega'_1, \omega'_2 \in K_\infty$ и $\omega'_1(s), \omega'_2(s) = 0.5s^2$, $\omega'_3(s) = s\varphi(s)$ функциялар – мусбат аниқланган функциялардир.

Аффин нозизиқли динамик тизимни турғунлаштириш масаласини минимал-фазали чиқиш бўйича ечиш батафсил [22] да келтирилган. Шу жойда шундай натижа олинганки, унга кўра глобал минимал-фазали чиқиш бўйича тизимнинг глобал асимптотик турғунлигидан умумий ҳолатда фақатгина ҳолатлар кенглигининг координаталар бошига нисбатан маҳаллий асимптотик барқарорлик келиб чиқади.

2.1-мисол. Юқорида келтирилганларни тасдиқлаш учун қуйидагиларни илова қилиб келтирамиз. Айтайлик бошқариладиган объектнинг модели

$$\dot{x}_1 = -x_1 + (1 + x_1^2)x_2,$$

$$\dot{x}_2 = u$$

кўринишда берилган бўлсин.

$x_2 = 0$ ост хилма-хилликда бу модель $x_1 = 0$ ва $V_1(x_1) = 0.5x_1^2$ нуктада глобал асимптотик барқарор. Шундан келиб чиққан ҳолда, агрегатланган макроўзгарувчи сифатида $\Psi = x_2$ функцияни танлаш ва АРАК усули бўйича бошқариш қонунини ҳисоблаш билан бу тизимнинг нолида асимптотик турғунлаштиришни таъминлаш мумкин. Бу ҳолат учун (2.4) экстремални ёзамиз:

$$\dot{\Psi} + \varphi(\Psi) = u + \varphi(x_2) = 0,$$

бундан

$$u = -\varphi(x_2).$$

Бу ерда олинган тизимнинг R^n да тўлиқлиги талабига мувофиқлигини таҳлил қилишни тушириб қолдирамиз – бу талаб қаноатлантирилган деб фараз қиламиз. φ функция юқорида киритилган

$$x_2 \varphi(x_2) > 0 \text{ учун } \forall x_2 \neq 0 \text{ ва } \varphi(0) = 0.$$

чегаралашга жавоб беради.

Шунда

$$\dot{x}_2 = -\varphi(x_2).$$

тенглама $x_2 = 0$ нуктада бир текис глобал асимптотик барқарор мувозанат ҳолатига эга бўлади, бу

$$V_2(x_2) = 0.5x_1^2.$$

Ляпунов функциясини таҳлил қилишдан келиб чиқади.

Шундан келиб чиққан ҳолда, тизим бу мисолда $x_2 = 0$ тенглама билан берилган Z ост хилма-хилликка нисбатан глобал асимптотик барқарор бўлиб ҳисобланади. Бундан ташқари, тизимга (2.2) чиқиш бўйича глобал минимал-фазалилик хусусияти берилган. Бироқ бу тизим фақатгина ҳолатлар кенглигининг координаталар бошида маҳаллий асимптотик барқарор. Бундай деб тасдиқлаш қуйида сонли моделлаштириш мисоли билан намоёиш қилинади.

Дастлаб

$$\varphi(x_2) = x_2^3.$$

куб нозизиқлиликни ўз ичига оладиган бошқариш қонунини танлаймиз.

Бундай бошқаришнинг физикавий маъноси чизиқли бошқариш билан таққослаш, траекториянинг тасвирлайдиган нуқтасининг зарурий Z хилма-хилликдан катта четлашишида ўтиш жараёнларининг тезлашишидан ташкил топади. Қуйидаги бошланғич шартлар берилган: $x_1(0) = \sqrt{2}$, $x_2(0) = 1/\sqrt{2}$. Бу ҳолда Берк тизимнинг дифференциал тенгламаларининг ечими қуйидаги кўринишга эга бўлади: $x_1(t) = \sqrt{2t+2}$; $x_2(t) = 1/\sqrt{2t+2}$, яъни $x_1(t) = x_2(t)^{-1}$. Шундан келиб чиққан ҳолда, интеграл эгри чизиқнинг тасвирлайдиган нуқтаси Z ост хилма-хилликка қанчалик яқин келса, x_1 координата шунчалик узоқ чексизликка кетади. Равшанки, тизим тўлиқлик талабини қаноатлантиради, яъни $x(t)$ бошқариладиган тизимнинг ечими барча $t \geq 0$ лар учун аниқланади ва R^2 га тегишли бўлади.

Бошқариш функциясини танлашга кўпроқ оддий мисолни кўриб чиқамиз:

$$\varphi(x_2) = x_2.$$

Бу мисолдан кўришиб турибдики, синтезланган тизимнинг маҳаллий турғунлигининг сабаби (2.1a) осттизимнинг асимптотик барқарорлик хусусиятининг кўпол эмаслигидан иборат. Ҳақиқатан ҳам, тизимнинг нолли динамикасида таг хилма-хилликда $y = 0$ ва $x_2 = a(x_1)$ да 2.1-шарт бажарилган. Бироқ чиқиш функцияси нолдан фарқли бўлганда умумий ҳолатда (2.1a) осттизим билан нима содир бўлади? Кейинги мулоҳазалар нимаси биландир илгари динамик тизимларни нейрон тармоқли бошқаришнинг ўзига хос хусусиятларини таҳлил қилишда қилинган мулоҳазаларни такрорлайди. Агар $y \neq 0$ бўлса, у ҳолда $x_2 = a(x_1) + \Psi(x)$ бўлади, энди Ψ – (2.1a) осттизим учун ички бошқаришнинг $a(x_1)$ нинг зарурий қийматидан четлашишини тавсифлайдиган функция бўлиб ҳисобланади. 2.1-шарт тизимнинг $\Psi(t)$ амплитуда катталигига боғлиқ бўлган қандайдир бир хусусиятларини кафолатламайди. Умумий ҳолатда бу $\Psi(x)$ амплитуданинг қандайдир бир чекка қийматида (2.1a) осттизимнинг барқарор бўлмаслигини билдиради. Олдинги мулоҳазаларни такрорлаш билан $a(x_1)$ бошқариш қонуни фақатгина (2.1a) осттизимни глобал асимптоик турғунлаштириши лозимлиги билан чекланиб қолмасдан, балки яна бу хусусиятнинг бошқариш каналида мавжуд бўладиган аддитив халақит берувчига нисбатан кўполлик хусусиятини кафолатлаши лозим деган хулоса ҳам келиб чиқади. Шундан келиб чиққан ҳолда, $a(x_1)$ бошқаришдан ХВК

турғунлаштириш хусусиятини талаб қилиш, сўнгра уни бутун (2.1) тизимга кўчириб ўтказишни талаб қилиш зарур бўлади.

АРАК усули нуқтаи-назаридан бу хулоса (2.1) тизим учун бошқа агрегатланган макроўзгарувчини ёки бошқа чиқиш функциясини танлаш зарурлигини билдиради. [22] даги натижага мувофиқ, агар (2.1a) осттизимга Ψ кириш бўйича ҳолат векторининг киришига нисбатан барқарорлик хусусияти берилса, у ҳолда бутун (2.1) тизим ҳолат векторининг чиқишига нисбатан барқарор бўлади. ХВКНБ хусусияти динамик тизимларнинг минимал-фазалилик хусусиятининг қўполлаштирилган аналогини бўлиб ҳисобланади. Бу хусусиятни аниқлашга мувофиқ, тизимнинг чиқиш бўйича ҳолат векторининг киришига боғлиқ бўлмаган глобал асимптотик турғунлигидан унинг ҳолатлар кенглигининг координаталар бошига нисбатан глобал асимптотик турғунлиги келиб чиқади.

(2.1) тизим учун (2.2) чиқиш функциясини шундай модификациялаш қондасини таклиф қилиш мумкинки, бунда Z ост хилма-хилликда (2.1a) осттизимга ХВК турғунлаштириш хусусияти берилсин.

Дастлаб координаталарни қуйидагича қайта шакллантиришни (нормал шаклга қайта шакллантиришни) кўриб чиқамиз:

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \Phi(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ \Psi(x) \end{bmatrix}.$$

Бунда шунга ишонч ҳосил қилиш мумкинки, 2.2-шартда бу қайта шакллантириш глобал диффеоморфизм бўлиб ҳисобланади, (2.1) дифференциал тенгламалар тизими эса янги координаталарда қуйидаги

кўринишни қабул қилади:

$$\dot{z} = f(x) + G(z, y)y, \quad (2.6a)$$

$$\dot{y} = a(z, y) + B(z, y)[u + v], \quad (2.6б)$$

бу ерда $m \times m$ ўлчамли B матрицали функция барча $(z, y) \in R^n$ лар учун қайтар функция бўлиб ҳисобланади. (2.6a) осттизим $y = 0$ да Z таг хилма-хилликда (2.1) тизимнинг ўзини тутишининг динамикасини акс эттиради. Тизимнинг y чиқиш бўйича минимал-фазалилик хусусиятига кўра (агар 2.1-шарт бажарилган бўлса), бу баъзи бир $\omega_1, \omega_2 \in K_\infty$ функциялар учун силлиқ мусбат аниқланган ва ўзининг $V(z)$ Ляпунов функциясига эга бўлган $\dot{z} = f(z)$ тизимнинг глобал асимптотик турғунлигини билдиради:

$$\omega_1(|z|) \leq V(z) \leq \omega_2(|z|), \quad L_f V(z) \leq -\omega_3(|z|),$$

(2.6б) осттизим (2.1) тизимнинг 3 таг хилма-хилликдан четлашишининг динамикасини аниқлайди. (2.6б) тенгламага (2.5) бошқаришни ўрнига қўйиш билан (2.3) функционал учун (2.4) экстремалнинг функциясини оламиз:

$$\dot{y} = -\varphi(y),$$

Бу тизим учун y чиқиш функциясининг модификацияси шундайки, тизим $\tilde{y} = p(z, y)$ янги чиқиш бўйича ХВК турғунлаштириш хусусиятига эга бўлади ((2.6a) осттизим учун, бу эса кириш бўйича ХВК турғунлаштиришни билдиради), бу леммадан келиб чиқади.

2.1-таъриф. Айтайлик $\omega_3 \in K_\infty$ учун 2.1-шарт, ҳар қандай $z, y \in R^n$ учун 2.2-шарт бажарилган бўлсин:

$$\text{rank} \left[I_m + \frac{\partial L_{G(x,y)} V(z)^T}{\partial y} \right] = m.$$

Шунда

$$\tilde{y} = y + L_{G(x,y)} V(z)^T$$

янги чиқиш вектори (2.6а) осттизимга $\tilde{y}$ кириш бўйича ХВК турғунлаштириш хусусиятини таъминлайди.

Юқорида $\omega_3 \in K$ деб тахмин қилинган. Бироқ B Ляпунов функциясини ҳар доим $\omega_3 \in K_\infty$ бўладиган қилиб модификатсиялаш мумкин. Ҳақиқатан ҳам,

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} p(s) \omega_3(s) = +\infty,$$

шартни қаноатлантирадиган $p, p \in K_\infty$ функцияни танлаш ва

$$e(s) = \int_0^s p(r) dr,$$

қайта шакллантиришни киритиш билан бу ҳолатда $e \in K_\infty$ – худди ўша синфдаги функция эканлигини кўрсатиш мумкин. Шунда $\tilde{V}(z) = e(V(z))$ функция B функциядан мусбат аниқланганлик хусусиятини мерос қилиб олади, бундан ташқари

$$\tilde{V}(z) \leq -p(|z|) \omega_3(|z|)$$

ва $\tilde{V}$ функция (2.1а) осттизимдаги B Ляпунов функциясининг зарурий модификатсияси бўлиб ҳисобланишини оламиз. Шундай қилиб, ҳар доим, умумийликни йўқотмаган ҳолда $\omega_3 \in K$ деб тахмин қилиш мумкин.

2.1-таъриф таклиф қилинган бошқариш қонуни яққол кўринишда $\omega_3 \in K$ га эга бўлган B Ляпунов функциясига боғлиқ бўлади. Олдинги таърифга мувофиқ, агар бу шарт бажарилмаган бўлса, у ҳолда ҳар доим зарурий хусусиятлар берилган $\tilde{V}$ Ляпунов функциясига ўтиш мумкин. Динамик тизим учун бу хусусият ХВК турғунлаштиришдан келиб чиқади, бунинг тескараси эса, умумий ҳолатда, нотўғри бўлади. ХВКИБ хусусият берилган тизимлар ўзининг хусусияtlари бўйича

ХВК турғунлаштирувчи тизимларни такрорлайди, бироқ L_2 да чегараланган киришларга нисбатан такрорлайди. АРАК усулида (2.1а) осттизим учун ташқи ғалаёнлантирувчини акс эттирадиган ва бу осттизим унга нисбатан ХВКИБ бўлиб ҳисобланадиган Ψ функция ҳар доим L_2 да чегараланган бўлади, чунки (2.4) бажарилган. Шундан келиб чиққан ҳолда, агар (2.1) тизимни глобал асимптотик турғунлаштириш масаласи кўриб чиқиладиган бўлса, у ҳолда $\tilde{V}$ функцияга ўтмаслик мумкин.

Бу таърифда янги чиқиш учун (x_2 янги ички бошқариш учун) таклиф қилинган формула етарлича мавҳум, яққол бўлмаган кўринишда тақдим қилинган. Бир қатор хусусий ҳолларда ранг шартини текширишдан қочиш мумкинлигини кўрсатамиз.

Айтайлик, (2.6а) осттизим

$$\dot{z} = f(x) + G(z)y. \quad (2.6в)$$

кўринишда тақдим қилинган бўлсин ва $\tilde{y}$ учун 2.1-шарт ва 2.2-шарт бажарилган бўлсин. Шунда $\tilde{y} = y + L_{G(z)}V(z)^T$ чиқиш функцияси (2.6а) осттизимга чиқиш бўйича ХВК турғунлаштириш хусусиятини таъминлайди.

