Ш. Р. Убайдуллаева

ДОИМИЙ ВА ЎЗГАРУВЧАН КЕЧИКИШЛИ ЧИЗИҚЛИ УЗЛУКСИЗ ТИЗИМЛАР ДИНАМИКАСИНИ ЎРГАНИШНИНГ ГРАФЛИ МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ

МОНОГРАФИЯ

БУХОРО

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ

ТОШКЕНТ ИРРИГАЦИЯ ВА ҚИШЛОҚ ХЎЖАЛИГИНИ МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИНИНГ БУХОРО ФИЛИАЛИ

“ҚИШЛОҚ ХЎЖАЛИГИНИ МЕХАНИЗАЦИЯЛАШ” факультети

“ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАР ВА ИШЛАБ ЧИҚАРИШНИ АВТОМАТЛАШТИРИШ ВА БОШҚАРУВ” кафедраси

Ш. Р. Убайдуллаева

ДОИМИЙ ВА ЎЗГАРУВЧАН КЕЧИКИШЛИ ЧИЗИҚЛИ УЗЛУКСИЗ ТИЗИМЛАР ДИНАМИКАСИНИ ЎРГАНИШНИНГ ГРАФЛИ МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ

МОНОГРАФИЯ

БУХОРО 2018

Мазкур тадқиқотдан мақсад графли моделлар базасида моделирлашнинг топологик методини ишлаб чиқиш ва тузилмали-мураккаб узлуксиз чизиқли кечикишли тизимларни ўрганиш.

Ишнинг илмий янгилиги графли моделлар асосида бошқариш тизимини ўрганишнинг тузилмали методларини ривожлантириш, бунинг натижасида кечикишли аргументли дифференциал тенгламалар билан баён этилувчи тизимларни моделирлашнинг машинага-йўналтирилган топологик методини яратиш ва тизимни ўрганиш каби мухим муаммони ечишга имкон беради.

Тақризчилар: **К. З. Абидов** -Бухоро мухандислик- технология институти «Технологик жараенларни бошқаришнинг ахборот-коммуникация тизимлари» кафедра доценти;

Ж.Ж. Жумаев– Бухоро давлат университети “Амалий математика ва ахборот технологиялари” кафедра доценти.

МУНДАРИЖА

Кириш

Муаммонинг долзарблиги. Бошқариш тизимининг муҳим синфларидан бири кечикишга эга тизимлардир. Кечикиш ҳодисаси техникада, иқтисодда, биологияда ва кўплаб бошқа соҳаларда кузатилади. Кечикиш самараси тескари алоқа мавжудлигида, айниқса учувчи аппаратларни ва катта масофаларда технологик тизимларни автоматик бошқаришда, аниқ намоён бўлади. Бошқарувчи тизим жавобининг жараённинг ҳосил бўлган бузилишига кечикиши, одатда, ўтиш жараёни давомийлигининг ўсишига, ёпиқ тизимда автотебранишларнинг пайдо бўлишига, кўп ҳолларда эса, тизим турғунлигининг йўқолишига, охир-оқибатда бу агрегатлар унумдорлигининг пасайишига, маҳсулот сифатининг ёмонлашувига олиб келади. Шундай қилиб, кечикиш, умумий ҳолда, доимий, ўзгарувчан ёки тасодифий миқдор бўлиб, бошқариш тизимининг динамик кўрсаткичларини анча пасайтирувчи асосий факторлардан бири ҳисобланади. Шунинг учун кечикишли тизимларни ўрганишнинг маълум методларини такомиллаштириш ва янги машинага-йўналтирилганларини яратишга зарурият пайдо бўлади.

Химия, нефтехимия, металлургия ва бошқа кўплаб технологик жараёнларда кўпинча транспортли, ёки “соф” деб аталувчи кечикиш тури учрайди. Бундай кечикишлар технологик жараёнда модда, энергия ва бошқаларнинг ўз хоссалари ва характеристикаларини ўзгартирмасдан туриб, маълум бир тезлик билан, бир нуқтадан бошқасига ўтганида ҳосил бўлади [4]. Суюқликларни аралаштириш билан боғлиқ бўлган жараёнларни созлашда катта транспортли кечикишлар кузатилади. Аралашма бакида ҳароратни бошқариш тизимида ҳарорат режими кирувчи иссиқ оқимнинг нисбий келиб тушишини ўзгартирувчи регулятор томонидан қувватланади. Тизимнинг конструкцияси қуйидагича: суюқликнинг иссиқ ва совуқ оқимларининг аралашуви бакдан анча узоқда содир бўлади, бу эса жараёнга катта транспортли кечикишларни киритади. Металлни совуқ прокатка қилиш стани транспортли кечикишга яққол мисол бўлади, бу ерда лист қалинлигидаги датчик, конструктив мулоҳазалар бўйича, бевосита валкалар остида эмас, балки улардан анча узоқликда жойлашган. Бунинг натижасида объектнинг чиқиш миқдори – лист қалинлиги металлнинг валкалар билан ўраб қисиш даражасининг таъсирига нисбатан созловчи транспортли кечикишга эга бўлади. Доимий ва ўзгарувчан транспортли кечикишлар ёниш, қуритиш жараёнларида, шарли тегирмонлар ва бошқа объектларни бошқаришда бўлади.

Бошқаришнинг реал объектларида кечикиш ўзгарувчиси бошқа сабаблар билан ҳам асосланиши мумкин. Технологик жараёнларни автоматлаштиришда микропроцессор техникасининг кенг қўлланилиши ахборот маълумотларининг катта массивларини қайта ишлаш зарурияти, узлуксиз миқдорнинг дискрет миқдорга ўзгариш вақти, битта дастурдаги бажариладиган буйруқларнинг ҳар хил сонлари, турли операцияларнинг бажарилишининг бир хилмас вақтлари каби факторлар билан асосланган ўзгарувчан кечикишнинг пайдо бўлишига олиб келди.

Кечикишли тизимларни назарий ўрганишга катта сондаги ишлар бағишланган.

Х. Гурецкий, А.А. Қодиров, А.В. Солодов ва бошқа олимлар томонидан бу соҳага киритилган жиддий ишларни айтиб ўтиш керак. Кўп тадқиқотчиларнинг меҳнатлари туфайли ҳозирги кунда кечикишли узлуксиз ва дискрет тизимларнинг анализ ва синтез масалаларини муваффақиятли ечиш мумкин . Аммо кечикишли кўп ўлчамли узлуксиз тизимларнинг, релели тизимларнинг, кенг- ва частота-импульсли тизимларнинг моделлаш ва тадқиқ қилиш масалалари ҳали охиригача ечимини топмаган [4, 5, 7, 8, 15].

Ҳозирги кунда бошқаришнинг тузилмали – мураккаб тизимлари анализ ва синтезининг қувватли воситаларидан бири динамик графли моделлар методидир, у, ҳолатлар фазоси концепциясининг афзалликларини ва графларнинг назарий-тўплам хоссаларга эга динамик тизимларини тадқиқ қилишнинг бошқа классик методларини ўз ичига бирлаштиради. Ҳар хил масалаларнинг бир хил формулировкасини, ўзгарувчиларнинг катта сондаги бошқарадиган ва бошқариладиган ўзгарувчиларини бошқариш масалаларини оддий ечиш имкониятини, асинхрон квантлаш масалаларини ечишни, шунингдек ностационар ва чизиқлимас масалаларни тадқиқ қилишни мазкур методнинг афзалликларидан, деб айтиб ўтиш зарур.

Бошқариш тизими кўплаб синфларининг анализ ва синтез масалаларига нисбатан граф моделларини қўллашда катта ютуқларга эришилди. Аммо, доимий ва ўзгарувчан кечикишга эга узлуксиз тизимларнинг, кечикишли чизиқсиз дискрет тизимларнинг анализи ва синтезини расмий баён этиш учун, топологик методларни ишлаб чиқиш билан боғлиқ йўналиш ўзининг сўнгги ечимини топганича йўқ , у ўзининг кейинги ривожлантирилишини кутмоқда.

Ишдан мақсад. Мазкур тадқиқотдан мақсад графли моделлар базасида моделирлашнинг топологик методини ишлаб чиқиш ва тузилмали-мураккаб узлуксиз чизиқли, релели ва анализ ҳамда синтез масалаларига ўхшаш бўлган кечикишли чизиқлимас дискрет тизимларни ўрганиш.

Қўйилган мақсадга эришиш учун қуйидаги масалалар ечилди:

- ✓ таҳлил (анализ) бажарилди, топологик метод ва, кечикувчи аргументли дифференциал тенгламалар назариясини биргаликда ишлатиш асосида, доимий ва ўзгарувчан кечикишли чизиқли узлуксиз тизимларнинг графли моделларини қуриш йўллари асосланиб берилди;
- ✓ узлуксиз чизиқли, релели ва чизиқсиз дискрет кечикишли импульсли модуляциянинг ҳар хил кўринишларига эга графли моделларининг мажмуаси (комплекси) ишлаб чиқилди;
- ✓ таклиф қилинган моделлар ва алгоритмлар базасида кечикишли тузилмали - мураккаб чизиқли узлукли, релели, чизиқли ва чизиқлимас дискрет тизимларни қамраб олувчи анализни автоматлаштириш тизими дастурий таъминотининг алгоритми яратилди.

Тадқиқот методлари. Қуйилган масалаларни ечиш учун автоматик бошқариш назариясидан, тизимли таҳлилдан, графлар назариясидан, кечикувчан аргументли дифференциал тенгламалар назариясидан фойдаланилди.

Ишнинг илмий янгилиги графли моделлар асосида бошқариш тизимини ўрганишнинг тузилмали методларини ривожлантириш, бунинг натижасида кечикишли аргументли дифференциал тенгламалар билан баён этилувчи тизимларни моделирлашнинг машинага-йўналтирилган топологик методини яратиш ва тизимни ўрганиш каби муҳим муаммони ечишга имкон берди.

Ишнинг амалий баҳоси. Ишнинг энг жиддий амалий натижалари:

- ✓ моделирлашнинг самарали машинага-йўналтирилган топологик методи ва доимий ҳамда ўзгарувчан кечикишли тузилмали-мураккаб тизимларини ўрганиш;
- ✓ бир ва кўп ўлчамли чизиқли узлуксиз, релели, кенг-частотали импульсли кечикишли тизимларда динамик жараёнларни ҳисоблаш алгоритми;
- ✓ таклиф қилинган моделлар ва алгоритмлар базасида кечикишли тизим анализининг автоматлаштириш тизимининг дастурий таъминоти яратилди.

ДОИМИЙ ВА ЎЗГАРУВЧАН КЕЧИКИШЛИ ЧИЗИҚЛИ УЗЛУКСИЗ ТИЗИМЛАР ДИНАМИКАСИНИ ЎРГАНИШНИНГ ГРАФЛИ МОДЕЛЛАРИ ВА АЛГОРИТМЛАРИ

1.1. Кечикишга эга тизимлар хотирага эга тизимларнинг хусусий ҳоли сифатида

Тизимнинг вақт давомидаги ҳаракати, унинг бир ҳолатдан бошқасига ўтиши тизимни ўрганишнинг муҳим объекти бўлиб ҳисобланади. Динамик тизимнинг t_0 дақиқадаги ҳолати, $t_0<t<t_f$ учун берилган қандайдир бир кириш функцияси билан биргаликда ҳар қандай $t_f>t_0$ да ягона чиқиш функциясини адекват аниқловчи ахборот бўлади.