2.1-мисол (давоми). Юқорида келтирилган схема бўйича бу мисол учун расмий ҳисоблашларни амалга оширамыз: осттизим учун 3 кўпликда глобал асимптотик барқарорлик хусусиятини x_1 координата бўйича ХВК турғунлаштириш хусусиятига модификациялаймиз.

Аввал кўрсатиб ўтилганидек, мазкур функцияга $y = x_2$ чиқиш бўйича глобал минимал-фазалилик хусусияти, нолли динамиканинг $V_1(x_1) = 0.5x_1^2$ ва $a(x_1) = 0$ хилма-хиллигида Ляпунов функцияси берилган.

Шунда (2.6в) га мувофиқ, модификатсияланган бошқариш функциясини қуйидаги кўринишда тақдим қилиш мумкин:

$$x_2 = a(x_1) - L_{g_1}V_1(x_1) + \Psi,$$

бу ерда $g_1(x_1) = 1 + x_1^2$. Ли ҳосиласини очиш билан

$$x_2 = -x_1[1 + x_1^2] + \Psi$$

ни оламир.

Шуни таъкидлаймизки, бу натижани олиш учун олдин таклиф қилинган расмий процедурадан фойдаланилган. Агар бошқача ёндашувлардан фойдаланилса, Ψ агрегатланган макроўзгарувчи функциясининг бошқа вариантларини олиш мумкин. Масалан, шуни қайд қилиш мумкинки

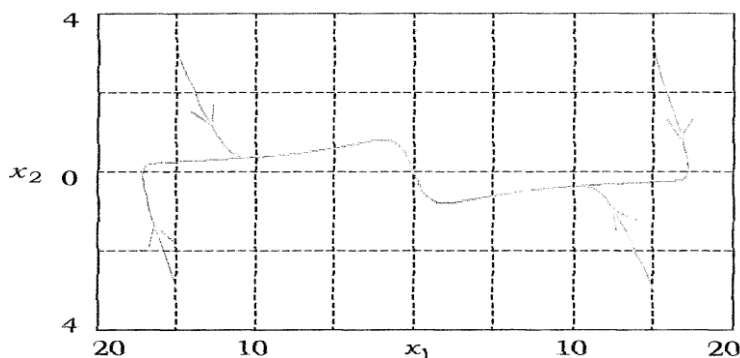
$$x_2 = \Psi - x_1$$

бошқариш осттизим учун x_1 координата бўйича ХВК турғунлаштириш хусусиятини таъминлайди. Буни текшириб кўриш учун номзод сифатида ушбу осттизим учун Ляпунов ХВКНБ функциясини танлаймиз:

$$W(x_1) = 0.5x_1^2.$$

Вақт бўйича тўлиқ ҳосила қуйидаги кўринишни қабул қилади

$$\dot{W} = -x_1^2 + x_1(1 + x_1^2) + (\Psi - x_1) \leq -x_1^2 + x_1^2(1 + x_1^2) + |x_1|(1 + x_1^2)|\Psi|.$$



2.1-расм. 2.1-мисолга интеграл эгри чизиклар (глобал асимптотик турғунлаштирилган тизим).

Охирги тенгсизликдан

$$|\Psi| \leq x_1 \rightarrow \dot{W} \leq -x_1^2.$$

эканлиги кўриниб турибди, шундан келиб чиққан ҳолда, W - Ляпунов ҲВКНБ функцияси. Бошланғич тизим $\Psi = x_1 + x_2$ чиқиш бўйича ҲВКНБ бўлиб ҳисобланади.

Олинган чиқиш бўйича тизимнинг глобал асимптотик турғунлигини таъминлайдиган (2.5) ташқи бошқариш қонунини ёзамиз:

$$u = -\varphi(x_2 + x_1) + x_1 - (1 + x_1^2),$$

бу ерда $\varphi(\Psi) = 5\Psi$ деб танлаймиз. Бошқариладиган тизим учун интеграл эгри чизиклар 2.1-расмда келтирилган. 2.1-таърифда олинган янги чиқиш вектори бўйича (2.1) тизим (2.6) кўринишдаги глобал аниқланган нормал шаклга эга бўлади:

$$\dot{z} = \tilde{f}(z) + \tilde{G}(z, \tilde{y})\tilde{y} \quad (2.7a)$$

$$\dot{\tilde{y}} = \tilde{a}(z, \tilde{y}) + \tilde{B}(z, \tilde{y})[u + v] \quad (2.7b)$$

Бу ерда $m \times m$ ўлчамли B матрицали функция барча $(z, y) \in R^n$ лар учун қайтар функция бўлиб ҳисобланади (агар 2.2-шарт бажарилган бўлса).

АРАК усули бўйича синтезланган бошқариш қонуни (2.1) тизимни унинг чиқиши бўйича глобал асимптотик турғунлаштиради, бу ҲВКНБ хусусиятини ҳисобга оладиган бўлсак – тизимни ҳолатлар кенглигининг нолига нисбатан глобал асимптотик турғунлаштириш билан эквивалент бўлади.

Айтайлик 2.2-шарт бажарилган бўлсин ва (2.7a) осттизимга ҲВКНБ ёки ҲВКИБ хусусияти берилган бўлсин, шунда

$$u = -\tilde{B}(z, \tilde{y})^{-1}[\tilde{a}(z, \tilde{y}) + \varphi(\tilde{y})] \quad (2.8)$$

бошқариш қонуни $v=0$ да (2.7) тизимнинг ҳолатлар кенглигининг координаталар бошини глобал асимптотик турғунлаштиришни таъминлайди.

Шу билан (2.1) тизимни глобал асимптотик турғунлаштириш масаласини ечилди деб ҳисоблаш мумкин. Агар 2.1, 2.2-шартлар ва 2.1-таъриф бажарилган бўлса, у ҳолда $\tilde{y}$ модификацияланган чиқиш векторидан y векторга ўтиш ва $x=\Phi^{-1}(z,y)$ координаталарни тескари қайта шакллантиришдан фойдаланиш билан (2.8) дан (2.1) учун қидирилаётган турғунлаштирувчи бошқариш қонунини оламыз.

2.3.3-§. Ҳолат векторининг киришидан турғунлаштириш масаласи

Бу масалани ечиш учун олдинги пунктда (2.6а) осттизимни ХВК турғунлаштириш учун фойдаланилган расмий ёндашувдан фойдаланишимиз мумкин. Бу ҳолатда мос келувчи қайта белгилашларни ҳисобга олиш билан 2.1-таъриф мутлақо адолатли бўлади.

Айтайлик, 2.2-шарт бажарилган бўлсин, (2.7а) осттизимга ХВКНБ ёки ХВКИБ хусусияти берилган бўлсин ва E – (2.8) сабабли (2.7) тизим учун Ляпунов функцияси бўлсин:

$$\bar{\omega}_1(|(z, \tilde{y})|) \leq E(z, \tilde{y}) \leq \bar{\omega}_2(|(z, \tilde{y})|), \dot{E} \leq -\bar{\omega}(|(z, \tilde{y})|), \bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega} \in K_\infty.$$

Шунда

$$u = -\tilde{B}(z, \tilde{y})^{-1}[\tilde{a}(z, \tilde{y}) + \varphi(\tilde{y})] - L_{\tilde{B}(z, \tilde{y})}E(z, \tilde{y})$$

бошқариш қонуни (2.7) тизимни v кириш бўйича ХВК турғунлаштиришни таъминлайди.

(2.8) да АРАК усули технологияси асосида олинган бошқариш қонунининг конструктив хусусиятларидан фойдаланиш билан берилган ҳолатда кичикроқ харажатлар билан ушбу бошқариш қонунини модификацияламастан зарурий натижага эришиш мумкин. Шу ўринда бу ёндашувнинг асосий ғоясини кўриб чиқамиз.

Айтайлик, (2.7а) осттизимга $\tilde{y}$ кириш бўйича ХВКНБ хусусияти берилган бўлсин. Бу қандайдир бир $\omega_1, \omega_2, a, \gamma \in K_\infty$ функциялар учун мусбат аниқланган силлиқ $V(z)$ Ляпунов ХВКНБ функцияси мавжудлигини билдиради:

$$\omega_1(|z|) \leq V(z) \leq \omega_2(|z|), \dot{V} \leq -a(|z|) + \gamma(|\tilde{y}|).$$

Қуйидаги йўл қўйилишни тўғри деб фараз қиламиз.

2.3-шарт. Барча $(z, \tilde{y}) \in R^n$ лар учун $\tilde{B}(z, \tilde{y}) = \tilde{B}$ бажарилган.

Агар бошқариш қонуни АРАК усули бўйича аниқланган бўлса, у ҳолда u чиқиш функцияси учун (агрегатланган макроўзгарувчининг функцияси учун) (2.4) бажарилади, шунда 2.3-шарт туфайли (2.7) тизим қуйидаги кўринишни қабул қилади:

$$\dot{z} = \tilde{f}(z) + \tilde{G}(z, \tilde{y})\tilde{y} \quad (2.9a)$$

$$\dot{\tilde{y}} = -\varphi(\tilde{y}) + \tilde{B}v, \quad (2.9б)$$

бу ерда фақатгина (2.9б) нинг ўнг қисмининг кўриниши ўзгарган.

Иккита ХВКНБ тизимни кетма-кет туташтириш яна ХВКНБ тизимни беради. (2.9а) осттизим $\tilde{y}$ кириш бўйича ХВКНБ бўлиб ҳисобланади, агар (2.9б) осттизим ҳам ХВКНБ бўлиб ҳисобланишини исботлашга муваффақ бўлинса, у ҳолда (2.9) тизим кетма-кет уланган иккита ХВКНБ тизимдан ташкил топади ва шундан келиб чиққан ҳолда, v кириш бўйича ХВКНБ хусусиятига эга бўлади.

Бу ҳолатда (2.9б) осттизимнинг ХВКНБ учун баъзи бир $\omega_1, \omega_2 \in K_\infty, \lambda \in K$ функциялар учун мусбат аниқланган силлиқ $W(\tilde{y})$ Ляпунов ХВКНБ функцияси мавжуд бўлади:

$$\omega_1 |\tilde{y}| \leq W(\tilde{y}) \leq \omega_2 |\tilde{y}|, \dot{W}(\tilde{y}, v) \leq -2\gamma(|\tilde{y}|) + \lambda(|v|).$$

Шунда

$$U(z, \tilde{y}) = V(z) + W(\tilde{y}).$$

(2.9б) осттизимнинг ХВКНБ хусусиятларини таҳлил қиламиз. Авваламбор шуни қайд қиламизки, $\varphi(\tilde{y}) = T\tilde{y}, T = \text{diag}[T_{i,i}] > 0$ да (2.9б) тенглама чизиқли кўринишни қабул қилади. Бу, T матрицанинг хусусиятларини ҳисобга оладиган бўлсак, в нолли киришда бу тизимнинг асимптотик турғунлигини билдиради. [48] дан маълумки, асимптотик барқарор чизиқли тизимлар аффин кириш бўйича ХВКНБ бўлиб ҳисобланади. Шундан келиб чиққан ҳолда, (2.3) ўқитиш функционалида функцияларга махсус чизиқли кўринишни бериш билан (2.9б) осттизим ва умуман (2.1) тизимнинг ХВКНБ хусусиятига эришиш мумкин. 2.3-шартда (2.1) тизимга ХВКНБ хусусиятни кафолатлаш учун яна қайси синфлардаги функциялардан фойдаланиш мумкин деган савол туғилади. Бу саволга жавобни қуйидаги леммадан топиш мумкин.

Айтайлик, қандайдир бир $k \in K_\infty$ функция учун $|\varphi(\tilde{y})| \geq k(|\tilde{y}|)$ тенгсизлик бажарилсин. Шунда (2.9б) осттизимга в кириш бўйича ХВКНБ хусусияти берилади.

Олинган натижани батафсилроқ муҳокама қиламиз. Бу параграфнинг натижаларига мувофиқ, берилган турдаги динамик тизимни ХВК турғунлаштириш масаласини чиқиш функциясини тегишлича танлаш ва сўнгра у бўйича бошқариладиган тизимни

зарурий сифат билан турғунлаштириш йўли билан ечиш мумкин. Бундай деб тасдиқлаш реал вақтда ўқитиладиган кўп қатламли нейрон тармоқдан ночизиқли динамик тизимларни асимптотик турғунлаштириш учун фойдаланиш имконини беради. Монографияда таклиф қилинаётган ёндашувда кўп қатламли нейрон тармоқларни ўқитиш алгоритмларини синтезлаш учун динамик тизимнинг ҳолати тўғрисидаги макромаълумотлардан – мазкур параграф контекстида бошқариладиган тизимнинг чиқиш функцияси сифатида талқин қилинган агрегатланган макроўзгарувчилардан фойдаланилади. Бошқариладиган тизимнинг чиқиш функцияси нейрон тармоқни ростлаш жараёнини ташкил қилиш учун фақатгина $y = \Psi(x)$ ўлчанадиган информатсиядан фойдаланиш имконини беради.

АРАК усулининг олинган модификациясининг яна бир ўзига хос хусусиятини қайд қилиб ўтиш мақсадга мувофиқ бўлади. Бу хусусият динамик тизимларни параллел туташтиришда ҳам сақланади. Шундай қилиб, тизимнинг ХВКНБ хусусияти бундай тизимларни ҳар қандай туташтириш типига нисбатан инвариант бўлиб ҳисобланади.

ХВКНБ хусусиятга мураккаб тизимларни ночизиқли синтезлаш парадигмаси ёки фалсафаси сифатида қараш мумкин. ХВКНБ концепциясидан фойдаланиш ночизиқли тизимларни эркин конфигурациялаш ва туташтириш ҳамда тизимнинг асимптотик турғунлигининг ташқи таъсирларнинг маълум бир синфларига нисбатан мустақиллигини таъминлаш, яъни очик динамик тизимларни конструктив синтезлашни амалга ошириш имконини беради.

ХВКНБ парадигма доирасида синтезланган мураккаб динамик тизим маълум бир фрактал хусусиятга эга бўлади: унинг

структурасида худди шундай ХВКНБ хусусиятларга эга бўлган осттизимлар тўпламини ажратиш мумкин. Тизимнинг бундай архитектураси қўшимча мустақиллик ва ишончилиликни дунёга келтиради, чунки унинг ижобий хусусиятлари биргина тизимнинг ўзини тутишини шакллантирадиган тескари боғланишнинг сигнали билан белгиланиб қолмасдан, балки тенг ҳуқуқли осттизимлар-ячейкалар тўплами билан ҳам белгиланади, битта осттизимнинг фаолиятининг издан чиқиши умуман бутун тизимнинг фаолият кўрсатишига сезиларли таъсир кўрсатмаслиги мумкин, бу бундай тизимларни нейрон тармоқли бошқариш учун кенг имкониятларни очади.

Чизиқли тизимларнинг ютуқларидан бири уларнинг унификатсияланганлиги (бир хиллаштирилганлиги) бўлиб ҳисобланади, чунки барча чизиқли тизимлар ягона хусусиятлар ва ўзига хосликлар тўпламига эга, уларни осон комбинатсиялаш ва бирлаштириш мумкин [34]. Ночизиқли тизимларга ўтилганда манзара ўзгаради: умумий ҳолатда ҳар бир осттизим такрорланмас ўзига хосликлар тўпламига эга бўлади. Улар катта тизим қилиб бирлаштирилганда янада мураккаброқ хусусиятлар ва тавсифлар тўплами вужудга келади. Табиатда бундай ҳолатда тартибсизлик вужудга келмайди, одам томонидан синтезланган тизимларда эса бундай эмас.

Автоматик бошқариш назариясининг ривожланишида чизиқли тизимлар алоҳида ўрин тутди. Уларнинг энг муҳим ютуқларидан бири бу – унификатсиялашганлик (бир хиллаштирилганлик) хусусиятидир. Чизиқли тизимлар, уларнинг физик табиатидан қатъи

назар (электр, механик, гидравлик ва ҳ.к.), ягона математик аппарат – чизиқли дифференциал тенгламалар, операторлар ва матрицали усуллар билан тавсифланади. Барча чизиқли тизимлар учун умумий бўлган хусусиятлар тўплами мавжуд: суперпозиция принципи, частотали характеристикалар, модал таҳлил, узатиш функциялари ва турғунлик мезонлари (Гурвиц, Найквист, Михайлов). Ушбу умумийлик туфайли, турли хил чизиқли тизимларни комбинatsiялаш, бирлаштириш ва улар учун стандарт бошқарув алгоритмларини қўллаш анча осон кечади. Масалан, ПИД-ростлагичларнинг кенг тарқалганлиги ҳам чизиқли тизимларнинг ушбу унификаtsiялашганлик хусусиятига асосланган [34].

Ночизиқли тизимларга ўтилганда эса, бу гўзал ва содда манзара тубдан ўзгаради. Ночизиқлилиқ – бу "шахсийлик" ва "ўзига хослик" оламидир. Умумий ҳолатда, ҳар бир ночизиқли тизим (ёки осттизим) ўзининг такрорланмас, фақат унга хос бўлган хусусиятлар ва ўзига хосликлар тўпламига эга бўлади. Бу хусусиятлар тизимни ташкил этувчи элементларнинг физик табиатига, ночизиқлилиқ турига (квадратик, кубик, релели, гистерезисли ва ҳ.к.), параметрларига ва бошқа омилларга боғлиқ. Натижада, чизиқли тизимлардаги каби универсал, ҳамма учун яроқли бўлган "рецептлар" ва таҳлил усуллари мавжуд эмас. Ҳар бир ночизиқли тизимга алоҳида ёндашув талаб этилади.

Муаммо бир нечта ночизиқли осттизимларни бирлаштириб, катта, мураккаб тизим ҳосил қилинганда янада чуқурлашади. Алоҳида олинган ҳар бир осттизимнинг ўзига хос ночизиқлилиқ хусусиятлари мавжуд бўлиб, улар ўзаро таъсирга киришганда, кутилмаган ва янада

мураккаброқ хусусиятлар, тавсифлар ва динамик режимлар вужудга келиши мумкин. Бу жараёнда оддийгина қўшиш принципи (суперпозиция) ишламайди, чунки ночизиқли тизимларда бутун уни ташкил этувчи қисмлар йиғиндисига тенг эмас. Осттиситемларнинг ўзаро таъсири натижасида синергетик эффектлар – умуман янги сифатлар пайдо бўлади.

Табиатдаги мураккаб тизимлар (масалан, экологик тизимлар, тирик организмлар, нейрон тармоқлари) мисолида бу жараён ажойиб тарзда намоён бўлади. Уларда юқори даражадаги мураккабликка қарамай, тартибсизлик (хаос) эмас, балки юксак даражадаги тартиблилик, мослашувчанлик ва ўз-ўзини ташкиллаштириш кузатилади. Табиий тизимлар эволюция жараёнида шундай ташкил этилганки, уларнинг қисмлари ўзаро уйғунлашган ва бутунликнинг барқарорлигини таъминлайди.

Одам томонидан синтезланган (яратилган) техник тизимларда эса вазият бошқача. Инженерлар кўпинча алоҳида, яхши ўрганилган ночизиқли элементларни бирлаштириб, мураккаб тизим яратишга ҳаракат қилади. Аммо, юқорида таъкидланганидек, ночизиқли тизимларда "бутун" унинг "қисмлари" йиғиндисига тенг эмас. Шу сабабли, лойиҳалаш босқичида олдиндан кўриб бўлмайдиган динамик режимлар – номаъқбул тебранишлар, бифуркациялар, ҳатто детерминатсияланган тартибсизлик (хаос) вужудга келиши мумкин. Бу эса тизимнинг ишдан чиқишига ёки ғавқулодда ҳолатларга олиб келиши эҳтимоли юқори.

Ушбу муаммони ҳал этиш учун замонавий бошқарув назариясида бир қанча йўналишлар мавжуд:

Синергетик бошқарув назарияси. Ушбу назария табиатдаги каби, сунъий тизимларда ҳам ўз-ўзини ташкиллаштириш ва мақсадли тортилиш (аттракторларга) жараёнларини яратиш имконини беради. Макроўзгарувчилар ва инвариантлар тушунчалари асосида тизимнинг керакли ҳолатга ўзи томон ҳаракатланишини таъминлайдиган бошқарув қонунлари синтез қилинади.

Нейрон тармоқли бошқарув. Нейрон тармоқларининг ўрганиш қобилиятидан фойдаланиб, мураккаб ночизиқли тизимларнинг ўзаро таъсирини моделлаштириш ва уларни реал вақтда бошқариш имконияти яратилади. Нейрон тармоғи тизимнинг номаълум динамикасига мослашиб, кутилмаган ҳодисаларнинг олдини олиши мумкин.

Адаптив ва робаст бошқарув. Бу усуллар тизим параметрларининг ноаниқлиги ва ўзгариши шароитида ҳам бошқарув сифатини кафолатлашга хизмат қилади. Улар орқали тизимнинг турли хил ночизиқли ўзаро таъсирларга нисбатан "қўполлиги" (робастлиги) оширилади. Бу борада ҲВКНБ хусусият ундан мураккаб ночизиқли тизимларни синтезлаш масалаларида фойдаланилганда таркиб топган вазиятдан маълум бир чиқиш йўлини беради. Умумий ҲВКНБ тизимда осттизимларни ажратиш, уларнинг ўзаро боғланишларини таҳлил қилиш ва уларни бирлаштириш, яна ҲВКНБ тизимни ҳосил қиладиган қўшимча ҲВКНБ осттизимларни синтезлаш етарли бўлади. Мураккаб ночизиқли динамик тизимларни синтезлашда ҲВКНБ парадигмадан фойдаланиш билан уларнинг элементларини унификатсияланган тақдим қилишга ўтиш мумкин. Бундай тизимнинг ичида нима борлигидан қатъий назар (қора қути!), ҲВКНБ хусусият унинг мерос

қилиб олинадиган, бундай тизимларни кўламлаштириш ва бирлаштириш имконини берадиган маълум бир тамойиллар бўйича қуршаб турувчи муҳит билан ўзаро ҳаракатларини кафолатлайди.

Шуни қайд қиламизки, тизим янги чиқиш бўйича эга бўладиган мустақил хусусиятлар бошқариш жараёнига минимал аралашин зарурлиги тамойили билан зиддиятга киришади, чунки кўполлаштириш тизимга ошиқча куч билан таъсир ўтказишни кўзда тутлади. Шундан келиб чиққан ҳолда, олинган чиқиш функциясини модификациялаш процедурасини таклиф қилиш талаб қилинади.

Боб бўйича хулосалар

1. Нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлашнинг уч босқичли процедураси ишлаб чиқилди. Ушбу процедура ташқи чегаралашлар ва тўғридан-тўғри ўлчаб бўлмайдиган ғалаёнлар мавжуд бўлган шароитда ҳам тизимнинг турғунлигини кафолатлашга йўналтирилган. Процедуранинг биринчи босқичида бошқарилувчи объектнинг динамик хусусиятлари таҳлил қилиниб, унинг нозичли модели аниқланади. Иккинчи босқичда, синергетик бошқарув назарияси принциплари асосида, макроўзгарувчилар ва инвариантлар тушунчаларидан фойдаланиб, тизимнинг керакли аттракторга (масалан, берилган ҳолатга ёки траекторияга) тортилишини таъминлайдиган бошланғич бошқарув қонуни синтез қилинади. Учинчи босқичда эса, ушбу бошқарув қонуни тўғри тарқалишли кўп қатламли нейрон тармоғи орқали амалга оширилади. Нейрон тармоғининг яширин қатламларидаги оғирлик коэффициентлари реал вақтда, объектнинг жорий ҳолати тўғрисидаги маълумотлар асосида ростланиб, тизимнинг ташқи ғалаёнлар ва параметрик ноаниқликларга

мослашуви таъминланади. Ушбу уч босқичли ёндашув мураккаб нозичиқли объектларни бошқаришда нейрон тармоқларининг имкониятларидан тўлиқ фойдаланиш билан бирга, тизимнинг кафолатланган турғунлигини таъминлаш имконини беради.

2. Аналитик конструкциялаш усулининг (АРАК) модификацияланган варианты таклиф қилинди. Агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш (АРАК) усули нозичиқли тизимлар учун самарали бошқарув қонунларини синтез қилиш имконини берса-да, унинг классик версияси кўп ўлчовли, кўп боғланишли объектлар ва ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлган мураккаб шароитларда етарли даражада самарали эмас эди. Тадқиқот доирасида АРАК усулининг модификацияланган варианты ишлаб чиқилди. Модификациянинг моҳияти шундан иборатки, унда бошқарув қонунини синтез қилиш жараёнига тизимдаги мавжуд ноаниқликлар ва ташқи таъсирларни компенсация қилиш механизми киритилган. Хусусан, нейрон тармоғининг аппроксимациялаш қобилиятидан фойдаланиб, номаълум нозичиқли функциялар ва ғалаёнларнинг моделлари аниқланади ва ушбу маълумотлар асосида АРАК усули билан синтез қилинган бошқарув қонуни коррекцияланади. Бу эса, модификацияланган усулни кўп ўлчовли, кўп боғланишли нозичиқли объектларни ташқи ғалаёнлар шароитида ҳам юқори самарадорлик билан бошқариш имконини беради.

3. Модификацияланган АРАК усули бўйича синтезланган тизимнинг асимптотик барқарорлик шартлари аниқланди. Ҳар қандай бошқарув тизимининг амалий қиммати унинг барқарорлиги билан бевосита боғлиқ. Таклиф қилинган модификацияланган АРАК усули

асосида синтез қилинган ёпиқ контурли тизимнинг асимптотик барқарорлик шартлари Ляпуновнинг бевосита усули ёрдамида таҳлил қилинди ва аниқланди. Таҳлил натижаларига кўра, тизимнинг барқарорлигини таъминловчи асосий шартлар қуйидагилардан иборат: нейрон тармоғи томонидан аппроксимацияланадиган номаълум функциялар ва ғалаёнларнинг чегараланганлиги; нейрон тармоғини ўқитиш темпининг маъқул танланганлиги (яъни, градиент тушиш қадамининг катталиги юқори чегарадан ошмаслиги); кириш сигналларининг етарли даражада қўзғатувчанлиги (persistently exciting) таъминланганлиги. Ушбу шартларнинг бажарилиши тизимдаги ўтиш жараёнларининг яқинлашувчанлигини ва тизимнинг берилган ҳолатга (масалан, координаталар бошига) асимптотик равишда интилишини кафолатлайди. Бу эса, синтез қилинган нейрон тармоқли бошқарув тизимининг назарий жиҳатдан асосланганлигини ва амалий қўлланилиш имкониятларини тасдиқлайди.

III-БОБ. АДАПТИВ НЕЙРОН ТАРМОҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМИНИНГ ТАҲЛИЛИ

Ночизиқли кўп боғланган объектнинг адаптив нейрон тармоқли бошқарув тизими мураккаб ночизиқли динамик тизим ҳисобланади. Мазкур тизимларни таҳлил ва синтез қилиш учун динамик тизимларнинг турли редукция усуллари қўллаш мумкин. Бундай усуллар қаторига мазкур бобда фойдаланилган ҳаракатларни ажратиш усули киради [36,37,38]. Таҳлилнинг мақсади бўлиб ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлганда ишлаб чиқилган адаптив нейрон тармоқли бошқарув тизимининг турғунлик хусусиятларини асослаш ҳисобланади.