Тизим ҳолатини n ўлчовли X вектор билан баён этиш мумкин, деб фараз қиламиз. Бу векторнинг n ташкил этувчилари

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$$

тизимнинг ўзгарувчан ҳолатлари бўлади [1]. Баён этиш учун n ўзгарувчи керак бўладиган тизимни n - тартибли тизим, деб атаймиз. Динамик тизим учун $X(t_0)$ нинг ҳақиқий ҳолатини ва келгуси кириш ($\Psi(t),\ t\geq t_0$) таъсирини билиш $(Y(t), t\geq t_0)$ тизим чиқиш характеристикасининг ҳозирги ва кейинги қийматларини топиш учун етарли. Демак, тизим чиқиш характеристикасининг келгуси қийматлари, тизимнинг ўзининг ҳақиқий қийматига эришишга имкон берадиган усулга боғлиқ эмас экан. Агар мазкур тизим, ҳолатлар фазоси ёрдамида намойишга йўл қўйса ва оддий дифференциал тенгламалар билан баён этилса, унда ҳолат тенгламасини қуйидаги кўринишда келтириш мумкин:

$$X(t) = F\,(X(t), \Psi(t)), \qquad (1.1)$$

$$Y(t) = G\,(X(t), \Psi(t)), \qquad (1.2)$$

бу ерда n ўлчовли F функция ва m ўлчовли G функция бир қийматлидир. (1.1) ва (1.2) тенгламалар ҳолат тенгламаларининг стандарт шакли кўринишида маълум.

Ҳамма тизимларни ҳам ҳолатнинг чек ўлчовли тенгламалари ёрдамида баён этиб бўлмаслигини осонгина кўриш мумкин. Масалан, қандайдир бир тизимнинг t_0 дақиқадаги ҳолати киришдаги таъсир ва тизимнинг $[t_0-\tau,\ t_0]$ вақт оралиғидаги ҳолат реакцияси билан аниқлансин. Охирги шарт, тизим ҳолати $t_0-\tau\le t\le t_0$ оралиқда аниқланган функцияга боғлиқ эканлигини билдиради, яъни бизнинг таърифимизни қаноатлантирадиган ҳеч қандай чек ўлчамдаги фазони кўрсатиш мумкин эмас. Кечикишли узлуксиз тизимлар айнан ҳолатнинг чек ўлчамдаги фазосига эга бўлмаган тизимлари синфига тегишли бўлади. Кечикишга эга $t_0-\theta\ \le\ t\ \ \le t_0$ учун бошланғич $\varphi(t)$ функцияли тизим ҳолатининг тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$X(t) = \Phi\ (X(t), \Psi(t), X(t-\theta)), \tag{1.3}$$

$$Y(t) = H\ (X(t)),$$

(1.3)-тенглама кечикувчи аргументли дифференциал тенглама дейилади [15]. Унда $X(t)$ функция, умумий ҳолда, қандайдир t вақт дақиқасида тизим ҳолатини баён этувчи n ўлчовли ҳақиқий вектор. $\Psi(t)$ функция - кирувчи таъсирларнинг m ўлчовли ҳақиқий вектори бўлади. $\theta = \tau(t)$ функция кечикишни тавсифлайди, умумий ҳолда $X(t)$ векторнинг ҳар бир ташкил этувчиси учун ҳар хил. Бошланғич $\Phi(t)$ функция $t_0-\theta\le t\le t_0$ кесмада n ўлчовли узлуксиз ҳақиқий вектор кўринишида берилади (44).

$$X(t)=\varphi(t),\ t_0-\theta\le t\le t_0$$

хоссаларга эга ва $t\ge t_0$ учун (1.3) тенгламани қаноатлантирувчи $X(t)$ вектор-функция кечикувчи аргументли, ёки оддий қилиб айтганда, кечикишга эга дифференциал тенгламанинг ечими дейилади. Функция турига боғлиқ равишда θ дифференциал тенгламалар кечикишига кўра бир неча турларга бўлинади.

а) Доимий кечикишли дифференциал тенгламалар. Агар θ миқдор ечимнинг ҳамма мавжуд бўлиш интервалида ўзгармас бўлса, $\theta=\tau=const$, *(1.3)* тенглама қуйидаги кўринишни қабул қилади:

$$X(t) = \Phi\ (\Psi(t), X(t), X(t_0\text{-}\tau)), \qquad t \geq t_0 \qquad (1.5)$$

б) Ўзгарувчан кечикишли дифференциал тенгламалар. $t_0\text{-}\theta = \tau\ (t)$ вақтнинг θ бўлакли-узлуксиз функцияси бўлсин. Унда (1.3) тенглама қуйидаги кўринишни қабул қилади:

$$X(t) = \Phi\ (\Psi(t), X(t), X(t\text{-}\ \tau(t))), \qquad t \geq t_0 \qquad (1.6)$$

в) Чизиқлимас кечикишли дифференциал тенгламалар. Θ функция нафақат вақтга, балки изланаётган $X(t)$ функцияга ёки унинг $X'(t)$ ҳосиласига, ёки унисига ҳам, бунисига ҳам бир вақтда боғлиқ бўлиши мумкин:

$$\Theta = \tau\ (t, X(t)), \qquad \Theta = \tau\ (t, X'(t)), \qquad \Theta = \tau\ (t, X(t), X'(t)).$$

Чизиқлимас кечикишли мос дифференциал тенгламалар қуйидаги кўринишни олади:

$$X'(t) = \Phi\ (\Psi(t), X(t), X(t\text{-}\ \tau(t, X(t))), \qquad (1.7)$$

$$X'(t) = \Phi\ (\Psi(t), X(t), X(t\text{-}\ \tau(t, X'(t))), \qquad (1.8)$$

$$X'(t) = \Phi\ (\Psi(t), X(t), X(t\text{-}\ \tau(t, X(t), X'(t))), \qquad (1.9)$$

г) Нейтрал турдаги дифференциал тенгламалар. Бу синф тенгламаларига $\Phi\ (.)$ функцияси изланаётган кечикувчи аргументга эга функцияга, шунингдек унинг ҳосиласига боғлиқ бўладиган тенгламалар киради. Нейтрал турдаги дифференциал тенгламалар нафақат бошланғич функциянинг, балки унинг ҳосиласининг ҳам берилишини талаб қилади. Бундай тенгламалар билан баён этилувчи тизимлар, амалиётда жуда оз учрайди.

Агар доимий кечикувчи ўзгарувчига эга тизим чизиқли бўлса, уни қуйидаги кўринишдаги дифференциал тенгламалар билан баён этиш мумкин:

$$X'(t) = AX(t) + BX(t\text{-}\Theta) + C\Psi(t), \qquad (1.10),$$

бу ерда A матрица nxn ўлчамга эга, B матрицанинг ўлчами ҳам шунга тенг: nxn, C матрица ўлчами эса – nxm.

Бундай тизимнинг чиқиш микдорлари қуйидаги муносабат билан аниқланади:

$Y(T) = HX(t),$

бу ерда $H - pxn$ ўлчамли матрица.

1.2 Кечикишга эга тизимларни ўрганиш усулларининг нисбий таҳлили

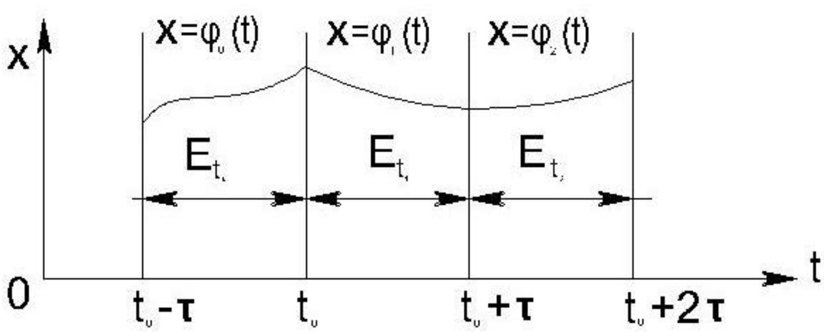
Кечикишга эга тизимларни ўрганишнинг асосий усуллари ичидан оралиқ (интервал)ларда кетма-кет интеграллаш (қадамлар усули), ҳар хил сонли (Адамс, Милн, Эйлер ва б.усуллар) усулларни айтиб ўтиш керак.

Қадамлар усулининг моҳиятини тушунтирамиз. Кечикишга эга тизимнинг чиқиш жараёни, математик нуқтаи назардан, кириш таъсирларини тавсифловчи мос бошланғич шартларда ва берилган функцияларда тизим ҳаракатини баён этувчи дифференциал тенгламани ечишни билдиради. Уни излаб топиш учун ҳамма ҳолларда асосий бошланғич масалани [4] ечиш зарур.

Кечикувчи аргументга эга дифференциал тенглама берилган бўлсин:

$$\frac{dx}{dt} = f[t, x(t), x(t-\tau)] \qquad (1.12)$$

бу ерда $x(t)$ – чиқиш жараёнини аниқловчи изланаётган функция, τ – кечикиш доимийси, f – ҳосиланинг аргументга тегишли боғлиқлигини ўрнатади.



1.2.1-расм.

Асосий бошланғич масала, ёки (1.12)-тенглама учун Коши масаласи $t_0-\tau \le t \le t_0$ да $x(t)=\varphi_0(t)$ деб ҳисоблаб (1.2.1-расм), $t \ge t_0$ да $x(t)$ нинг узлуксиз ўзгаришини аниқлашдан иборат. Бунда $\varphi_0(t)$ олдинги қиймати маълум, бошланғич функция деб аталувчи, узлуксиз функция. $\varphi_0(t)$ функция аниқланган кесма E_0 бошланғич тўплам деб айтилади.

Кетма-кет интегрирлаш услубиётидан $[t_0+i\tau,\ t_0+(i+1)\tau],\ i=0,\ 1,\ \ldots,$ оралиқларда фойдаланиб, (1.12)-тенгламани ечиш муаммосини оддий дифференциал тенгламани ечиш муаммосига олиб келиш мумкин. Шу нуқтаи назардан, алоҳида ҳолатлар учун истисно тарзида, кечикишга эга аргументли тенгламалар учун ечимнинг мавжудлиги ва ягоналиги теоремасини, одатдаги дифференциал тенгламалар учун ўхшаш теоремага олиб келиш мумкин.

(1.12)-тенглама учун $x(t)=\varphi(t),\ t\in[t_0-\tau,\ t_0],$ бўлсин, у ҳолда $[t_0-\tau,\ t_0]$ вақт оралиғида $t-\tau$ аргумент бошланғич $[t_0-\tau,\ t_0]$ тўпламда маълум бўлгани учун, $x(t-\tau)$ функция бошланғич $\varphi(t-\tau)$ функцияга тенг бўлади ва биз қуйидагига эга бўламиз:

$$\frac{dx_1}{dt} = f[t, x_1(t), \vartheta(t-\tau)], \qquad t_0 \le t \le t_0+\tau,$$

бу ерда $x_1(t)$ – дифференциал тенгламанинг $[t_0,\ t_0+\tau]$ кесмадаги ечими. Навбатдаги $t\in[t_0+\tau,\ t_0+2\tau]$ кесмада бошланғич функция ролини $x_1(t)$ функция ўйнайди. Шунга ўхшаш тарзда қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\frac{dx_2}{dt} = f[t, x_2(t), x_1(t-\tau)], \qquad t_0+\tau \le t \le t_0+2\tau,$$

бу ерда $t_0+\tau\le t\le t_0+2\tau$ вақт оралиғида $x_2(t)$ ечим учун $x_1(t-\tau)$ бошланғич функция ролини ўйнайди.