3.1-§. Ҳаракатларни ажратиш усули асосида масалани ечиш

Дейлик, бошқариш объекти умумий кўринишдаги дифференциал тенгламалар тизими ёрдамида берилган бўлсин:

$$\dot{x} = f(x, u, v, \theta), x \in X, u \in U, v \in V, \quad (3.1)$$

бу ерда x – ҳолат вектори, $\dim x = n$; u – бошқариш таъсирлари вектори, $\dim u = m$; v киришга берилаётган ташқи ғалаёнлар вектори, $\dim v = m$; θ - тизимнинг ноъмалум параметрларининг вектори, $\theta \in \Omega_\theta$ ($\Omega_\theta \subset R^l$ – ихчам кичик тўплам); $f(\cdot)$ – кўрсатилган соҳада ўз аргументларини ўзгартирадиган узлуксиз ва маҳаллий липшицев векторли майдон. Номаълум параметрлари вектори θ тизимнинг моделидаги тенгламаларнинг мумкин бўлган параметрик аниқ эмаслигини акс этади, ташқи ғалаёнлар v ташқи муҳит томонидан генератсияланиши мумкин, шу билан бирга киришда инобатга олинмаган динамик осттизим томонидан генератсияланиши мумкин (3.1).

(3.1) тенглама объектнинг ҳусусий тенгламаларини ўз ичига олган ҳолда адаптив бошқариш тизимининг асосий контурининг

динамикасини белгилайди. Асосий контур ростлагичининг тенгламаси кўп қатламли нейротармоқ ёрдамида амалга оширилган:

$$u = q^{(K)} = F(x, w), \dim[w] = N, w \in W,$$

бу ерда $F(\cdot)$ – w вектор бўйича узлуксиз ва дифференциалланувчи функция.

Мослашиш контурининг тенгламаси қуйидаги кўринишда берилган:

$$\dot{w} = -\gamma \nabla Q(x, w), \gamma > 0, \quad (3.2)$$

бу ерда $Q(\cdot)$ – нейротармоқнинг ўргатиш функционали бўлиб, у узлуксиз ва ўз аргументларини дифференциалловчи функциядир. Бошқариш мақсади бўлиб траекторияни кўрсатиб берувчи нуқтани бошқариш тизимининг ҳолат фазоси $\{x, w\}$ да ғалаёнлар мавжуд бўлмаганда берилган хилма-хиллик остига $x=0$ (x ўзгарувчи жиҳатидан қисман барқарорлаш) ўтказиш, ёки силлиқ дифференциал тенгламанинг чекланган ечими бўлган ҳар қандай $v(t)$ функция учун траекторияларнинг чекланган чегараси ҳисобланади.

(3.2) формулада γ – тармоқни ўқитиш қадами, $\mu = \gamma^{-1}$ белгилаш киритамиз, у ҳолда адаптив тизим динамикасини белгиловчи (3.1), (3.2) бирлашган тизим қуйидаги кўринишга келади:

$$\dot{x} = f(x, u, v, \theta) \quad (3.3)$$

$$\mu \dot{w} = -\nabla_w Q(x, w)$$

Параметр қийматлари кичик бўлганда (3.3) тенгламалар тизими энг юқори ҳосилада кичик параметрга эга бўлади. (3.3) кўринишидаги тизимлар одатда (3.3) кўринишидаги дифференциал тенгламалар тизимини ечиш масалаларини ва сингуляр ғалаёнли дифференциал тенгламалар назариясига оид бошқа бир қатор мураккаб масалаларни

биринчи бўлиб тадқиқ этган академик А.Н. Тихонов номи бўйича тихоновча деб аталади.

Агар μ параметр кичик бўлса (ўқитиш қадами $\gamma \gg 0$), у ҳолда (3.3) тизимда ҳаракатларни ажралиш эффекти юзага келади. (3.3) да вазн коэффициентлари w ни созлаш тезлиги (3.1) бошқариш объектининг ҳусусий ҳаракатлари тезлигидан катта бўлса, у ҳолда нейротармоқли тизимда тезкор ҳаракатлар гуруҳини - кўп қатламли нейротармоқларнинг ўқитиш жараёнини ва бошқариш объектининг секин ҳаракатларини ажратиб кўрсатиш мумкин.

3.1-таъриф [2]. $\tau = t/\mu$ вақт бўйича "чўзилган" кўринишда ёзилган қуйидаги тенгламалар тизими

$$\dot{x} = 0; x = x_0;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -\nabla_w Q(x_0, w) \quad (3.4)$$

тезкор ҳаракатлар осттизим тенгламалари деб аталади.

(3.4) тенгламалар нейротармоқнинг (мослашиш контурининг) вазн коэффициентларининг ўзгаришини беради. 3.1-таърифда чекланган $0 \leq \tau \leq \tau_0$ вақт оралиғидаги ўзгариш тезлиги x чўзилган вақт τ га нисбатан μ тартибдаги катталиқ ҳисобланади деб тахмин қилинади. Шунинг учун $x(0) = x_0$ катталиқ $0 \leq \tau \leq \tau_0$ вақт оралиғида кам, яъни μ тартиб қийматидан катта бўлмаган қийматга ўзгаради, бу ердан $\mu = 0$ тахминидан (3.4) тизим келтириб чиқарилган. (3.4) тенгламалар тизими нейротармоқларни ўқитишнинг автоном алгоритми тенгламаларини белгилайди.

3.2-таъриф. Дейлик $\Omega_w = \nabla_w Q(x_0, w) = 0$ тенгламаси ёрдамида бериладиган (3.4) тезкор ҳаракатлар тизими учун $\hat{w} = \mathcal{G}(x_0)$ мувозанат

ҳолатлари тўплами бўлсин. Агар Ω_w тўпламнинг барча нуқталари изоляцияланган бўлса, яъни $\hat{w} \in \Omega_w$ нуқтанинг кичик маҳалласида $\nabla_w Q(x_0, w) = 0$ тенгламанинг бошқа илдизлари бўлмаса, у ҳолда (3.4) каби тезкор ҳаракатлар дифференциал тенгламалари тизими ечимини қидириш каби бундай масала мунтазам масала деб аталади. Агар $\nabla_w Q(x_0, w) = 0$ тенгламанинг илдизларининг изоляцияланганлик шарти бажарилмаса, у ҳолда бундай масала - критик деб аталади. Қуйида иккала масала ҳам батафсил таҳлил қилинади, биринчи навбатда, (3.4) дифференциал тенгламалар ечимларини топишнинг энг муҳим муаммоси амалий аҳамиятга эга эканлигини таъкидлаб ўтамиз.

3.3-таъриф. Тенгламалар тизими

$$\dot{x} = f(x, \hat{w}, v, \theta) \quad (3.5)$$

$$\nabla_w Q(x, \hat{w}) = 0$$

бу ерда $\hat{w} \in \Omega_w$ – (3.4) тизим учун мувозанат ҳолатларидан бирининг нуқтаси - секин ҳаракатларнинг осттизим тенгламалари деб аталади.

(3.5) тизим тезкор вақт ўқида "ўқитилган" (3.3) адаптив нейротармоқли тизимнинг ўзгариш динамикасини изоҳлайди. Шунини таъкидлаш жоизки, [41] ишларда 3.1-3.3-таърифлар (3.3) сингуляр ғалаёнли тизимлар учун ташқи ғалаёнлар вектори v мавжуд бўлмаганда киритилган ((3.3) дифференциал тенгламалар тизимининг ўнг қисмидаги яққол вақтга боғлиқлиги тахмин қилинган).

3.1.1-§. Мунтазам масала

(3.4), (3.5) редукцияланган тизимларнинг ечимларидан келиб чиққан ҳолда (3.3) дастлабки тизим ечимининг таснифи ҳақида мулоҳаза қилишга имкон берувчи А.Н. Тихонов теорамаси маълум.

Н.Н. Красков теоремаси (3.4) ва (3.5) тизим хоссаларидан (3.3) тизимларнинг ҳаракатларининг асимптотик турғунлигини кафолатловчи, етарлича бўлган шартларни шакллантиради [36]. Айтиш жоиз-ки, Красков теоремаси (3.3) дифференциал тенгламалар тизимининг ўнг томонидаги хусусий хосилаларнинг глобал чегараланганлиги ҳақидаги тахминда исботланган бўлиб, бундан ташқари, теореманинг натижаси ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлганда тизимнинг бирорта хоссасини кафолатлашга имкон бермайди. [24] ишларда ғалаёнлар мавжуд бўлган ҳолдаги сингуляр хоссалар таҳлил қилинган, аммо бу ишларда белгиланган чекловлар нейротармоқли бошқариш тизимларида бажарилмайди.

Демак, ечилаётган масала хусусиятларига мослашган (3.3) сингуляр ғалаёнли тизимнинг хоссаларини муқобил асослашни таклиф этиш лозим. Демак, бундан кейин қуйидаги шарт бажарилади деб тахмин қиламиз.

3.1-шарт. Дейлик, қуйидаги кўринишдаги шундай чиқиш функцияси мавжуд бўлсин

$$y = \Psi(x), \Psi \in C^1,$$

$\forall \theta \in \Omega_0$ учун (3.1) тизим турғун чиқиш ҳолатига тенг бўлган хоссага эга бўлсин, яъни шундай $\beta \in KL$ ва $\gamma \in K$ мавжуд-ки, барча

$t \in [0, t_{\max}(x_0, u, v)]$ лар $\forall x_0 \in R^n, \forall u \in L_{\infty}^m$ учун қуйидаги шарт бажарилади

$$|x(t, x_0)| \leq \beta(|x_0|, t) + \gamma(\|y_{[0,t]}\|)$$

Бу ерда $t_{\max}(x_0, u) \leq +\infty$ – (3.1) тизим ечимини аниқлаш интервалини беради. Турғун чиқиш ҳолати (ТЧХ) хоссаси ноль динамиканинг кўп шаклида (ҳолатларнинг ноль фазосида минимал-фазолик шартлари (яъни, $y(t) \equiv 0$ да барча $t \geq 0$ лар учун $x(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ бажарилишини)

англатади. 2-бобда (2.1) кўринишдаги модель учун чиқишдаги u функцияни танлаш усули таклиф этилган бўлиб, бундай тизим ТЧХ га эга.

Функция X (3.3) тизимда ҳаракатларни ажратиш жараёни юзага келадиган созлаш коэффиценти γ нинг қийматини тахминий баҳолаш имконини беради. 3.1-шарт (3.1) дифференциал тенгламалар тизимининг ўнг қисмидаги ноаниқликлар синфи учун чекловларни белгилайди, шу билан бирга бу шарт чиқиш бўйича (3.5) секин ҳаракатлар тизими ечимининг турғунлигини ўрнатади. Бундан ташқари, бу хоссанинг ω (идеал ечим $w = \mathcal{G}(x, v)$ ни амалга ошириш аниқлигининг) ва ташқи ғалаёнлар v нинг қўполлиги талаб қилинади.

Бу ерда, Н.Н. Красков теоремасидаги каби, етарлича кичик μ ларда (3.3) ягона ечим $x(t, \mu), w(t, \mu)$ га эга ва қуйидаги чегаравий тенгликлар ҳақиқийдир:

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} x(t, \mu) = \bar{x}(t), \text{ да } 0 \leq t \leq T,$$

$$\lim_{\mu \rightarrow \infty} w(t, \mu) = \bar{w}(t) \text{ да } 0 \leq t \leq T,$$

бу ерда $\bar{x}(t)$, $\bar{w}(t)$ – (3.5) секин ҳаракатлар тенгламалар тизимининг мос ечимлари. Бу тенгликлар шуни кўрсатади-ки, $\mu \rightarrow 0$ чегарада (3.3) масаланинг $x(t, \mu)$, $w(t, \mu)$ ечимлари келтириб чиқарилган (3.5) масаланинг $\bar{x}(\mu)$, $\bar{w}(t)$ ечимларига ўтади. Бунда (3.1) тизим v тшқи ғалаёнлар бойича ХВК хоссаларига эга бўлади.

Шакли бўйича бунга яқин исбот [37] да келтирилган, аммо, унда олинган натижа унчалик конструктив эмас ва нейротармоқли тизимларни тадқиқ этишда қўллаб бўлмайди.

Юқорида 2-бобда кўриб ўтилган динамик тизимнинг асимптотик барқарорлаш масаласининг қўйилиши ва ечими умумий ҳолда кўрсатиб берилган. Мазкур масалани нейротармоқли адаптив бошқариш доирасида, қуйидаги кўринишдаги умумлаштирилган хатолик функциясини берган ҳолда ечиш мумкин эканлигини кўрсатиб берамиз

$$\delta(x, w) = \Psi(x, w) + \varphi(\Psi(x))$$

ва квадратик синфларда нейротармоқли ўқитиш функционалини танлаймиз:

$$Q(x, w) = \delta(x, w)^T \delta(x, w). \quad (3.6)$$

Бу ерда $Q(x, w)$ функция сифатида (2.4) тенгламанинг чап томони ишлатилган. Шунини айтиш жоиз-ки, агар ўқитиш мақсадига эришилган ва $Q(x, w) = 0$ бўлса, у ҳолда (2.4) тенглик бажарилган ва натижада $t \rightarrow \infty$ да $\Psi \rightarrow 0$ бўлади. Мазкур вазият учун Ω_w тўпламини қуйидаги конструктив кўринишда ифодалаш мумкин:

$$\Omega_w = \{x, w : \nabla_w Q(x, w, t) = 0\} = \{x, w : \delta(x, w)^T \nabla_w \delta(x, w) = 0\}.$$

Ω_w тўплам хоссаларига бир қатор тахминларни киритамиз.

3.2-шарт. Дейлик, $\delta(x, w) = \delta(x, q^{(K)}(w))$ функция $\forall x \in X, q^{(K)} \in U$ учун $q^{(K)}$ бўйича узлуксиз дифференциаланувчи бўлсин, бунда $\frac{\partial \delta}{\partial q^{(K)}}$ - мусбат аниқланган матрица ва шундай $c > 0$ константа мавжудки, $\forall x \in X, q^{(K)} \in U$ учун $|\frac{\partial \delta}{\partial q^{(K)}}| > c$ бўлсин.