Бу жараённи кетма-кет бажара бориб,

$$t_0 + k\tau \le t \le t_\sigma + (k+1)\,\tau,$$

$$x_k\,[t_0+(k+1)\,\tau] = \varphi_k\,[t_0 + (k-1)\,\tau], \qquad k=1,2,\ldots,$$

учун қуйидагига эга бўламиз:

$$\frac{dx_2}{dt} = f[t, x_2(t), x_1(t-\tau)], \qquad t_0 + \tau \le t \le t_0 + 2\,\tau,$$

Шундай қилиб, доимий кечикишга эга дифференциал тенгламанинг ечими аниқланадиган кесма кечикиш ўлчамига тенг бўлган кесмаларга бўлинади. Бу қисмларнинг ҳар бирида кечикишга эга дифференциал тенглама аргументнинг фарқланишига эга бўлмаган мос дифференциал тенглама билан алмаштирилади.

Аммо интеграллашнинг ҳар бир қадамида ҳосил бўладиган одатдаги дифференциал тенгламалар ҳамма ҳолларда ҳам берк шакл ичида ечилавермайди. Бу ҳолат кечикувчи аргументли дифференциал тенгламаларни интеграллашнинг тақрибий усулларини қўллашга асос беради. (1.12) - тенгламани сонли усул билан ечишнинг ҳисоблаш схемаси қадамлар усули билан боғланади: $t_k = t_0 + k\tau$ $(k = 0, 1, \ldots,)$ нуқталар $[t_0, T]$ кесмани қисмларга бўлади, бу қисмларда (1.12)-тенглама аргумент фарқланишига эга бўлмаган дифференциал тенглама билан алмаштирилади. Тегишли қисмларда бу тенгламаларни интеграллаш учун, аргумент фарқланишига эга бўлмаган дифференциал тенгламаларни сонли интеграллашнинг ҳамма маълум усуллари (бу усуллар учун одатий чекланишларда) қўлланилиши мумкин. Сонли усуллардан энг оддийлари Эйлер, Адамс-Штермер, Милн ва бошқалардир. Ишчи формулалар Тейлор қаторининг (75) кесмалари ёрдамида қурилади:

$$X(t_k + h) = x(t_k) = hx(t_k)) + \ldots + \frac{h^n}{n!}x^{(n)}(t_k) \qquad (*)$$

Сонли усулларни қўллашда Тейлор қаторининг (.*.) кесмаси билан ечимни аппроксимациялаш ечимнинг n марта дифференциалланиши мумкинлигини назарда тутади. Бу шартлар одатда бажарилмайди, аммо t нинг ўсиб бориши билан кечикишга эга дифференциал тенгламанинг ечими текисланиб боради. Шунинг учун қуйидаги схема тавсия этилади – ҳисоблашнинг боши, камайтирилган қадам билан Эйлер методи бўйича олиб борилади, кейин эса, ечим етарли даражада текислангач, Адамснинг формулаларидан бирига ўтиш амалга оширилади.

Ҳисоблашнинг h қадамини танлашнинг ҳам маълум талаблари бор. Бир томондан, берилган аниқликка эришиш учун h ҳисоблаш қадами етарли даражада кичик бўлиши керак, аммо h камайтирилганида, машина хотирасида сақланиши керак бўлган оралиқ маълумотларнинг ҳажми ўсади. Ҳақиқатда ҳам, кечикувчи аргументга эга тенгламани қадамлар усули билан $[n\tau, (n+1)\tau]$ $(n = 1,2, \ldots)$ вақт оралиғида еча туриб, аниқланадиган функциянинг k қийматини ҳисоблаш ва машина хотирасида сақлаш зарур, бу ерда $k= \tau/h$. Кўриниб турибдики, масалан $t=2$, $h=0,02$ қиймаларда $k=2*10^2$ сонларни, $h=0,001$ да эса $k=2*10^3$ сонларни ҳосил қиламиз. Оралиқ ахборотнинг бундай ҳажми, эслаб қолувчи қурилма сиғимининг чегараланганлиги туфайли, қийинчиликлар туғдириши мумкин. Бу ҳолат интеграллаш қадами танланаётганида ҳисобга олиниши керак.

Аммо бу ёндошиш кичик кечикишлар бўлганида ўзини оқламайди. Кичик кечикувчи аргументга эга тенглама ҳадини Тейлор қадамига ёйишга асосланган усулдан фойдаланишда, одатда, ёйилманинг бир нечта ҳадлари билан чекланилади, бу ечимни олишда сифатли хатоликларга олиб келади.

Мазкур ишда ривожлантирилган кечикишга эга тизимларни ўрганиш усулларининг ўзига хос хусусияти шундан иборатки, улар, кечикувчи аргументга эга дифференциал тенгламаларни, ечиш жараёни анча осон бўлган алгебраик тенгламаларга айлантиришга имкон берувчи, графли моделлардан [7] фойдаланишга таянади. Графли моделлар кўплаб бошқа афзалликларга ҳам эга, уларнинг ичидан баъзи бирларини: кечикишга эга ҳар хил синф тизимларини ўрганишнинг ягона методологик асосини шакллантириш имкониятини, моделларнинг машинага йўналтирилганлигини, ортиқча ахборот билан иш кўришнинг олиб ташланганлигини, оддий ва кўргазмали эканлигини айтиб ўтиш мумкин.

Сонли ва топологик усулнинг қадамлар методи имкониятларини нисбий баҳолаш учун, бу ерда, топологик методни батафсил кўриб ўтрмасдан, оддий тушунтиришлар билан чегараланган ҳолда, мисол кўрамиз.

Тизимнинг қуйидаги дифференциал тенглама билан баён этилувчи чиқиш сигналини ҳамма $t \geq t_0$ вақт моментлари учун аниқлаш талаб этилади:

$$\frac{dx}{dt} = -ax(t) - bx(t-\tau) + u(t),$$

бунда тизим киришига t_0 вақт дақиқасида $u(t)=1(t)$ таъсир узатилади. Параметрларнинг қийматлари: $a=1$, $b=1$.

Вариант 1. ***Қадамлар усулидан фойдаланиб ечиш.***

Дастлаб t_0, $t_0+\tau$ вақт оралиғида чиқиш миқдорининг шаклланишини кўрамиз. Бу кесмада тескари алоқа занжирининг нол бошланғич шартларга эга чиқишида сигнал бўлмайди, чунки у кечикиш бўғини томонидан кечикиш миқдорига тенг вақтга тўхтатилади. Шундай қилиб, $t \in [t_0, t_0+\tau]$ учун $x(t)$ чиқиш сигналини, 1-тартибли бир жинслимас:

$$\frac{dx}{dt} = -ax(t) + 1$$

дифференциал тенгламани ечиб аниқлаймиз.

Уни ечиш учун маълум усулларнинг биридан фойдаланамиз, масалан параметрлар вариацияси [5]. Бир жинслимас тенгламанинг ечимини $r+1=0$ характеристик тенгламадан топамиз, бу ердан $r= -1$, $x_h = c_1e^{-t}$.

$x_p = ue^{-t}$ деб фараз қилиб:

$$\frac{du}{dt}e^{-t} - ue^{-t} = -ue^{-t} + 1$$

$$\frac{du}{dt}e^{-t} = 1, \qquad u = \int_0^t e^t dt = e^t$$

хусусий:

$$x_p = ue^{-t} = 1$$

ечимни ҳосил қиламиз.

Умумий ечим қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$x = x_h + x_p = C_1e^{-t} + 1$$

Бу ерда C_1 – интегрирлаш доимийси, у $t=0$ вақт дақиқасида тизим ҳолатини тавсифлайди. Нолинчи бошланғич шартларда

$C_1 = -1$ *ва* $x = x_1(t) = 1 - y^{-e}, \quad t \in [0, \tau]$ (*)

ни ҳосил қиламиз. (*) ифодадан $t = \tau$ да x сигналнинг лаҳзалик қийматини топамиз:

$x(\tau) = 1 - e^{-t}$

$x(t)$ функция $t \in [0, \tau]$ вақт оралиғида чиқиш жараёнини тўлиқ аниқлайди.

Кечикиш бўғинидан ўтаётган $x(t) = x_1(t)$ сигнал тизим чиқишига $[\tau, 2\tau]$ вақт оралиғидаёқ таъсир қила бошлайди, тизимнинг бошланғич тенгламасини қуйидаги:

$$\frac{dx}{dt} = -x - x_1(t - \tau) + 1$$

ёки:

$$\frac{dx}{dt} = -x + e^{-(t-\tau)} \qquad (**)$$

кўринишда ёзиш мумкин бўлади.

$t \in [\tau, 2\tau]$ учун $x(t)$ сигнал қийматини топамиз.

Бир жинсли $\frac{dx}{dt} + x = 0$ тенгламани қаноатлантирувчи ечим қуйидаги кўринишда: $x_h = C_2 e^{-(t-\tau)}$

Хусусий ечимни параметрлар вариацияси воситасида топамиз. $x_p = ue^{-(t-\tau)}$ деб фараз қилиб, қуйидагига:

$$\dot{u}e^{-(t-\tau)} - ue^{-(t-\tau)} = ue^{-(t-\tau)} + e^{-(t-\tau)},$$

$$\dot{u}e^{-(t-\tau)} = e^{-(t-\tau)},$$

$$\dot{u} = 1,$$

$$u = \int_{\tau}^{t} dt = t - \tau$$

ва

$$x_p = ue^{-(t-\tau)} = (t-\tau)e^{-(t-\tau)}$$

хусусий ечимга эга бўламиз.

Умумий ечим қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$x = x_h + x_p = C_2 e^{-(t-\tau)} + (t-\tau)e^{-(t-\tau)}$$

бу ерда C_2 - тизим ҳолатини $t=\tau$ вақт дақиқасида тавсифловчи интегрирлаш ўзгармаси. Олдинги кесмадаги ечимдан биз $x(\tau) = 1\text{-}e^{-t}$ га эга бўлдик, бундан $C_2 = 1 - e^{-t}$ келиб чиқади, демак, $t \in [\tau,\ 2\tau]$ вақт дақиқасида тизим чиқишида

$$x(t) = x_2(t) = (1 - e^{-\tau})e^{-(t-\tau)} + (t-\tau)e^{-(t-\tau)}$$ ни

ва $\tau=2\tau$ да чиқиш сигналининг қийматини:

$$x(2\tau) = x_2(2\tau) = e^{-\tau}(1 - e^{-\tau} + \tau)$$

ҳосил қиламиз.

Бундан кейин $t \in [2\tau,\ 3\tau]$ вақт оралиғини кўрамиз. Бу кесмада тескари алоқа занжирининг чиқишидаги $x_2(t\text{-}\tau)$ сигнал бошланғич функция бўлади. Бундан келиб чиқиб, тизим тенгламасини:

$$\frac{dx}{dt} = -x - x_2(t-\tau) + 1$$

ёки

$$\frac{dx}{dt} = -x - [(1 - e^{-\tau})e^{-(t-\tau)} + (t-\tau)e^{-(t-\tau)}] + 1 \qquad (***)$$

кўринишда ёзиш мумкин.

Бир жинсли $\frac{dx}{dt} + x = 0$ тенгламанинг $x_h = C_3\, e^{-(t-\tau)}$ ечимини топамиз.

Хусусий ечимни $x_p = u\, e^{-(t-2\tau)t}$ кўринишида излаймиз.

(***) тенгламага x_p нинг бошланғич қийматини қўйиб, қуйидагига эга бўламиз:

$$\dot{u}e^{-(t-2\tau)} = -(1-e^{-\tau})e^{-(t-2\tau)} + (t-2\tau)e^{-(t-2\tau)} + 1$$

$$u = \int_{2\tau}^{t}(e^{-\tau}-1)dt - \int_{2\tau}^{t}(t-2\tau)dt + \int_{2\tau}^{t}(e^{(t-2\tau)}-1)dt =$$

$$(e^{-\tau}-1)(t-2\tau) - \frac{(t-2\tau^2)}{2} + e^{t-2\tau} - 1$$

$$x_p = [(e^{-\tau}-1)(t-2\tau) - \frac{(t-2\tau^2)}{2} + e^{t-2\tau} - 1]e^{-(t-2\tau)}$$

Умумий ечим қуйидаги кўринишда бўлади:

$$x = x_h + x_p = C_3 e^{-(t-2\tau)} + [(e^{-\tau}-1)(t-2\tau) - \frac{(t-2\tau^2)}{2} + e^{t-2\tau} - 1]e^{-(t-2\tau)}$$

бу ерда C_3 - тизим ҳолатини $t=2\tau$ вақт дақиқасида тавсифловчи интегрирлаш ўзгармаси. Унинг қийматини олдинги кесма ечимидан топган эдик: $C_3 = x_2(2\tau)$.

Бундан [2τ, 3τ] вақт оралиғида чиқиш сигнали қуйидаги функция:

$$x = e^{-(t-2\tau)}(1-e^{-\tau}+\tau)e^{-\tau} + [(e^{-\tau}-1)(t-2\tau) - \frac{(t-2\tau^2)}{2} + e^{t-2\tau} - 1]e^{-(t-2\tau)}$$

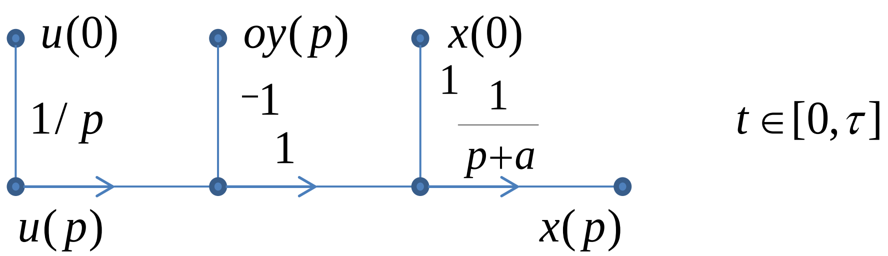
билан баён этилиши келиб чиқади.

Топилган $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ функциялар $t=0$ дан $t=3\tau$ гача бўлган вақт оралиғида тизимнинг чиқиш жараёнини тўлиқ аниқлайди. Юқорида баён этилган жараённи кетма-кет давом эттира туриб, бизни қизиқтирувчи ҳар қандай вақт оралиғидаги ечимни ҳосил қилиш мумкин.

<u>Вариант 2.</u> ***Тизимнинг графли моделидан фойдаланиб ечиш.***

Тизим дифференциал тенгламасидан келиб чиқиб ва τ вақтда тескари алоқа занжирининг чиқишида кечикиш бўғини сигнални ушлаб туришини ҳисобга олиб, тизимни $t \in [0, \tau]$ вақт оралиғидаги ҳаракатини аниқловчи графни *1.2.2, а* расмда ифодаланган кўринишда тасвирлаш мумкин :[17]

а)



1.2. 2, а –расм

Графдан тизимнинг чиқиш сигналини

$$x(p)=\frac{1}{p(p+1)}u(0)+\frac{1}{p+1}x(0),$$

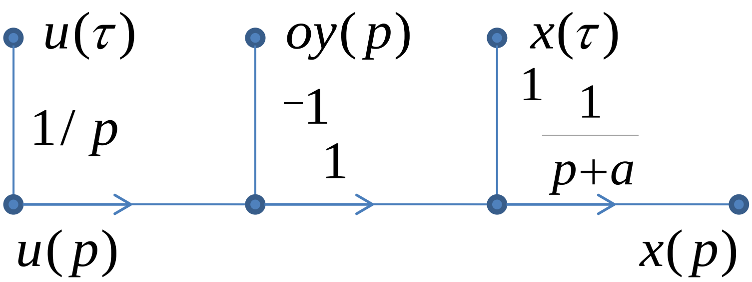
$$x(t)=L^{-1}[\frac{1}{p(p+1)}]u(0)=1-e^{-t}, \quad x(t)=x_1(t)$$

кесмада аниқлаш мумкин.

$x_1(t)$ функция $t\in[0,\ \tau]$ вақт оралиғида тизимнинг чиқиш жараёнини аниқлайди. $t=\tau$ да $x(\tau)=1-e^{-t}$ га эга бўламиз.

$x_1(t)$ сигнал кечикиш бўғинидан ўтгани учун, у тескари алоқа занжирининг чиқишида навбатдаги $[\tau,\ 2\tau]$ вақт оралиғида $y(t)=x_1(t-\tau)$ функция кўринишида намоён бўлади. $x_1(t-\tau)$ сигнал бошланғич функция, унинг лаҳзалик $x(\tau)$ қиймати эса бошланғич $[\tau,\ 2\tau]$ кесмада бошланғич қиймат бўлади. Шу фикрлардан келиб чиқиб, $t\in[\tau,\ 2\tau]$ учун тизим графини қурамиз (1.2.2,б – расм):

б)



$t\in[\tau,2\tau]$

1.2.2 б – расм

Графни кўриб чиқиб,

$$x(p)=\frac{1}{p(p+1)}u(\tau)+\frac{1}{(p+1)}x(\tau)-\frac{1}{p(p+1)^2}$$ ни топамиз.

Охирги муносабатдан қуйидагини топамиз:

$$x(t)=x_2(t)=(1-e^{-\tau})e^{-(t-\tau)}+(t-\tau)e^{-(t-\tau)}$$

$t=\ \tau$ да чиқиш сигналининг қиймати:

$x(2\tau)=x_2(2\tau)=e^{-\tau}(1-e^{-t}+\tau)$ га тенг.

$x(t)=x_2(t)$ функция $t\in[\tau,\ 2\tau]$ кесмада чиқиш жараёнини аниқлайди.

Энди t$\in$[2τ, 3τ] вақт оралиғини кўриб ўтамиз. Тескари алоқа занжирининг чиқишида $y(t) = y_2(t)$ сигнал пайдо бўлади, у бошланғич функция, лаҳзалик $x_2(2\tau)$ қиймат эса – шу вақт оралиғи учун бошланғич қиймат бўлади.

$t\in[2\tau, 3\tau]$ оралиғи учун қуйидагига эга бўламиз:

$$x(p) = x_3(p) = \frac{1}{p(p+1)}u(2\tau) + \frac{1}{(p+1)}x(2\tau) - \frac{1}{(p+1)}x_2(p)$$

Охирги муносабат учун Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини бажариб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$x = e^{-(t-2\tau)}(1-e^{-t}+\tau)e^{-\tau} + [(e^{-t}-1)(t-2\tau) - \frac{(t-2\tau^2)}{2} - 1]e^{-(t-2\tau)} + 1$$

Юқорида кўрсатилган жараённи кетма-кет бажара бориб, навбатдаги вақт оралиқларида ҳам ечимни ҳосил қилиш мумкин бўлади.

<u>Вариант 3.</u> ***Сонли (Эйлер) усулдан фойдаланиб ечиш*** [4].

Эйлер усулидан фойдаланиб, $a=1$, $b=1$, $\tau=2$, $u(t)=1$ қийматларда [0, 2] кесмада $h=0.2$ қадам билан $x(t_0)=x(0)=0$ бошланғич шартларни ва $x(t-\tau)=\varphi_0(t)=0$ бошланғич функцияни қаноатлантирувчи:

$$\frac{dx}{dt} = -ax(t) - bx(t-\tau) + u(t)$$

дифференциал тенглама интегралининг тақрибий қийматлари жадвалини тузамиз. Ҳамма ҳисоблашларни учта ўнлик хоналар аниқлиги билан олиб борамиз. Топилган ечимни берилган бошланғич қийматларда қадамлар ва топологик усуллар билан олинган ечимлар билан таққослаймиз.

$x' = f(t,x)$ тенглама учун Эйлер усули, $[i\tau,(i+1)\tau]$ кесмада $(i=0,\ 1,\ \dots,\ )$ $x_k = x(t_k)$ қийматларни (бу ерда $t_k = t_0+k_h$, $k=0,\ 1,\ \dots,\ n;$ $h=\tau/n$) ҳисоблашдан иборат. X_{k+1} нинг қийматлари қуйидаги формула билан аниқланади:

$$x_{k+1} = x_k + hf(t_k, x_k); \qquad (k=0,\ 1,\ \dots,\ n-1)$$

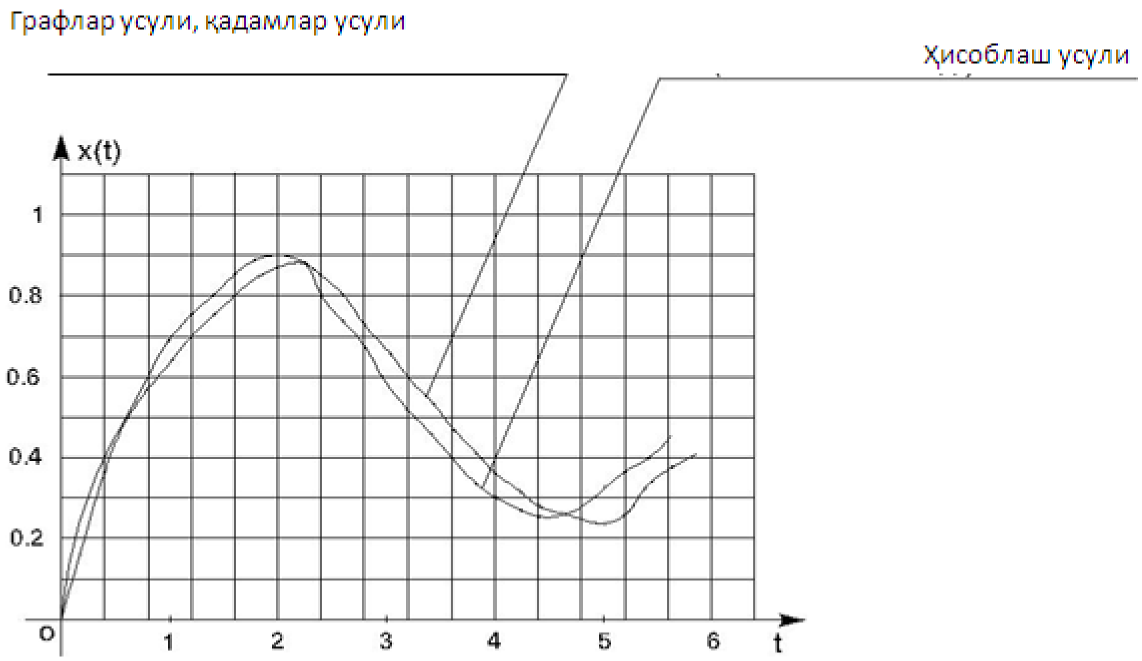
Ҳар бир қадамдаги ҳисоблаш хатолиги $R_k = 0.5h^2x''(\varepsilon)$ га тенг бўлади, бу ерда $t_k \le \varepsilon \le t_{k+1}$.

Мазкур тенгламани *[0, τ]* кесмада ечиш қуйидаги формула билан:

$x_{k+1} = x_k + 0{,}2(-x_л + 1);$ *k=0, 1, …, 10;*

[τ, 2τ] кесмада: $x_{k+1} = x_k + 0{,}2(-x_л - \varphi_1^{k+1} + 1);$ *k=0, 1, …, 10*;

бу ерда $\varphi_1^{л+1} = x_{k+1}(t_{k+1)} - \tau);$



1.2.2, в –расм

[2τ, 3τ] кесмада: $x_{k+1} = x_k + 0{,}2(-x_л - \varphi_2^{k+1} + 1);$ k=0, 1, …, 10;

бу ерда $\varphi_2^{л+1} = x_{k+1}(t_{k+1)} - \tau)$ ва ҳ.к. тарзда иш олиб борилади.