δ функция танланганлиги ва синтезланаётган тизимнинг нисбий даражаси бирга тенг бўлганлиги сабабли, матрица $\frac{\partial \delta}{\partial q^{(K)}}$ ҳар ерда

белгиси яққол аниқланмаган бўлади, шунинг учун 3.1-шартда фақат бу матрицанинг ишораси аниқланади.

3.3-шарт. Дейлик, $\forall x \in X, w \in W$ учун

$$\text{rank} \left[\frac{\partial \delta}{\partial w} \right] = m$$

бажарилган бўлсин.

Дейлик, нейротармоқли ростлагич сифатида чиқишдаги қатламнинг чизиқли фаоллаштириш функцияларига эга бўлган тўғри тарқалувчи кўп қатламли нейрон тармоқ ишлатилади. Бу вазиятда нейротармоқ чиқиши (бошқариш таъсири) қуйидаги формуладан аниқланади:

$$q^{(K)} = W^{(K)} q^{(K-1)} + w_0^{(K)},$$

бу ерда $w_0^{(K)}$ - чиқишдаги қатламнинг силжиш вектори, $\dim |w_0^{(K)}| = m$. 3.2-шарт бажарилганда $w_0^{(K)}$ вектори бўйича умумлаштирилган хатоликнинг функция градиентини қуйидагича ёзамиз:

$$\frac{\partial \delta}{\partial w_0^{(K)}} = \frac{\partial \delta}{\partial q^{(K)}} \frac{\partial q^{(K)}}{\partial w_0^{(K)}} = \text{diag} \left[\frac{\partial \delta_j}{\partial q_j^{(K)}} \frac{\partial q_j^{(K)}}{\partial w_{0,j}^{(K)}} \right] = \text{diag} \left[\frac{\partial \delta_j}{\partial j^{(K)}} \right].$$

3.2-шарт бўйича $\frac{\partial \delta_j}{\partial q_j^{(K)}} > 0, j > \overline{1, m}$ бажарилган, яъни

$\text{rank} \left[\frac{\partial \delta}{\partial w} \right] = \text{rank} \left[\frac{\partial \delta}{\partial w_0^{(K)}} \right] = m$ бўлади. Демак, чиқишдаги қатламнинг чизиқли фаоллаштириш функцияларига эга бўлган тўғри тарқалувчи кўп қатламли нейрон тармоқ учун 3.3-шарт 3.2-шартдан келиб чиқади.

Охирги шартдан хусусий ҳолда келиб чиқади-ки, Ω_w тўплам қуйидаги тенглама ёрдамида берилган

$$\Omega_w = \{x \in X, w \in W : \delta(x, w) = 0\}$$

ва кўп турлилик тузилмасига эга бўлади.

Умумий ҳолда 3.3-шарт (3.4) тезкор ҳаракатларнинг дифференциал тенгламаларининг ечимини излаш масаласи мунатазам эканлигини англатмайди. Ҳақиқатдан ҳам, мазкур масаланинг мунатазамлиги таърифига мос равишда, ихтиёрий $x_0 \in X$ учун

$$\delta(x_0, w) = 0$$

тенглама фақат изоляцияланган $\hat{w} = (x_0)$ илдизларга эга бўлиши мумкин.

3.1.2-§. Критик масала

Эътибор беринг, муаллифга маълум бўлган адабиётларнинг аксариятида [12,29,45,46,47] критик масаланинг таҳлили келтирилмаган. Қуйида биз ушбу масалани ечимининг бир нечта вариантини тақдим этамиз.

Шундай қилиб,

$$\nabla_w Q(x_0, w, t) = 0$$

тенгламанинг илдизлари бир-биридан изоляцияланмаган бўлсин. У ҳолда,

$$A = \frac{\partial^2 Q(x_0, \hat{w}, t)}{\partial w^2}$$

бу тенгламалар тизимининг $\hat{w} \in \Omega_w$ нуқтадаги чизиқли яқинлашиш матрицаси нольга тенг бўлган $1 \leq k \leq N$ та хусусий сонларига эга бўлади [45]. Ҳақиқатдан ҳам, $\nabla_w Q(x_0, w, t)$ вектор функциясини $\hat{w}$ нуқтанинг кичик атрофида Тейлор қаторига ёйсак, қуйидаги чизиқли тенгламани ҳосил қиламиз:

$$A[w - \hat{w}] = 0.$$

Бу тенглама ягона $w = \hat{w}$ ечимга эга, агар матрицанинг барча хусусий сонлари нольга тенг бўлмаса, ёки бошқа сўз билан айтганда, матрица ягона ҳисобланмайди. Агар A матрица ягона бўлса, у ҳолда

(3.4) тезкор ҳаракатлар тизимининг бошланғич қийматлари соҳаси w_0 га қўшимча чекловлар қўйиш талаб этилади. Бу натижани [1] кўринишида шакллантирамиз.

$\hat{w}$ нуқта атрофида $N-k$ ўлчамли Ξ турли туманлик мавжуд бўлиб, бу ерда k – нолинчи хусусий соннинг карралиси бўлиб, агар $w_0(0) \in \Xi$ танланса, у ҳолда (3.4) дифференциал тенгламалар ечимини топишнинг критик масаласи учун Ω_w тўплам Ляпунов бўйича нуқтама-нуқта бир текис асимптотик турғун бўлади.

Юқорида келтирилган натижаларини изоҳлаб ўтамиз. A матрицанинг ягона эмаслиги ва бу матрицада нолинчи хусусий каррали k матрицанинг мавжудлиги шуни англатади-ки, Ω_w тўплам $\{x, w\}$ фазодаги $N-k$ ўлчамли фазоостини ифодалайди. Бунда созланадиган w параметрлар бўйича векторнинг k координаталари бўйича динамикаси аниқланмаган.

Агар функционали (3.6) кўринишда қабул қилинса ва 3.3-шарт бажарилган бўлса, у ҳолда A матрица қуйидагича ҳисобланиши мумкин:

$$A = \frac{\partial \delta}{\partial w}.$$

Чизиқли фаоллаштириш функциялари $k = m$ га эга бўлган кўп қатламли нейротармоқ учун, фақат $w_0^{(K)}$ вектор учун (3.4) тенгламанинг ечимини излаш масаласининг мунтазамлиги шарти бажарилади.

3.4-шарт. $A = \frac{\partial^2 Q(x_0, \hat{w}, t)}{\partial w^2}$ матрица манфий ҳақиқий қисмга эга m та хусусий қийматга ва барча $x \in X, w \in W$ учун $k = N - m$ та нолинчи хусусий қийматга эга.

Таъкидлаб ўтаимиз, чизиқли фаоллаштириш функциясига эга кўп қатламли нейротармоқ учун 3.4-шартнинг бажарилиши, 3.3-шартнинг бажарилиши каби 3.2-шартдан келиб чиқади. Ҳақиқатдан ҳам, 3.2-шартга биноан $w_0^{(K)}$ вектор учун қуйидаги бажарилади:

$$\frac{\partial \delta}{\partial w_0^{(K)}} = \text{diag} \left[\frac{\partial \delta_j}{\partial w_{0,j}^{(K)}} \right] = \text{diag} \left[\frac{\partial \delta_j}{\partial q_j^{(K)}} \right]$$

бу ерда $\frac{\partial \delta_j}{\partial q_j^{(K)}}$. У ҳолда матрица A қуйидаги кўринишда ифодаланиши мумкин:

$$A = \left[\frac{\partial \delta}{\partial w_0^{(K)}} : \frac{\partial \delta}{\partial \tilde{w}} \right],$$

бу ерда $\tilde{w}$ – нейротармоқнинг барча қолган вазн коэффициентлари учун вектор. Шубҳасиз, $\frac{\partial \delta}{\partial w_0^{(K)}}$ матрицанинг ранги m га тенг.

Чизиқли алгебрадан келиб чиқадики, 3.4-шарт бажарилган вазиятда A нинг қийматларининг чизиқли акс этиш соҳаси E° ва E фазо остиларнинг, ва мос равишда m ва k ўлчамларнинг бирлашиши сифатида ифодаланиши мумкин.

Агар 3.4-шарт бажарилса, у ҳолда (3.4) тенгламалар тизими координаталарнинг ўзгартмаси билан:

$$\begin{bmatrix} w' \\ w'' \end{bmatrix} = T(w - w'), \quad TAT^{(-1)} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix}, \quad \dim[w'] = m, \quad \dim[w''] = k,$$

қуйидаги кўринишга келтирилиши мумкин

$$\dot{x} = 0; \quad x = x_0;$$

$$\frac{\partial w'}{\partial \tau} = Aw' + d_1(x_0, w'', w') \in, \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial w''}{\partial \tau} = Bw' + d_2(x_0, w'', w'),$$

бу ерда A – манфий ҳақиқий қисмга эга бўлган, хусусий қийматларга эга $(m \times m)$ ўлчамли матрица, B – барча хусусий қийматлари нольга айланган $(k \times k)$ ўлчамли матрица, d_1, d_2 силлиқ функциялар $(w', w'') = (0, 0)$ нуқтадаги ўзларининг биринчи ҳосилалари билан нольга айланади. Таъкидлаш жоизки, чизиқли фаоллаштириш функциялари $w' = w_0^{(K)}$ бўлган кўп қатламли нейротармоқ учун A, B матрицалар d_1, d_2 функциялар каби x_0 параметрга боғлиқ, шунинг учун кейинги изоҳларда бу матрицалар ва функцияларнинг бу параметрга боғлиқликларини тушириб қолдирамыз.

[30] дан кўрсатиш мумкинки, $w'' = 0$ нуқтанинг $V \in R^k$ атрофи ва $V \rightarrow R^m, \pi \in C^r, r \geq 2$ акслари мавжуд бўлсин, унда

$$S = \{(w', w'') \in R^m \times V : w' = \pi(w'')\}.$$

(3.7) учун марказий кўп турлилик бўлади.

Мазкур кўп турлиликни берувчи π акс қуйидаги шартларга жавоб беради:

$$\pi(0) = 0, \frac{\partial \pi}{\partial w''}(0) = 0,$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial w''} = [Bw'' + d_2(\pi, (w''), w'')] = A\pi(w'') + d_1(\pi, (w''), w'')$$

Охирги дифференциал тенгламани хусусий ҳосилаларини ечган ҳолда изланаётган π акс этишни топиш мукин. Шунини айтиш жоизки, бу тенглама ягона ечимга эга бўлмайди.

Шу ерда дарҳол марказий турли туманликлар назариясининг муҳимлигини тушунтирувчи натижасини келтирамыз, ечилаётган масалада, марказий турли туманлик маҳаллий инвариантлик хоссасидан ташқари яна (3.4) тизим учун маҳаллий экспоненциал турғунлик хоссасига ҳам эгадир [48].

Дейлик [48], $\zeta = 0$ нукта қуйидаги тизимнинг мувозанат ҳолати (асимптотик турғун) ҳисобланади

$$\dot{\zeta} = B\zeta + d_2(\pi(\zeta), \zeta), \quad \zeta(0) = w''(0) \quad (3.8)$$

У ҳолда $(w', w'') = (0, 0)$ нукта (3.7) тизимнинг турғун ҳолати (асимптотик турғун) ҳисобланади.

Шундай қилиб, марказий турли туманлик аппаратида фойдаланган ҳолда (3.4) тезкор ҳаракатлар осттизимсининг критик ҳолатдаги асимптотик турғунлигини асослаш мукин. Сўнгра (3.3) нейротармоқли адаптив тизим хоссаларини аниқлаш учун машҳур натижаларидан фойдаланиш мумкин.

3.2-§. Нейротармоқли бошқариш тизимининг умумий функционал схемаси

Ночизиқли динамик объектларни бошқаришнинг самарали усулларида бири бу – тўғридан-тўғри таъсирли кўп қатламли нейрон тармоқлари асосидаги адаптив бошқарув тизимлари ҳисобланади. Ушбу тизимларнинг ишлаш принципини тушуниш учун, аввало, уларнинг функционал схемасини ва ушбу схемага мос келувчи математик моделни кўриб чиқиш зарур. Умумий ҳолда, агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш (АРАК) усули билан синтез қилинган ҳамда реал вақтда ўқитиладиган кўп қатламли тўғридан-тўғри таъсирли нейрон тармоғини ўз ичига олган бошқариш тизимининг ишлаши (3.3) тенгламалар тизими билан ифодаланади. Бу тенгламалар тизими объект динамикаси, нейрон тармоғи тузилиши ва уларнинг ўзаро боғланишини акс эттиради.

3.1-расмда келтирилган нейротармоқли бошқариш тизими қуйидаги хоссаларга эга:

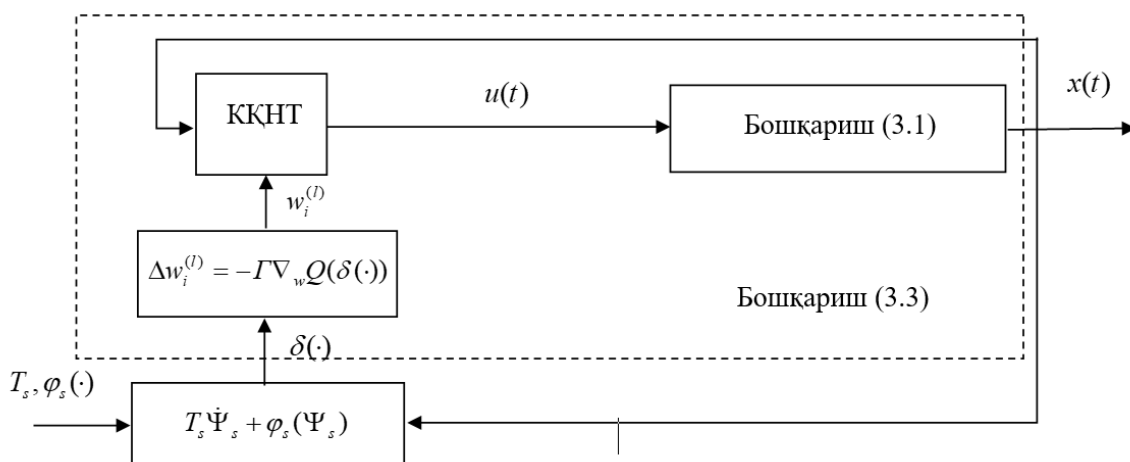
– ташқи ғалаёнлар шароитида параметрик ва функционал жиҳатдан аниқланмаган (3.1) объект траекторияларининг чекланган чегараларини таъминлайди;

– танланган (2.3) меъзонга нисбатан нуқтанинг Ω_w кўп турли туманликка нисбатан оптимал ҳаракатини ифодаловчи, кейин эса ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлмаганда - координата бошига ҳаракатни таъминлайди;

– тизимни параметрик бошқариш умумлаштирилган созланилаётган объектда сифат ва ўткинчи жараёнларнинг шаклини бериш имконини беради;

– (2.4) функционал тенгламаларнинг умумий кўринишда берилиши, бошқариш тизимининг аффин синфларида (2.3) меъзон экстремалларининг турғун остоиласининг (подсемейства) берилиши ва (2.4) тенгламаларда фақат ўлчов маълумотларидан фойдаланиш, бу ўзгаришлар талаб қилинадиган ечимнинг физик мақсадга мувофиқлигига зид бўлмаса, ечимнинг объектнинг аниқ параметрларидан ва унинг функционал структурасидаги ўзгаришларга боғлиқ эмаслигини таъминлайди.