1-жадвал

	R	t_k	Эйлер усули	Қадамлар усули	Топологик усул
			y_k	y_k	y_k
I	0	0	0	0	0
	1	0.2	0.2	0.182	0.181
	2	0.4	0.36	0.33	0.33
	3	0.6	0.488	0.451	0.451
	4	0.8	0.59	0.551	0.551
	5	1	0.672	0.632	0.632
	6	1.2	0.738	0.699	0.699
	7	1.4	0.79	0.753	0.753
	8	1.6	0.832	0.798	0.798
	9	1.8	0.886	0.835	0.835
	10	2	0.893	0.865	0.865
II	0	2	0.893	0.893	0.865
	1	2.2	0.874	0.873	0.873
	2	2.4	0.827	0.848	0.848
	3	2.6	0.764	0.804	0.804
	4	2.8	0.693	0.748	0.748
	5	3	0.62	0.686	0.686
	6	3.2	0.5484	0.6225	0.6225
	7	3.4	0.481	0.559	0.559
	8	3.6	0.418	0.538	0.538
	9	3.8	0.361	0.441	0.441
	10	4	0.310	0.388	0.388
III	0	4	0.310	0.388	0.388
	1	4.2	0.273	0.341	0.341
	2	4.4	0.253	0.3045	0.3045
	3	4.6	0.25	0.280	0.280
	4	4.8	0.2615	0.272	0.272
	5	5	0.2852	0.2725	0.2725
	6	5.2	0.3185	0.265	0.265
	7	5.4	0.359	0.309	0.309
	8	5.6	0.404	0.338	0.338
	9	5.8	0.451	0.375	0.375
	10	6	0.499	0.414	0.414

Жадвал тузамиз, унга τ нинг берилган бошланғич шартлари ва қийматларида дифференциал тенглама интегралларининг Эйлер усули билан топилган тақрибий қийматларини, қадамлар ва топологик усуллар билан топилган аниқ қийматларини киритамиз (1-жадвал).

1.2.2, в –расмда ҳосил бўлган функцияларнинг графиклари берилган.

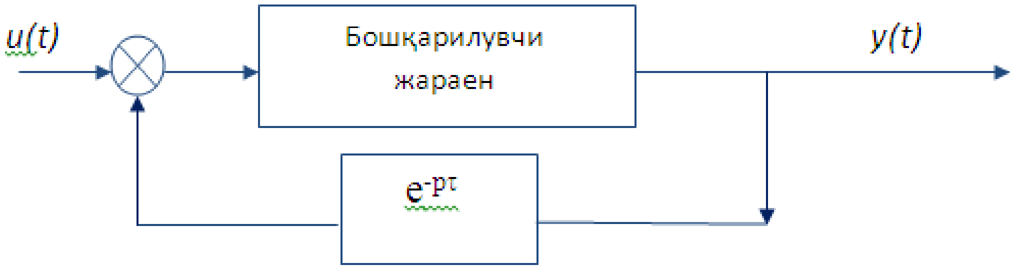
Шундай қилиб, мисолдан топологик усулнинг афзаллиги кўриниб турибди. Графли усулдан фойдаланиш тизим баёни ва таҳлилини маълум даражада енгиллаштиради, кечикувчи аргументга эга дифференциал тенгламани бевосита интегрирланишининг олдини олади.

1.3. Ҳолат ўзгарувчиларининг кечикишга эга чизиқли стационар тизимини баён этиш. Ўткинчи ҳолатлар графи.

Тескари алоқа занжирида кечикишга эга n-тартибли чизиқли стационар тизимни (1.3.1-расм) қуйидаги n-тартибли дифференциал тенгламалар кўринишида [9] баён этиш мумкин:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_0 y(t) + y(t-\tau) = u(t) \qquad (1.14)$$

бу ерда $a_n \neq 0$, a_k ($k = 0, 1, \ldots, n$), b – ўзгарувчилар.



1.3.1-расм

Вақтнинг ҳамма $t \geq t_0$ дақиқалари учун тизимнинг чиқиш сигналини излаб топиш масаласини қўямиз. t_0 вақт дақиқасида тизим киришига u(t) таъсир узатилади.

Агар бу тенгламада b=0 бўлса, унда оддий дифференциал тенгламани ҳосил қиламиз:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}y(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_0 y(t) = u(t) \qquad (1.15)$$

Маълумки, (1.15) – тенглама билан баён этилувчи тизим учун берилган кириш функцияси учун чиқиш функциясини ягона тарзда аниқловчи n та боғлиқмас бошланғич шартларни бериш мумкин. Ўзгарувчиларнинг бу тўпламини t_0 дақиқадаги ҳолат, деб баҳолаш мумкин. Бундан ҳолат ўзгарувчиларининг чиқиш функциясидан қуйидаги оддий боғлиқлиги чиқарилади:

$x_1 = y;$

$x_2 = \dot{y} = x_1$

$x_3 = \ddot{y} = \dot{x}_1$

...

$x_n = y^{(n-1)} = \dot{x}_{n-1}$.

$x_n = y^{(n)} = -\frac{a_0}{a_n}x_1 - \frac{a_1}{a_n}x_2 - ... - \frac{a_{n-1}}{a_n}x_n + \frac{1}{a_n}u$.

Юқорида баён этилганидан, ҳолат тенгламасини стандарт шаклда ёзишнингосонлиги келиб чиқади [10]:

$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t);$ (1.16)

$Y(t) = CX(t) + Du(t).$ (1.17)

Бу ерда

A – коэффициентлар матрицаси;

B – бошқариш матрицаси;

C – кириш матрицаси;

В – тизимни четлаб ўтиш матрицаси.

Агар тизим ҳолатининг катталаштирилган ўлчамдаги вектори ҳосил қилинса:

$$V(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ X(t) \end{bmatrix}, \qquad (1.18)$$

Унда чизиқли стационар тизим қуйидаги тенглама билан баён этилиши мумкин:

$$\frac{dV(t)}{dt} = AV(t) \quad (1.19),$$

бу ерда А – коэффициентлар матрицаси.

$V(t)$ – кириш ўзгарувчисини ва x_k тизимнинг координаталарини ўз ичига олган вектор-устун.

Лапласнинг тўғри шакл алмаштиришини (1.19)-тенгламага қўллаб қўйидагини ҳосил қиламиз:

$$V(p) = [pI(i) - A]^{-1} V(0^+), \quad (1.20),$$

бу ерда $I(i)$ – бирлик матрица.

$$\phi(t) = L^{-1}([pI(i) - A]^{-1}), \quad (1.21)$$

деб белгилаб, қуйидагига эга бўламиз:

$$V(t) = \phi(t) V(0^+),$$

бу ерда $\phi(t$) матрица тизимнинг кенгайтирилган матрицаси сифатида маълум. .

Тескари алоқа занжирида n-тартибли кечикишга эга чизиқли стационар тизим ҳаракатини баён этувчи (1.14)-тенгламага қайтиб келамиз. Бу тенгламани қуйидагича: вектор-матрица шаклида ёзиш мумкин:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + B(u) + C\varphi(t - \tau). \quad (1.23)$$

Агар бошланғич шартлар ва $[t_0 - \tau, t_0]$ бошланғич тўпламда аниқланган бошланғич $\varphi_0(t) = x_1(t - \tau)$ функция берилган бўлса, унда $[0, \tau]$ кесмада Лапласнинг тўғри шакл алмаштиришини (1.23)-тенгламага қўллаб, қуйидагига эга бўламиз:

$$\begin{aligned} &pX(p) - X(0^+) = AX(p) + Bu(p) + C\varphi_0(p) \\ &X(p) = [pI(i) - A]^{-1} Bu(p) + [pI(i) - A]^{-1} C\varphi_0(p) + [pI(i) - A]^{1} X(0^+) \end{aligned} \quad (1.24)$$

(1.24)-тенгламадан ҳосил қилиш мумкин бўлган $x_1(t)$ функция $[\tau, 2\tau]$ вақт оралиғи учун бошланғич функция бўлади (аниқроғи Лаплас бўйича бошланғич функциянинг ифодаси бўлади). Шунинг учун қуйидаги белгилашни киритамиз:

$$\varphi_1(p) = x(p).$$

Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини (1.24)-тенгламага қўллаб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$X(p)=L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}Bu(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}C\varphi_0(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1})X(0^+) \quad (1.25)$$

(1.25)-тенглама тизимнинг ҳаракатини *[0, τ]* кесмада баён этади. Бу ечимдан *[τ, 2τ]* кесмада фойдаланиб, шунга ўхшаш ифодани ҳосил қиламиз:

$$X(p)=[pI(i)-A]^{-1}Bu(p)+[pI(i)-A]^{-1}C\varphi_0(p)+[pI(i)-A]^{1})X(\tau)$$

Ундан:

$$X(t)=L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}Bu(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}C\varphi_1(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1})X(\tau)$$

(1.26)

Бу жараённи кетма-кет бажара бориб, бизни қизиқтирувчи ҳар қандай вақт оралиғи учун ечимни топиш мумкин бўлади:

$$X(p)=[pI(i)-A]^{-1}Bu(p)+[pI(i)-A]^{-1}C\varphi_k(p)+[pI(i)-A]^{1})X(k\tau) \quad (1.27)$$

бундан

$$X(t)=L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}Bu(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1}C\varphi_k(p))+L^{-1}([pI(i)-A]^{-1})X(k\tau)$$

(1.28)

бу ерда: $k\tau \le t \le (k+1)\tau, \quad k=1, 2, \ldots$

Шундай қилиб, доимий кечикишга эга чизиқли стационар ҳолатли тизимнинг тенгламаси вектор шаклда ёзилиши ва Лаплас шакл алмаштирилишидан фойдаланиб, ечилиши мумкин. Бундан, биз ҳар хил мураккаб тузилмали тизимларнинг турли синфларини ўрганишнинг қувватли воситаси бўлган графлар назарияси аппаратидан фойдаланиб, ечимни ҳосил қилишимиз мумкинлиги келиб чиқади. Кўрилаётган тизим синфлари учун ўткинчи ҳолатларнинг графларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқдир (18).

Таъриф. Ўткинчи ҳолат графи деб ўткинчи ҳолатлардаги $V(\lambda)=[u(\lambda), X(\lambda)]$ ҳолатлар векторининг ташкил этувчиларига тенг учларга ва кенгайтирилган ўтиш матрицаси $\Phi(\lambda)$ коэффициентларига тенг ёй узатмаларига эга бошланғич ҳолат $V(0^+) = [u(0^+), X(0^+)$ векторига эга тизим схемаси бўйича ҳосил қилинган йўналтирилган ўлчамли графга айтамиз [7].

$$\phi(\lambda) \;=\; \begin{bmatrix} a_{11}(\lambda) & a_{12}(\lambda) & \ldots & a_{1m}(\lambda) \\ a_{21}(\lambda) & a_{22}(\lambda) & \ldots & a_{2m}(\lambda) \\ \ldots) & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{m1}(\lambda) & a_{m2}(\lambda) & \ldots & a_{mm}(\lambda) \end{bmatrix} \tag{1.29}$$

Узлуксиз тизимлар таҳлил қилинганида $\Phi(\lambda)$ даги λ t га, дискрет тизимлар бўлган ҳолда $0\leq \lambda\leq t$ учун $\lambda=t\text{-}nT$ га тенг. Агар бошланғич шартлар берилган ва Ф(λ) матрица маълум бўлса, унда, шу ўзгарувчи ҳолатларини баён этувчи вақт функциясини топиш осон бўлади. Ўтиш матрицаси қуйидаги муносабатдан аниқланиши мумкин (58):

$$\Phi(\lambda) = e^{-A\lambda} \tag{1.30}$$

$$\Phi(\lambda) = L^{-1}([pI(i)]^{-1}) \tag{1.31}$$

Аммо $\Phi(\lambda)$ матрица элементларини бевосита ўткинчи ҳолатлар графлари бўйича (ЎҲГ) бажариш мумкин. Граф бўйича мос бўғинлар ўртасидаги узатишни Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини қўллаб ҳисоблаш билан, (1.30) ёки (1.31) - га кўра биз $\Phi(\lambda)$ матрицанинг $a_{ij}(\lambda)$ элементларини аниқлаймиз.

Буни намойиш этиш учун қуйидаги дифференциал тенгламалар билан баён этилувчи тизимни кўрамиз:

$$\ddot{u}(t) + 5\dot{y}(t) + 6y(t) = u(t); \qquad u(t) = 1(t).$$

Ўткинчи ҳолатлар графини қуриш ва $\Phi(t)$ ўтиш матрицасини аниқлаш талаб қилинади.

1. 1-тартибли тенгламалар системасига ўтамиз:

$$\dot{u} = 0$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -6x_1 - 5x_2 + u$$

бу ерда $x_1=y$.

Ҳосил бўлган тенгламалар тизимини қуйидагича матрица кўринишида ёзиш мумкин:

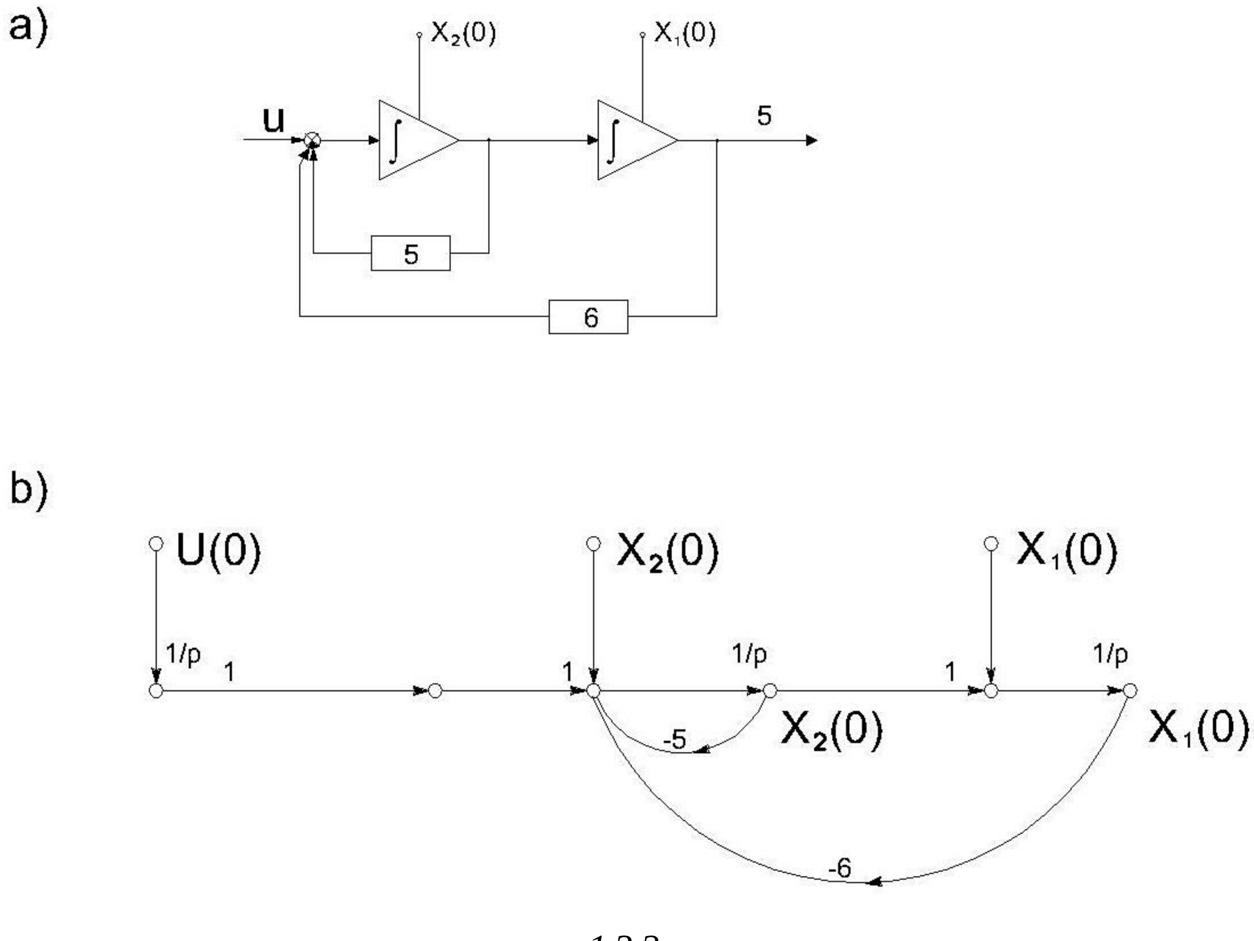
$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -6 & -5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ x(0) \\ x(0) \end{bmatrix}$$

2. Ўткинчи ҳолатлар схемаси ва графи мос равишда 1.3.2 а, б расмларда берилган.

3. V(t) векторни аниқлаймиз:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & a_{13}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & a_{23}(t) \\ a_{31}t) & a_{32}(t) & a_{33}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Изланаётган *Ф(t)* ўтиш матрицасининг $a_{ij}(t)$ элементлари қуйидаги тарзда аниқланади. ЎҲГ бўйича, Мезон қоидасидан фойдаланиб, i ва j бўғинлар ўртасидаги узатиш сифатида $a_{i.j}(p) \in Ф(t)$ ни аниқлаймиз, яъни $a_{i.j}(p) = x_i/x_j$..



1.3.2.- расм

Агар ҳар бир $a_{i.j}(p)$ элементга Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини қўлласак, $\Phi(t)$ матрицани ҳосил қиламиз.

Графни кўриб чиқиб, қуйидагига эга бўламиз:

$$x_1(p)=\frac{1}{p(p+2)(p+3)}u(0)+\frac{p+5}{(p+2)(p+3)}x_1(0)+\frac{1}{(p+1)(p+2)}x_2(0);$$

$$x_{21}(p)=\frac{1}{(p+2)(p+3)}u(0)+\frac{-6}{(p+2)(p+3)}x_1(0)+\frac{p}{(p+1)(p+2)}x_2(0);$$

Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини бажариб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$x_1(t)=(-.5e^{-2t}+0.3e^{-3t}+0.16)u(0)+(3e^{-2t}-2e^{-3t})x_1(0)+(e^{-2t}-e^{-3t})x_2(0);$$

$$x_{21}(t)=(e^{-2t}-e^{-3t})u(0)+(-6e^{-2t}+6e^{-3t})x_1(0)+(-2e^{-2t}+3e^{-3t})x_2(0);$$

бундан:

$$\Phi(t)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -.5e^{-2t}+3e^{-3t}+16 & 3e^{-2t}-2e^{-3t} & e^{-2t}-e^{-3t} \\ -.5e^{-2t}+3e^{-3t}+16 & -6e^{-2t}+6e^{-3t} & -2e^{-2t}+3e^{-3t}+16 \end{bmatrix}$$

1.4 Доимий кечикишга эга чизиқли стационар тизим динамикасини ўрганишнинг графли моделлари ва алгоритмлари

Кечикишга эга тизимлар фақат уларга хос бўлган бир қатор хоссаларга эга. Динамик тизимларда содир бўладиган жараёнлар тўғрисидаги одатдаги тассавурларга нисбатан бу хоссалар одатдагидек эмас. Масалан, хотирага эга тизим ҳолатининг (кечикишга эга тизимлар шу синфга тегишли) ўтиш функциясининг кўриниши нафақат бошланғич шартларга, балки ҳолат бошланғич реакциясининг қандайдир бир функциясига ҳам боғлиқ. Бу функция чиқиш жараёнининг бошланишидан олдин келган вақт кесмасида берилади. Бу шартлар, бошқалари билан бир қаторда, бу тизимларнинг графли моделларига ҳам ўзига хос хусусиятларни киритади [4].

Доимий кечикишга эга чизиқли стационар тизимнинг алоҳида элементларини графли моделлаш моҳиятини тушунтирамиз ва, бир вақтда, олиб борилаётган тадқиқотларнинг мақсадини аниқроқ тушуниш учун, тизимда содир бўлаётган жисмоний жараёнларга эътиборни қаратамиз.

Қуйидаги тенгламани кўрамиз:

$$\frac{d^n u(t)}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}u(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_0 y(t) + by(t-\tau(t)) = u(t)). \qquad (1.33)$$

Агар $b=0$ деб фараз қилсак, кечикиши бўлмаган чизиқли стационар бошқариш (жараён) объектинингдифференциал тенгламаларини ҳосил қиламиз:

$$\frac{d^n u(t)}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}u(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_0 y(t) = u(t)). \qquad (1.34)$$

Уни моделирлаш қийинчилик туғдирмайди. Тенгламалар билан баён этиладиган жараён ЎҲГ (ўткинчи ҳолатлар графи) сини ҳосил қилишнинг иккита тенг кучли усулини эслатамиз (1.34).

Тўғридан-тўғри дастурлаш. Ўзгарувчи ҳолатлардан фойдаланиб, дифференциал тенгламалар бўйича тизим ЎҲГ(ўткинчи ҳолатларининг графи)ни ҳосил қилиш мумкин (1.4.1.а расм):

Бу усул тўғридан-тўғри дастурлаш дейилади. Ҳолат ўзгарувчилари сифатида интеграторларнинг чиқишлари танланади. ЎҲГ мазкур дифференциал тенгламани қаноатлантириш шартидан келиб чиқиб, қурилади. Интеграторларнинг чиқишларига мос келувчи бўғинлар битта бўғинда, узатишлари тенгламанинг мос коэффициентларига тенг бўлган, ёйлар билан уланади.