Умумлаштирилган хатоликдан ўқитиш жараёнида кўп қатламли нейрон тармоғининг оптимал бошқариш қонунини ҳосил қилади, унинг аналитик синтези АРАК усули ёрдамида амалга оширилади (2-боб).



3.1-расм. Нейротармоқли бошқариш тизимининг умумий функционал схемаси.

Бошқариш тизимларини синтез қилишнинг кўриб чиқилган усули нейрон тармоқлардан, хусусан, критик режимларда ишлайдиган ва бошқариш объектининг ҳолатида дарҳол ва адекват жавоб беришни талаб қиладиган, аниқланмаган чизиқли кўпбоғлиқли тизимлар учун бошқариш вазифаларида фойдаланиш имконини беради. Олинган натижаларнинг асосий хусусияти ва илмий янгилиги шундан иборатки, унда умумлаштирилган мослаштирилган объектнинг тезкор қўйи тизимидаги мослашиш даврининг мувозанат ҳолатларининг мумкин бўлган изоляцияланмаганлиги (ўзаро боғлиқлиги) ҳисобга олинган. Амалиётда кўп учрайдиган ҳолатларда, тизимнинг турли хил мувозанат ҳолатлари бир-биридан алоҳида, мустақил равишда мавжуд бўлмайди. Улар ўзаро боғлиқ бўлиб, бир мувозанат ҳолатидан иккинчисига силлиқ ўтиш мумкин. Бу эса, бошқарув тизимида қўшимча талаблар қўяди, чунки у фақат битта ҳолатни эмас, балки уларнинг бутун оиласини ҳисобга олиши ва керакли ҳолатга йўналтира олиши лозим. Ушбу хусусиятни ҳисобга олиш натижасида, яширин қатламларнинг соزلанадиган коэффициентлари билан синтезланган нейрон тармоқ тизимлари турли хил иш режимларида,

жумладан, критик режимларда ҳам, ночизиқли динамик объектларни барқарорлаштиришни самарали амалга ошира олади.

Келтирилган назарий асослар ва олинган натижаларга таянган ҳолда, нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимини синтез қилиш усулини қўллашнинг асосий босқичларини қуйидагича шакллантириш мумкин:

1-босқич. Бошқарилувчи объектнинг таҳлили ва мақсадни аниқлаш.

Биринчи босқичда бошқарилувчи объектнинг динамик хусусиятлари, унинг ночизиқлилиқ даражаси, кўпбоғланишлиқ хусусияти ва таъсир этувчи ташқи ғалаёнларнинг таъсифи ўрганилади. Шунингдек, бошқарув тизими олдида қўйилган мақсадлар — объектнинг қандай ҳолатга (траекторияга) келтирилиши, бошқарув сифатига қўйиладиган талаблар (аниқлик, тезкорлик, энергия тежамкорлиги) аниқ белгилаб олинади.

2-босқич. АРАК усули асосида макроўзгарувчиларни ва бошланғич бошқарув қонунини синтез қилиш.

Синергетик бошқарув назариясининг агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш (АРАК) усулидан фойдаланиб, тизимнинг керакли аттракторга тортилишини таъминловчи макроўзгарувчилар ва уларга мос келувчи инвариантлар аниқланади. Ушбу макроўзгарувчилар асосида, объектнинг идеал (соддалаштирилган) модели учун бошланғич бошқарув қонуни аналитик шаклда ҳосил қилинади. Бу қонун кейинги босқичда нейрон тармоғи томонидан аппроксимацияланиши лозим бўлган "эталон" бошқарувни ифодалайди.

3-босқич. Нейрон тармоқ архитектурасини танлаш ва дастлабки созлаш.

Объектнинг мураккаблиги ва бошқарув қонунига қўйилган талаблардан келиб чиқиб, нейрон тармоғининг тузилиши (қатламлар сони, ҳар бир қатламдаги нейронлар сони, фаоллаштириш функцияларининг тури) танланади. Танланган архитектура бошланғич босқичда, мавжуд априор маълумотлар асосида (масалан, объектнинг тахминий модели ёки эксперт билимлари) дастлабки соланади. Бу жараён ўқитишни тезлаштириш ва дастлабки бошқарув сифатини оширишга хизмат қилади.

4-босқич. Умумлаштирилган хатолик функционалини шакллантириш.

Тизимнинг ишлаш сифатини баҳоловчи ва нейрон тармоғини ўқитиш жараёнини бошқарувчи умумлаштирилган хатолик функционали (сифат функционали) шакллантирилади. Ушбу функционал, одатда, объект ҳолатининг берилган траекториядан оғишини (хатони) ва бошқарув сигналларининг "кучини" (энергия сарфини) ўз ичига олади. Мақсад – ушбу функционални минималлаштирувчи бошқарувни топиш.

5-босқич. Нейрон тармоғини реал вақтда ўқитиш алгоритминини ишлаб чиқиш.

Тескари хатони тарқатиш (backpropagation) алгоритми ёки унинг модификацияланган вариантлари асосида, нейрон тармоғининг яширин қатламларидаги оғирлик коэффицентларини (Θ) реал вақтда ростлаш алгоритми ишлаб чиқилади. Бу алгоритмда ўқитиш темпи (η) каби параметрлар тизимнинг барқарорлигини ва

яқинлашув тезлигини таъминлайдиган қилиб танланади. Ўқитиш алгоритмининг асосий вазифаси – ҳар бир бошқарув тактида умумлаштирилган хатолик функционалини камайтириш йўналишида тармоқ параметрларини коррекциялаш.

6-босқич. Ёпиқ контурли тизимнинг моделини яратиш ва симуляцион тадқиқотлар.

Юқоридаги босқичларда ишлаб чиқилган объект модели, нейрон тармоғи ва ўқитиш алгоритми бирлаштирилиб, ёпиқ контурли бошқарув тизимининг компьютер модели яратилади. Ушбу модель устида турли хил бошланғич шартлар, ташқи ғалаёнлар ва параметрик ўзгаришлар шароитида симуляцион тадқиқотлар ўтказилади. Тадқиқотлар натижасида тизимнинг турғунлиги, робастлиги, яқинлашувчанлик тезлиги ва бошқа сифат кўрсаткичлари текширилади.

7-босқич. Тизимни оптималлаштириш ва амалиётга жорий этиш.

Симуляцион тадқиқотлар натижалари асосида, зарурият туғилса, нейрон тармоқ архитектураси, ўқитиш алгоритми параметрлари ёки бошқарув қонунига ўзгартиришлар киритилади (орқа боғланиш). Оптималлаштирилган вариант танлангач, унинг реал объектда ишлаши учун зарур бўлган дастурий ва аппарат таъминоти тайёрланади ва тизим амалиётга жорий этилади. – (2.1) кўринишдаги динамик тизим модели учун, агрегирланган макропараметрлар (2-боб) синтезлаш усусли мос равишда, тизимнинг ташқи ғалёнларга турғунлиги ва мустаҳкамлигини кафолатлайдиган Ψ объектнинг чиқиш функциялари конструкцияланади;

– умумлашган хатолик функцияларининг синтези амалга оширилади

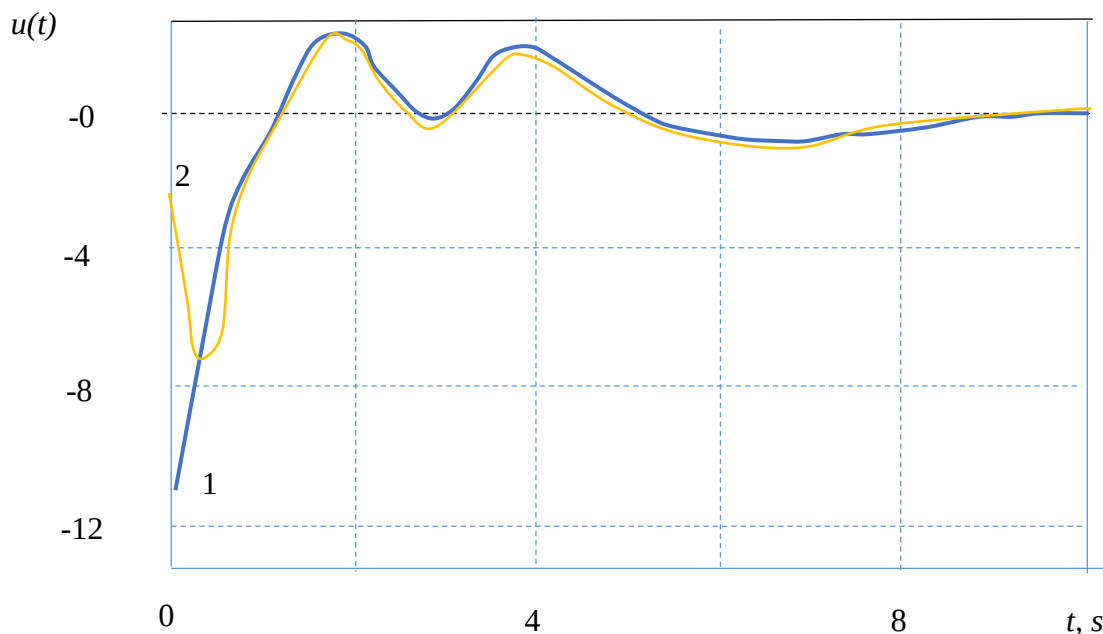
$$\delta(\Psi, \dot{\Psi}) = +\varphi(\Psi) .$$

ва 3.2-шарт текширилади;

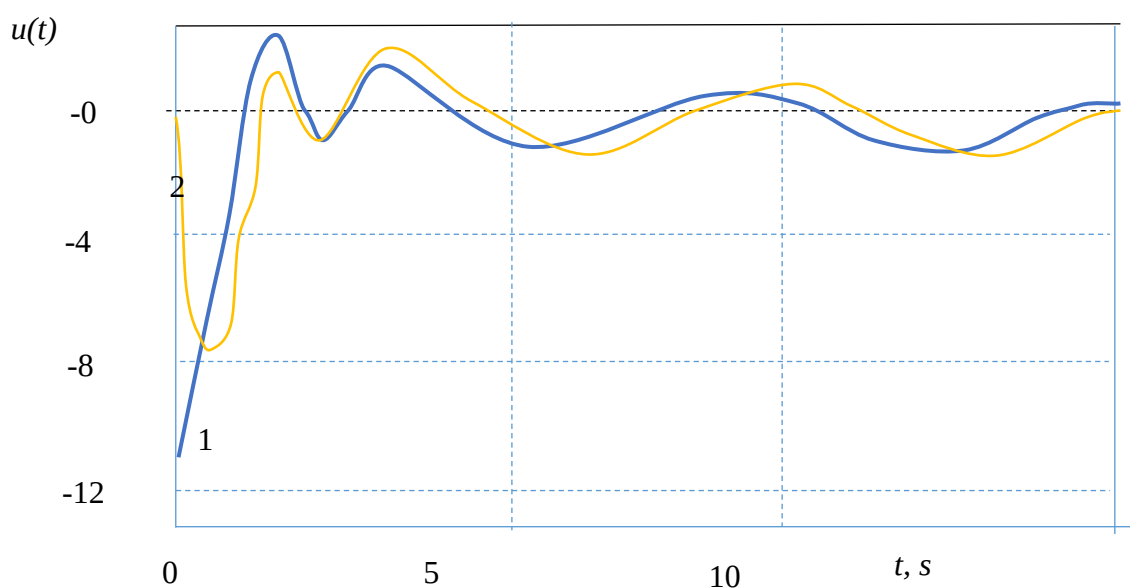
– ҳаракатларни ажратиш жараёнини таъминловчи $w(0)$ вазн коэффициентлари ва тармоқни созлаш γ коэффициентларининг бошланғич коэффициентлари берилади.

3.2-расмда аналитик ҳисобланган ва реал вақтда ўқитиладиган нейротармоқ томонидан генератсияланган бошқариш функцияларининг эгри графиклари келтирилган.

a.



б.



3.1-расм. Бошқариш қонунлари графиклари:

1-АРАК бўйича синтезланган; 2-нейротармоқники.

Графикларни солиштиришдан кўриниб турибди-ки, ғалаёнлар мавжуд бўлмаганда, $t > 0.5$ да аналитик ва нейротармоқли бошқариш қонунлари деярли бир хилдир, ғалаёнларнинг пайдо бўлиши нейротармоқли бошқариш қонунини аналитик қонундан бир мунча оғишига олиб келади.

Нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларининг амалий қимматини белгиловчи муҳим жиҳатлардан бири уларнинг икки босқичли созлаш (ўқитиш) жараёнидир. Бу жараён дастлабки (офлайн) созлаш ва реал вақтдаги (онлайн) мослашиш босқичларидан иборат бўлиб, уларнинг уйғунлиги тизимнинг юқори самарадорлигини ва ишончлилигини таъминлайди.

Дастлабки созлаш босқичи. Нейрон тармоғи дастлабки вақт моментларида, тизим ишга туширилишидан олдин, мавжуд априор маълумотлар асосида соланади. Бу босқичда тармоққа объектнинг тахминий модели, экспертлар томонидан берилган бошқарув қоидалари ёки оддий ҳолатлар учун олинган маълумотлар тўплами киритилади. Дастлабки созлашнинг мақсади – нейрон тармоғига бошқариш объекти ҳақидаги бошланғич билимларни сингдириш ва уни реал вақтда ишлашга тайёрлашдир. Бу босқичда тармоқ параметрлари (Θ) дастлабки қийматларга келтирилади ва у объектни бошқариш учун зарур бўлган функцияни тахминан бажара оладиган ҳолатга келтирилади.

Реал вақтда мослашиш босқичи. Тизим ишга туширилгач, нейрон тармоғи реал вақтда (онлайн режимда) яна соzlанишда давом этади. Энди тармоқ объектнинг жорий ҳолати тўғрисидаги реал маълумотларни олиб, улар асосида ўз параметрларини доимий равишда коррекциялаб боради. Бу жараён тизимнинг ишлашига параллел равишда амалга оширилади. Натижада, нейрон тармоғи объектнинг реал динамикасига, унинг параметрларидаги ўзгаришларга ва ташқи ғалаёнларга мослашиб, бошқарув сифатини изчил яхшилаб боради.

Ушбу икки босқичли ёндашувнинг энг муҳим афзалликларидан бири шундаки, бундай адаптив нейрон ростлагич вақт интервалининг деярли ҳаммасида эталон бошқариш функциясини муваффақиятли амалга ошира олади. "Эталон бошқариш функцияси" деганда, объектни берилган талаблар асосида (масалан, минимал хатолик билан, тезкор, энергия тежамкор) бошқариш имконини берувчи идеал

бошқарув қонуни тушунилади. Нейрон тармоғи дастлабки билимлар ва реал вақтдаги мослашув туфайли ушбу идеал функцияга доимий равишда яқинлашиб боради.

Бу хусусият, айниқса, авариявий вазиятларда динамик объектларни бошқариш учун жуда муҳим аҳамият касб этади. Авариявий вазиятлар, одатан, қуйидаги хусусиятлар билан тавсифланади:

Кутилмаганлик ва тезкорлик. Авариявий вазият одатда тўсатдан юзага келади ва жуда тез ривожланади (масалан, двигателнинг тўсатдан ишдан чиқиши, қувурнинг ёрилиши, учув аппаратида носозлик). Бундай ҳолатда бошқарув тизими дарҳол ва адекват жавоб бериши керак. Анъанавий ростлагичлар, улар учун махсус дастурланмаган бундай ҳолатларда самарасиз бўлиши мумкин.

Объект динамикасининг тубдан ўзгариши. Носозлик натижасида объектнинг математик модели, параметрлари ва динамик хусусиятлари кескин ўзгаради. Бунга мослашиш, айниқса, объект ҳақидаги априор маълумотлар кам бўлганда, жуда мураккаб масаладир.

Маълумотларнинг чегараланганлиги. Авариявий вазиятда объектнинг ҳолати тўғрисидаги маълумотлар одатда чекланган, шовқинли ва ишончсиз бўлиши мумкин.

Айнан шундай шароитларда нейрон тармоқли адаптив бошқарув тизимининг афзалликлари тўлиқ намоён бўлади:

Тезкор мослашув: Реал вақтдаги ўқитиш алгоритми туфайли тизим объект динамикасидаги кескин ўзгаришларга тезда мослашади ва янги шароитларда ҳам объектни бошқаришда давом этади.

Аппроксимatsiя қобилияти: Нейрон тармоғи янги, кутилмаган ночизиқли боғланишларни ҳам аппроксимatsiялашга қодир бўлиб, бу уни авариявий ҳолатларда ҳам самарали ишлашига имкон беради.

Робастлик: Тизим маълумотларнинг шовқинлилиги ва ишончсизлигига нисбатан кам сезувчан бўлиб, ноаниқлик шароитида ҳам ўз иш қобилиятини сақлаб қолади.

Боб бўйича хулосалар

1. Ҳаракатларни ажратиш усулининг моҳияти. Ҳаракатларни ажратиш усули динамик тизимлардаги турли тезликдаги жараёнларни бир-биридан ажратиб таҳлил қилиш имконини беради. Кўп ҳолларда, бошқарилувчи объектнинг динамикасида тез ва секин ўзгарувчи компонентлар мавжуд бўлади. Масалан, объектнинг механик қисми (инерцион элементлар) нисбатан секин ҳаракатланса, унга таъсир этувчи электромагнит жараёнлар (актуаторлар) тезроқ кечади. Ҳаракатларни ажратиш усули ушбу тез ва секин жараёнларни бир-биридан ажратиб, уларнинг ҳар бирини алоҳида-алоҳида таҳлил қилиш ва синтезлаш имконини беради. Бу, айниқса, нейрон тармоқли бошқарув тизимларини синтезлашда муҳимдир, чунки нейрон тармоғининг ўқитилиши (параметрларнинг созланиши) одатда объект динамикасига нисбатан тезроқ жараён ҳисобланади. Усул тез ва секин ҳаракатларни ажратиш орқали тизимнинг турғунлигини ва яқинлашувчанлигини кафолатлаш имконини яратади.

2. Параметрик аниқланмаган объектлар учун синтез усули босқичлари. Ташқи ғалаёнлар шароитида (2.1) кўринишдаги параметрик жиҳатдан охиригача аниқланмаган динамик объектлар учун нейрон тармоқли адаптив бошқариш тизимларини синтез қилиш

усулининг асосий босқичлари аналитик жиҳатдан асосланган. Ушбу босқичлар қуйидагилардан иборат:

3. Объект моделининг тузилишини аниқлаш. (2.1) тенгламалар тизими билан ифодаланган объектнинг динамик модели таҳлил қилинади. Бунда объектнинг номаълум параметрлари ва таъсир этувчи ташқи ғалаёнларнинг тавсифи (чегараланганлиги, статистик хусусиятлари) аниқланади. Номаълум параметрлар ва ғалаёнлар борасидаги априор маълумотлар нейрон тармоғининг дастлабки созлаш босқичида ва унинг архитектурасини танлашда ҳисобга олинади.

4. Ҳаракатларни ажратиш процедурасини қўллаш. Тизимдаги тез (нейрон тармоғининг мослашуви) ва секин (объект динамикаси) жараёнлар ажратилади. Бу ажратиш асосида тизимнинг икки даражали (two-time-scale) модели тузилади. Тез жараённинг яқинлашувчанлиги ва секин жараённинг турғунлиги алоҳида-алоҳида таҳлил қилинади.

Макроўзгарувчилар ва инвариантларни танлаш. Синергетик бошқарув назарияси принципларига асосан, тизимнинг керакли ҳолатга (аттракторга) тортилишини таъминловчи макроўзгарувчилар ва уларга мос келувчи инвариантлар танланади. Ушбу макроўзгарувчилар объектнинг физик маъносига эга бўлган катталиклар (масалан, энергия, импульс моменти) ёки уларнинг комбинatsиялари бўлиши мумкин.

Бошланғич (эталон) бошқарув қонунини синтезлаш. Танланган макроўзгарувчилар ва инвариантлар асосида, объектнинг номаълум параметрларини эътиборга олмаган ҳолда, идеал ҳолат учун бошланғич бошқарув қонуни аналитик шаклда синтез қилинади. Бу

қонун нейрон тармоғи томонидан аппроксимацияланиши лозим бўлган "эталон" бошқарувни ифодалайди.

Нейрон тармоғи архитектурасини ва ўқитиш алгоритминини танлаш. Объектнинг мураккаблиги ва бошқарув қонунига қўйилган талаблардан келиб чиқиб, нейрон тармоғининг тузилиши (қатламлар сони, нейронлар сони, фаоллаштириш функциялари) ҳамда унинг параметрларини реал вақтда ростлаш алгоритми (масалан, тескари хатони тарқатиш) танланади.

Нейрон тармоғининг объект билан интеграцияси. Синтез қилинган эталон бошқарув қонуни нейрон тармоғи орқали амалга оширилади. Тармоқнинг киришига объектнинг жорий ҳолати берилади, чиқишида эса бошқарув сигнали ҳосил қилинади. Тармоқ параметрлари юқоридаги 5-босқичда танланган алгоритм асосида, объектнинг реал ҳолати ва эталон траектория орасидаги фарқни (хатони) камайтириш йўналишида доимий равишда коррекцияланади.

Тизимнинг турғунлигини ва яқинлашувчанлигини текшириш. Ляпуновнинг бевосита усули ёки бошқа нозикли тизимлар таҳлили усуллари ёрдамида, синтез қилинган ёпиқ контурли тизимнинг асимптотик барқарорлиги ва нейрон тармоғи параметрларининг яқинлашувчанлик шартлари текширилади.

УМУМИЙ ХУЛОСАЛАР

Монография ишида тизимли таҳлил, сунъий интеллект назарияси, адаптив бошқариш, кўп қатламли нейрон тармоқлари, автоматик бошқариш назарияси концепциялари асосида нозичли динамик объектларнинг адаптив нейротармоқли бошқариш тизимини синтез қилиш алгоритмлари таклиф этилган.

Натижада қуйидаги натижаларга эришилган:

1. Нозичли динамик объектларни адаптив нейротармоқли бошқариш тизимини синтез қилиш алгоритмларининг ривожланиши таҳлил қилинган.

2. Ғалаёнларни тўғридан-тўғри ўлчаш учун имкон бўлмаган ташқи чекловларда тизимнинг барқарорлигини кафолатловчи нейротармоқли бошқариш тизимини синтез қилишнинг уч босқичли процедураси келтирилган.

3. Ташқи ғалаёнлар мавжуд шароитларда кўп ўлчамли ва кўп боғлиқли объектларни нозичли моделлари синфи учун кафолатлайдиган АРАК усулини модификациялаш таклиф этилган.

4. Модификацияланган АРАК усули бўйича синтезланган, умуман олганда тизимнинг асимптотик турғунлик шартлари аниқланган.

5. Ҳаракатларни ажратиш усули асосида ташқи ғалаёнлар мавжуд бўлганда умумий кўринишдаги динамик объектларнинг нейротармоқли адаптив тизимини синтез қилиш учун ёндашув кўриб чиқилган.

6. Ташқи ғалаёнлар мавжуд шароитларда (2.1) кўринишдаги параметрик жиҳатдан охиригача аниқламаган динамик объектларни нейротармоқли адаптив бошқариш тизимининг синтез усулининг босқичлари аналитик асоси олинган.

7. Бутун ҳолат фазосида ташқи ғалаёнлар шароитларида бу тизим синфини таҳлил қилиш ва синтезлашга имкон берадиган сингуляр ғалаёнланган тизимлар назариясининг натижаларининг ривожланиши келтирилган.

ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР РЎЙХАТИ

1. Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У., Норалиев С.Н. Алгоритмы синтеза нелинейных систем управления с использованием многослойных нейронных сетей // Проблемы и перспективы инновационной техники и технологий в аграрном-пищевом секторе. Сборник научных трудов ИИИ-Международной конференции. – Ташкент. ТашГТУ, 2023. -С.214-215.
2. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. Учебное пособие. - М.: Радиотехника, 2009. - 392 с.
3. Ефимов Д.В., Терехов В.А. Динамический алгоритм обучения многослойных нейронных сетей // Изв. ВУЗов "Приборостроение", № 3, 2001.
4. Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Алгоритмический синтез адаптивных нейросетевых систем управления // Труды конф. "Навигация и управление движением", СПб., 2000.
5. Н.Р. Юсупбеков. Р. А. Алийев, Р. Р. Алийев, А. Н. Юсупбеков “Бошқаришнинг интеллектуал тизимлари ва қарор қабул қилиш” – Тошкент. “Ўзбекистон миллий энциклопедияси” давлат илмий нашриёти, 2015-572б.
6. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами //Сер. “Анализ и синтез нелинейных систем”. - СПб.: Наука, 2000. - 549 с.
7. Игамбердийев Х.З., Севинов Ж.У. Бошқариш назарияси. Дарслик. – Т, 2018. 326 б.

8. Боборайимов О.Х., Норалиев Н.С. Синтез адаптивных нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами // «Илм-фан, маданият, техника ва технологияларнинг замонавий ютуқлари ҳамда уларнинг иқтисодий таътибига» мавзусида халқаро илмий-амалий анжуман. Андижон-2022. 25-27 май. -С.640-642.
9. Масина О.Н., Петров А.А., Дружинина О.В., Рапопорт Л.Б. Моделирование и стабилизация нелинейных управляемых систем: учебное пособие. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020. – 117 с.
10. Сешагири С., Кхалил Х.К. Оутпут феедбаск контрол оф нонлинеар сйстемс усинг РБФ нетворкс // ИЕЕЕ Транс. Неурал Нетворкс, вол. 11, Жануарй 2000, П. 69 - 80.
11. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления. – М: Высшая школа, 2002. – 183 с.
12. Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю., Бенамеур Лиес. Методы и алгоритмы решения задач идентификации и прогнозирования в условиях неопределенности в нейросетевом логическом базисе. -М.: Горячая линия -Телеком, 2003. - 205 с.
13. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: Теле-тех, 2004. 369 с.
14. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров и др., -М.: Наука, 2006. - 333 с.
15. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. – М.: МГТУ им.Баумана, 2003. – 348 с.

16. Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимьянов. Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
17. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 496 с.
18. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 176 с.
19. Терехов В.А. Динамические алгоритмы обучения многослойных нейронных сетей в системах управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996, № 3. С.70-79.
20. Ефимов Д.В., Терехов В.А. Оптимальные алгоритмы обучения многослойных нейросетей // "Нейрокомпьютер", № 3, 2000.
21. Ефимов Д.В., Терехов В.А. An Optimal Algorithm of Multilayered Neural Network Training / / International Conference "Neurocomputers and their Applications", 2000.
22. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Синтез адаптивных нейросетевых регуляторов нелинейных динамических объектов// Институте фор Пхисисал анд Чемисал Ресерч (РИКЕН), Жапан 2017.
23. Терехов В. А., Никонов А. Н. Синтез нейрорегуляторов нелинейных динамических объектов // Материалы международной научно-технической конференции “Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009)”. — Таганрог: Изд. ТТИ ЮФУ, 2009. — С. 18-20.
24. Никонов А. Н., Забелин В. В. Типовые адаптивные нейрорегуляторы нелинейных динамических объектов // Управление и информационные технологии (УИТ- 2008): Доклады 5-й научной конференции, Т.2, 2008. — С.135-140.

25. Никонов А. Н. Реализация нейросетевого регулятора как непрерывной динамической системы на базе промышленных контроллеров СИМАТИС / А. Н. Никонов и др. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», №7, 2011. — С.40-46.
26. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей; [пер. с англ.]. М.: Вильямс, 2001. 290 с.
27. Егупов Н.Д., Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 томах. - М.: Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2004.
28. Колесников А.А. Основы теории синергетического управления. — М.: Фирма «Испо-Сервис», 2000. 264 с. (Серия книг специалиста по автоматизации производства. Под общ. ред. А.С. Ключева).
29. Юсупбеков Н.Р., Мухитдинов Д.П., Саттаров О.У. Управление динамическими объектами на основе нейронных сетей // Журнал оф Адвансес ин Енжинееринг Течнологй. Вол.1(3), Жануарй-Марч, 2021. - ПП.55-63. DOI: 10.24412/2181-1431-2021-1-55-63.
30. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. -М.: Горячая линия - Телеком. 2004. -452 с.
31. Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления: проблемы теории, приложения // Сб. докладов ИИ науч.-техн. конференции молодых ученых «Навигатсия и управление движением». 28-30 марта 2000 г. Санкт-Петербург. СПб. ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор» , 2000. с. 97-121.
32. Ефимов Д.В., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Синергетический синтез нейросетевых систем управления // В гл. 20., Современная прикладная

теория управления. Часть IIII: “Новые классы регуляторов технических систем” (под ред. акад. А. А. Красовского). Таганрог: Изд.-во ТРТУ, 2000. С. 539-587.

33. Тюкин И.Ю. Алгоритмический синтез нейросетевых систем управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности. Дисс. на соискание учен. степени к-та техн. наук./ СПбГЭТУ. СПб., 2001. 254 с.

34. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю., Антонов В.Н. Нейросетевые системы управления. СПб. Изд. С.-Петербургского университета, 1999. 265 с

35. Афанасьев, В.Н. Оптимальные системы управления / В.Н. Афанасьев – М.: Изд-во РУДН, 2007. – 260 с.

36. Ефимов Д.В., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивная система управления с нейронной сетью. - Сб. науч. трудов "Методы и аппаратные средства цифровой обработки сигналов" / / Изв. ГЭТУ. СПб, 1996. Вып. 490. С. 32-35.

37. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейроуправления // Проблемы программирования, 2011, № 2, с. 79-94.

38. Ефимов Д.В. А Сйнергетис Аппроач то тхе Струстурал Сйнтхесис оф Сонтрол Сйстемс вихтх Мултилайеред Неурал Нетворкс / / 6тх Интернатионал студент олимпиад он аутоматион контрол (Балтис олимпиад). Препринтс. С-Пб, 1998. П. 16-21.

39. Галушкин А.И. Нейронные сети: история развития теории: Учебное пособие для вузов. / А.И. Галушкин, Я.З. Цыпкин. - М.: Альянс, 2015. – 840 с.

40. Жуков, Л.А. Формализация технологии применения нейронных сетей с учителем / Л.А. Жуков, Н.В. Решетникова. Красноярск, 2005.- 168 с.
41. Никонов А. Н. Синтез нейрорегулирования на основе обобщённой нелинейной модели динамических объектов // 63-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета: сборник докладов студентов, аспирантов и молодых учёных. СПб: Изд. СПбГЭТУ, 2010. — С. 132-138.
42. И.Ю. Тюкин, Алгоритмы адаптации в конечной форме для нелинейных динамических объектов // Автоматика и Телемеханика. — 2003. — Т. 64, № 6. — С. 951-974.
43. Севинов Ж.У., Норалиев С.Н. Норавшан мантиқ асосида технологик жараёнларни бошқариш тизимини таҳлил қилиш // Девелопмент анд инноватион ссиентифис онлайне жоурнал. 2023. — С. 1-5. [хттпс://ситес.гоогле.ком/виеш/имху/](https://sites.google.com/view/imxu/)
44. Стариченков А. А. Прогнозирующий алгоритм управления движением корабля на воздушной подушке в аварийных ситуациях // Сб. докл. Н-й НТК "Навигация и управление движением". СПб., ЦНИИ Электроприбор, 2000. С. 153—162.
45. Васильева А.Б., Бутузов В.Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. М.: Высш. школа, 1990. 208 с.
46. И.Х. Сиддигов, Ю.А. Жукова, Имитационное моделирование системы управления динамическим объектом на основе синергетического подхода //«Автоматизация. Современные Технологии» №1, 2018 С. 22-25.

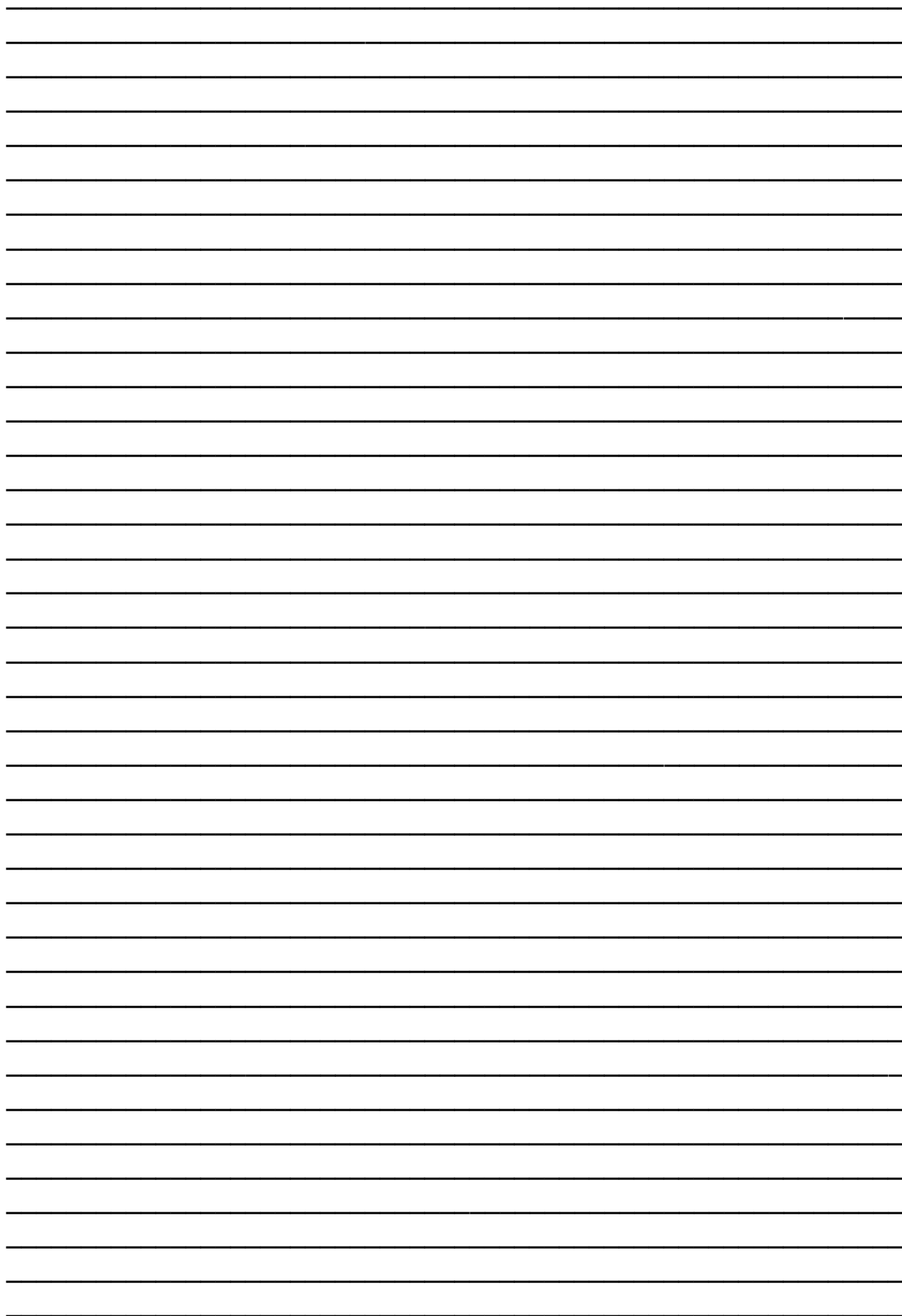
47. Суровцев И.С., Клюкин В.И., Пивоварова Р.П. Нейронные сети. – Воронеж: ВГУ, 1994. – 224 с.
48. Исидори А. Нонлинеар контрол системс: Ан Интродустион. 2^{нд} ед. — Берлин: Спрингер-Верлаг, 1989. П. 478.
49. [ҳттип://www.зиёнет.уз](http://www.зиёнет.уз).
50. [ҳттип://www.гов.уз](http://www.гов.уз).
51. [ҳттип://www.матҳнет.ру](http://www.матҳнет.ру).
52. [ҳттип://www.аспентеч.ру](http://www.аспентеч.ру)
53. [ҳттип://www.винсим.ком](http://www.винсим.ком)
54. [ҳттип://www.чемстатсионс.ком](http://www.чемстатсионс.ком)
55. [ҳттип://www.бре.ком](http://www.бре.ком)

МУНДАРИЖА

КИРИШ.....	3
I-БОБ. ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ БОШҚАРИШ МАСАЛАЛАРИДА КЎП ҚАТЛАМЛИ НЕЙРОН ТАРМОҚЛАРИ (КҚНТ)НИНГ ҚЎЛЛАНИЛИШИ.....	6
1.1. Статик кўп қатламли нейрон тармоқлари	10
1.2. Тўғри таъсирли КҚНТ ни ўқитиш алгоритмлари.....	14
1.3. Динамик объектларни бошқариш масалаларида статик КҚНТ лардан фойдаланиш	17
1.4. Адаптив автоматик бошқариш тизимларида динамик КҚНТ лардан фойдаланиш	21
1.5. Ночизиқли динамик тизимларни аналитик синтезлаш усулларининг шарҳи.....	26
1.6. Тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари	32
Боб бўйича хулосалар.....	34
II-БОБ. КЎП ҚАТЛАМЛИ НЕЙРОН ТАРМОҚЛАРДАН ФОЙДАЛАНИШ БИЛАН НОЧИЗИҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИ СИНТЕЗЛАШ	36
2.1. Кўп қатламли нейрон тармоқли бошқариш тизимларини синтезлаш босқичлари	37
2.2. Нейрон тармоқли бошқаришнинг ўзига хос хусусиятлари.....	42
2.3. Агрегатланган ростлагичларни аналитик конструкциялаш усулини қўллаш билан ҳолат вектори киришининг турғунлик масаласи	50
2.3.1. Масаланинг расмий қўйилиши.....	55
2.3.2. Асимптотик турғунлаштириш масаласи.....	57
2.3.3. Ҳолат векторининг киришидан турғунлаштириш масаласи.....	70
Боб бўйича хулосалар	78

III- БОБ.	АДАПТИВ НЕЙРОН ТАРМОҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМИНИНГ ТАҲЛИЛИ	81
3.1.	Ҳаракатларни ажратиш усули асосида масалани ечиш.....	81
3.1.1.	Мунтазам масала.....	84
3.1.2.	Критик масала.....	89
3.2.	Нейрон тармоқли бошқариш тизимининг умумий функционал схемаси	93
	Боб бўйича хулосалар	103
	УМУМИЙ ХУЛОСАЛАР.....	106
	ФОЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР РЎЙХАТИ	107

This image shows a single page of white paper with horizontal blue ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.



**С.Н.НОРАЛИЕВ, С.С.НОРМУРОДОВ,
С.Н.НОРАЛИЕВ, А. А.САЙТНИЯЗОВ**

**НОЧИЗИҚЛИ ДИНАМИК ОБЪЕКТЛАРНИ АДАПТИВ НЕЙРОН
ТАРМОҚЛИ БОШҚАРИШ ТИЗИМЛАРИНИНГ СИНТЕЗИ**

МОНОГРАФИЙА

Техник муҳаррир: Эшқораев С. С.

Мусахҳиҳ: Жавгашев Й. Ж.

Тасдиқнома № 255979, 13.04.2024

Босишга 18.04.2026 да рухсат берилган. Формат 60x84/16.

Гарнитура Тимес Нев Роман. Адади 70 дона. Буюртма № 764

“Termiz publishing center” нашриётида тайёрланди ва чоп этилди.

Сурхондарё вилояти, Термиз шаҳри, Увайсий кўчаси 8А-уй, Тошкент ш.,

"ТРАСТБАНК" ХА БАНКИНИНГ БОШ ОФИСИ, МФО: 00491, ИНН:

311209934 Х/Р: 20208000307031406001

Телефон: +998-88-808-21-07

ISBN 978-9910-13-268-1



7811



**TERMIZ
PUBLISHING
CENTER**

Termiz – “Termiz publishing center”-2026