Кетма-кет дастурлаш. Бевосита, дифференциал тенгламадан (1.34) кечикишсиз, бошланғич энергияси бўлмаган чизиқли тизимнинг узатиш функциясини ёзиш мумкин:

$$H(p) = \frac{1}{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + ... + a_1 p + a_0} = \frac{1}{D(p)}$$

Агар $D(p)$ кўп ҳаднинг илдизларини ҳар хил, деб фараз қилсак, унда $D(p)$ ни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин бўлади:

$$D(p) = (p-\lambda_1)\,(p-\lambda_2)\,\ldots\,(p-\lambda_n) \qquad (1.35)$$

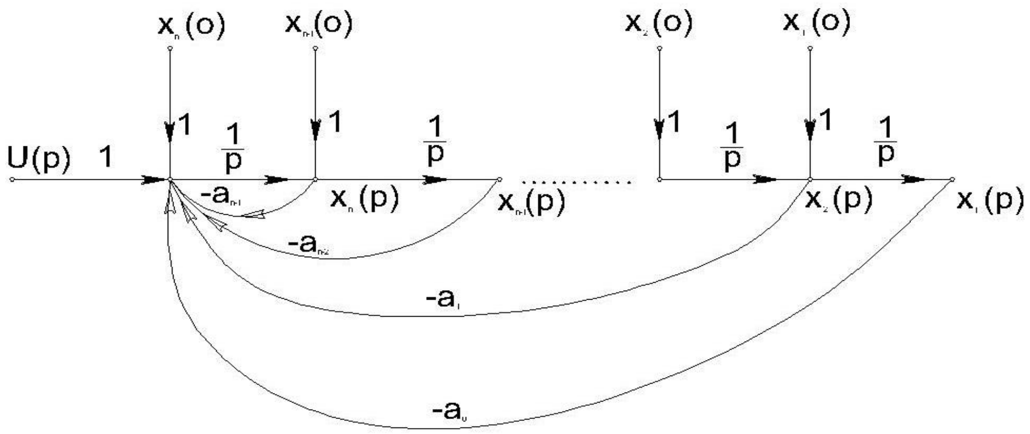
Бу ерда λ_i – кўрилаётган тизимнинг характеристик тенгламаси. Унда узатиш функцияси қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$H(p) = \frac{1}{(p-\lambda_1)(p-\lambda_2)\ldots\ (p-\lambda_n)} \qquad (1.36)$$

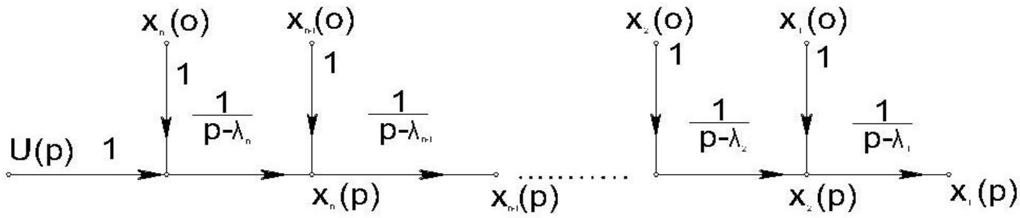
Натижада 1.4.1.б расмда тасвирланган ЎҲГ ҳосил бўлади. Мазкур усул кетма-кет дастурлаш усули сифатида маълум.

Шундай қилиб, биз ЎҲГ ни қуришнинг иккита усулини кўрдик. Табиий ҳол, бошқа тенг кучли тақдимотлар ҳам бўлиши мумкин.

а)



б)



1.4.1.- расм

Кўриниб турибдики, графнинг ҳар бир ёйи тармоқ узаткичи деб аталувчи t_{ik} сон (функция) билан боғланган, ҳар бир уч (бўғин) эса, у билан боғлиқ бўлган бўғин сигнали деб аталувчи x_i миқдорга эга. Ўтиш матрицасининг мос элементи бўлган графнинг a_{ij} узаткичи j боғлиқ бўғинда пайдо бўладиган сигналнинг i-

манба сигнали нисбатига тенг бўлади ($a_{ij}=x_j/x_i$) ва ЎҲГ бўйича Мэзон формуласи асосида аниқланади (31):

$$a_{ij} = \frac{[(p_1 + p_{21} + ... + p_n)(1-L_1)(1-L_2)...(1-L_m)]^*}{[(1-L_1)(1-L_2)...(1-L_m)]^*} \qquad (1.37)$$

Бу ерда

p - граф йўлининг узатиш;

L – контурни узатиш;

* - “контурлар ва йўллар кўпайтмасига эга бўлган ҳадларни тушириб қолдиринг”, деган маънони билдиради.

Графдан $y(t)$ нинг чиқиши ($x_i(t)$) нинг ва $u(t)$ кириш таъсири координаталарининг чизиқли комбинацияси кўринишида осон топилади.

Кечикувчи сигнални моделирлаш. Қандайдир бир t_0 дақиқадан бошлаб кечикувчи тизимнинг ҳаракатини аниқлаш учун, кириш таъсири ва бошланғич шартларни беришдан ташқари, яна бошланғич функцияни ҳам бериш кераклигини гапириб ўтган эдик. (1.33)-тенглама билан баён этилувчи тизим учун бошланғич функция t_0 дақиқада кечикиш бўғинида “ёзилган” $x_1(t)$ функциянинг кесмасидир. Бу $x_1(t)$ функция кесмаси $[t_0-\tau,t_0]$ вақт оралиғида, яъни аниқланилаётган чиқиш жараёни ривожланишининг бошланишига қадар аниқланган. Бошқача қилиб айтганда, $[t_0-\tau,t_0]$ вақт оралиғида кечикиш бўғини t_0 дақиқадан олдин пайдо бўлган $x_1(t)$ миқдорнинг ҳамма қийматларига эга бўлган сигнални беради [17].

Изоҳ. Агар тизимга кириш таъсирини илова қилиш дақиқасигача энергия заҳираланган бўлса, унда, қуйидаги тенгликларни қаноатлантирувчи бошланғич функциянинг аниқ кўринишини, нолинчи бошланғич шартлар ҳолида $\varphi(t) = x_1(t)$, $t \in [t_0-\tau, t_0]$ бериш зарур:

$$\varphi(t) = x_1(t), \qquad t \in [t_0-\tau, t_0]$$

$\varphi(t_0) = x_1(t_0)$,

Амалий масалаларда бошланғич функция баъзан тажриба йўли билан топилади. Бошланғич функция бошқа тенгламадан аргумент фарқланишисиз (у автоматик бошқаришнинг баъзи бир масалаларида тескари алоқа ҳаракати бошланадиган дақиқагача жараённи баён этади) аниқланиши мумкин. Аммо кўпинча олдиндан, қўзғалмаган тизим ҳаракати кўриб чиқилади ва чиқиш жараёнининг кўриниши аниқланади, кейин эса унинг алоҳида қисмлари бошланғич функциялар тарзида ишлатилади.

Қурилаётган тизимда содир бўлаётган ҳодисаларнингфизик кўриниши ҳисобга олинганда, кечикувчи ёки бошланғич функциянинг Лаплас бўйича тасвири билан ўлчанган бўғини кечикувчи сигналнинг модели бўлади. Бу бўғин, тизим тузилмасига мос тарзда, -1 га денг бўлган узатиш ёйи, тизим киришини моделирловчи учи (чўққиси) билан уланади. Кечикиш бўғинининг хоссасидан келиб чиқиб, сигнал даражасида қуйидаги тенгсизлик ўринли бўлади:

$$Z(t) \neq x_1(t),$$

бу ерда $Z(t)$ кечикиш бўғинининг чиқиш сигнали.

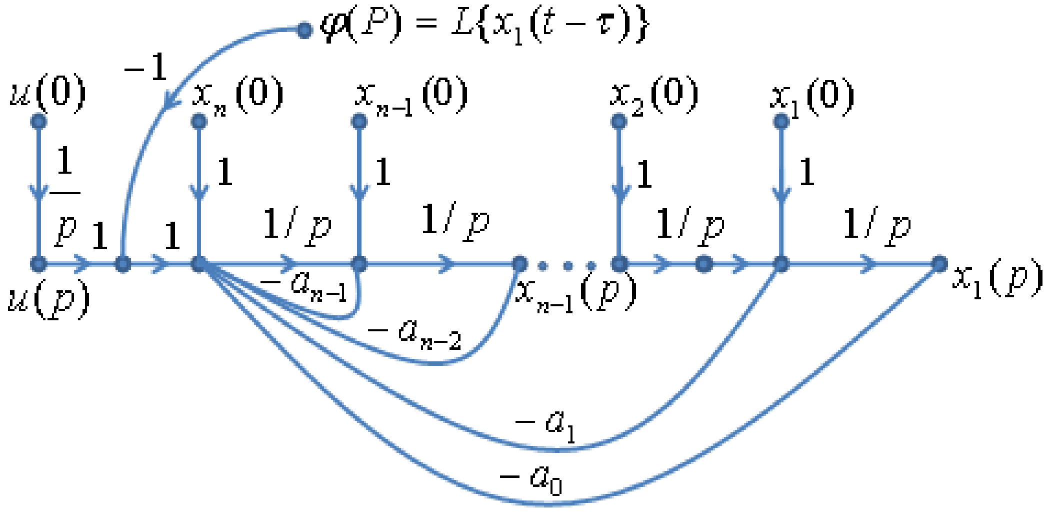
Бундан шундай хулоса келиб чиқади, $Z(t)$ ва $x_1(t)$ сигналарни тавсифловчи граф учлари ҳар хил, яъни тизимда содир бўлаётган сигналга нисбатан, тескари алоқанинг кечикувчи бўғин орқали контури бўлмайди. Демак тизим унда содир бўлаётган сигналарга нисбатан очиқ бўлади. Бу муҳим хулоса, чунки мураккаб конфигурацияли графлар учун йўларни ва контурларни ҳисоблаш ва ажратиш толиқтирадиган иш бўлиши мумкин. Графли моделарни қуришда, ҳамма вақт, мумкин бўлгунча, энг кичик сонли контурларга эга бўлган графни олишга интилиш керак.

Тескари алоқа занжирида кечикишга эга чизиқли стационар тизимнинг топологик модели тизим элементлари графли моделарининг бирлашмаси сифатида аниқланади:

$$G^C = G^f \cup G^0 \cup G^{3C}$$

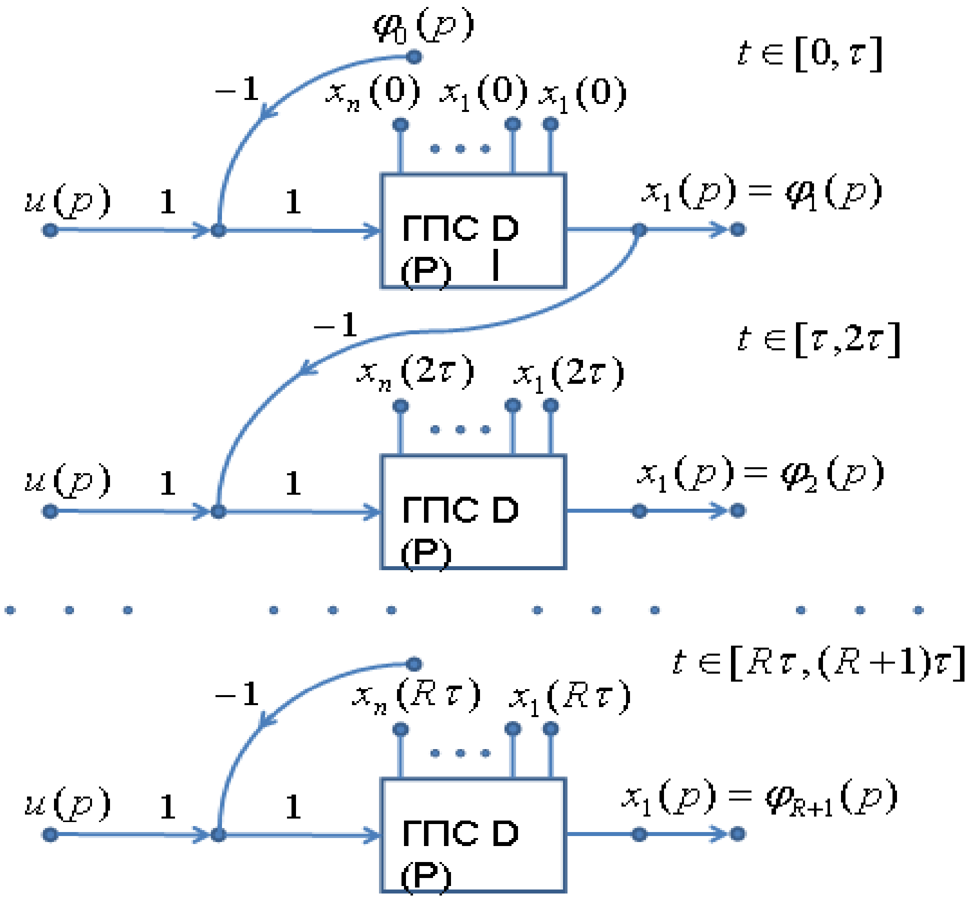
бу ерда:

а)



$\varphi(P) = L\{x_1(t-\tau)\}$
-1
$u(0)$
$x_n(0)$
$x_{n-1}(0)$
$x_2(0)$
$x_1(0)$
$\frac{1}{p}$
1
1
$1/p$
$1/p$
$1/p$
$1/p$
$u(p)$
$x_{n-1}(p)$
$x_1(p)$
$-a_{n-1}$
$-a_{n-2}$
$-a_1$
$-a_0$

б)



$\varphi_0(p)$
$t \in [0, \tau]$
-1
$x_n(0)$ $x_1(0)$ $x_1(0)$
$u(p)$ 1 1
ГПС D (P)
$x_1(p) = \varphi_1(p)$
-1
$t \in [\tau, 2\tau]$
$x_n(2\tau)$ $x_1(2\tau)$
$u(p)$ 1 1
ГПС D (P)
$x_1(p) = \varphi_2(p)$
$t \in [R\tau, (R+1)\tau]$
-1
$x_n(R\tau)$ $x_1(R\tau)$
$u(p)$ 1 1
ГПС D (P)
$x_1(p) = \varphi_{R+1}(p)$

1.4.2 - расм

G^f – кириш сигналининг модели (кечикишга эга бўлмаган чизиқли жараённинг моделига ўхшаш тарзда қурилади);

G^0 - кечикишга эга бўлмаган чизиқли объектнинг (жараённинг) модели;

$G^{ЗC}$ - кечикувчи сигнал модели.

Тизим ҳаракатини $kt \leq t \leq (kt+1)\tau$ кесмада моделирловчи топологик модел 1.4.2, а расмда ифодаланган.

Бу ерда тўғридан-тўғри дастурлаш усули билан ҳосил қилинган ЎҲГ дан фойдаланилган. Графли моделнинг $kt \leq t \leq (kt+1)\tau$ кесмадаги тузилмаси ўзгармайди, фақат $\varphi(p)$ бўғин вазни ва бошланғич шартлар ўзгаради, бу нарса $[t_0, T]$ оралиқ учун $(T = (k+1)\tau)$ жараёнлар аниқланадиган умумий топологик моделдан ҳам кўриниб турибди (1.4.2,б-расм).

Граф моделни кўриб чиқиб, $t \in [0, \tau]$ кесмада ўзгарувчи ҳолатлар учун тенглама ҳосил қиламиз:

$$X(p) = Q(p)X(0) + R(p)u(0) + S(p)\varphi_0(p), \qquad (1.38)$$

Бу ерда коэфициентлар матрицалари $Q(p) \rightarrow n * n$, $R(p) \rightarrow n*m$, $S(p) \rightarrow n*m$ ўлчамларга эга.

$\varphi_1(p) = X_1(p)$ белгилашни киритамиз. Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини (1.38)-тенглама учун қўлаб, қуйидагига эга бўламиз:

$$X(t) = Q(t)X(0) + R(t)u(0) + D_0(t), \qquad (1.39)$$

Бу ерда $D_0(t) = L^{-1}[S(p)\varphi_0(p)]$.

(1.39)-тенглама тизимда $[0, \tau]$ вақт оралиғидаги жараёнларни баён этади. Оралиқ охирида, (1.39)-тенгламадан келиб чиқиб, ҳолат ўзгарувчилари қийматлари қуйидагига тенг бўлади:

$$X(\tau) = Q(\tau)X(0) + R(\tau)u(0) + D_0(\tau t), \qquad (1.40)$$

Навбатдаги $[\tau, 2\tau]$ кесмада тизимдаги жараёнлар 3 та фактор таъсирида ривожлана бошлайди, бу факторлар: $u(t)$ – кириш таъсири, $x_1(\tau), x_2(\tau), . x_n(\tau)$ кординаталарнинг бошланғич қийматлари ва τ дақиқада кечикиш бўғинида “ёзилган” $x_1(t)$ функция кесмасининг факторлари. Бу, олдинги кесмада биз томонимиздан топилган, $\varphi_1(t)$ функция бўлади. Айнан унинг берилиш зарурияти кечикишга эга тизимнинг одатдаги динамик тизимдан бўладиган принципиал фарқланишини аниқлайди. Граф моделни кўриб чиқишдан қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$X(p) = Q(p)X(\tau) + R(p)u(\tau) + S(p)\varphi_1(p), \qquad (1.41)$$

$\varphi_2(p) = x_1(p)$, деб белгилаш киритамиз.

Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини (1.41)-тенгламага қўллаб, ҳосил қиламиз:

$$X(t) = Q(t\text{-}\tau)X(\tau) + R(t\text{-}\tau)u(\tau) + D(t\text{-}\tau) \qquad (1.42),$$

бу ерда $D_1(t\text{-}\tau) = L^{-1}[S(p)\varphi_1(p)]$.

Кординаталарнинг $t\in[\tau,\ 2\tau]$ кесманинг охиридаги лаҳзалик қийматларини қуйидаги муносабатдан ҳосил қиламиз:

$$X(2\tau) = Q(\tau)X(\tau) + R(\tau)u(\tau) + D(\tau) \qquad (1.43)$$

Ҳосил қилинган $X(2\tau)$ бошланғич шартлар ва бошланғич $\varphi_2(t)$ функция вақтнинг кейинги $t\in[\tau,\ 2\tau]$ вақт оралиғида жараёнларни аниқлаш учун зарур. Юқорида баён этилган жараённи $t\in[k\tau,\ (k+1)\tau]$ кесма учун кетма-кет, қадамба-қадам бажара бориб, қуйидагига эга бўламиз:

$$X(p) = Q(p)X(k\tau) + R(p)u(k\tau) + S(p)\varphi(p), \qquad (1.44),$$

бундан:

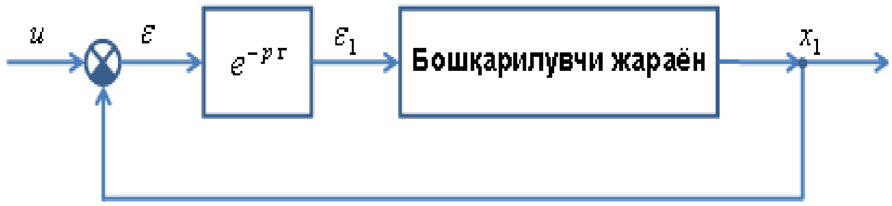
$$X(t) = Q(t\text{-}k\tau)X(k\tau) + R(t\text{-}k\tau)u(k\tau) + D_k(t\text{-}k\tau) \qquad (1.45)$$

бу ерда: $D_k(t\text{-}k\tau) = L^{-1}[S(p)\varphi_k(p)]$.

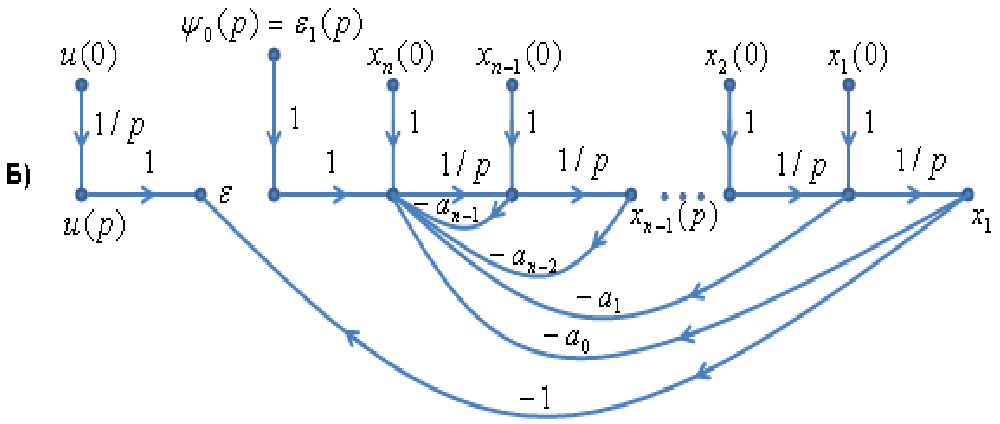
$$X[(k+1)] = Q(\tau)X(k\tau) + R(\tau)u(k\tau) + D_k(\tau) \qquad (1.46)$$

Амалиётда кўп учрайдиган яна битта ҳолни кўриб чиқамиз.

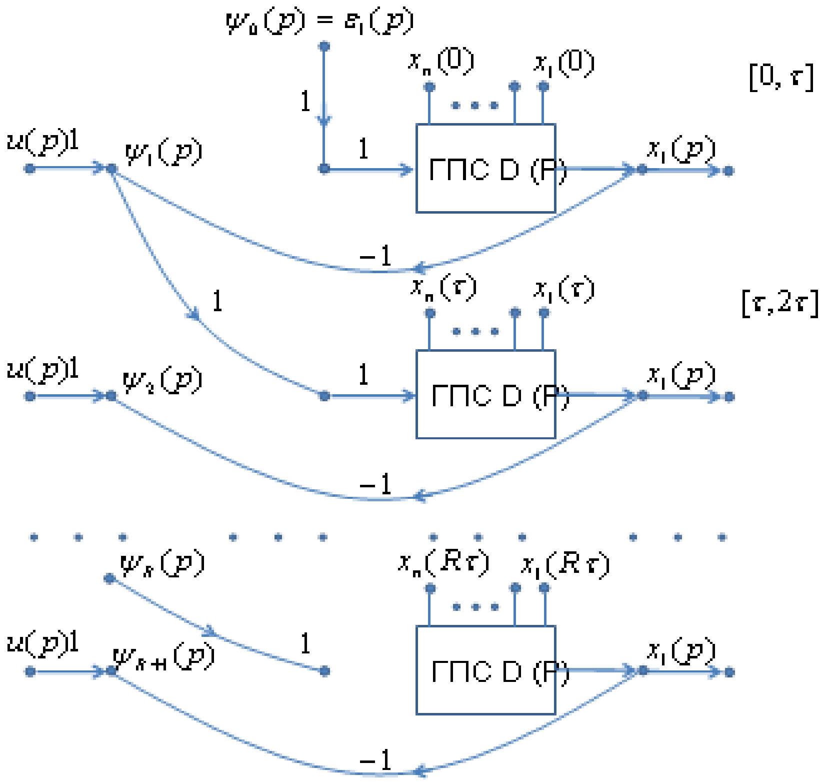
а)


u
ε
$e^{-p\tau}$
ε_1
Бошқарилувчи жараён
x_1

б)


$\psi_0(p) = \varepsilon_1(p)$
$u(0)$
$x_n(0)$
$x_{n-1}(0)$
$x_2(0)$
$x_1(0)$
Б)
$1/p$
1
$u(p)$
ε
$x_{n-1}(p)$
x_1
$-a_{n-1}$
$-a_{n-2}$
$-a_1$
$-a_0$
-1

в)


$\psi_0(p) = \varepsilon_1(p)$
$x_n(0)$
$x_1(0)$
$[0, \tau]$
$u(p)1$
$\psi_1(p)$
ГПС D (P)
$x_1(p)$
-1
$x_n(\tau)$
$x_1(\tau)$
$[\tau, 2\tau]$
$\psi_2(p)$
$\psi_k(p)$
$x_n(R\tau)$
$x_1(R\tau)$
$\psi_{k+1}(p)$

1.4.3- расм

Бошқариш бўйича кечикишга эга чизиқли стационар тизим. Қуйидаги кўринишдаги дифференциал тенгламалар тизими берилган бўлсин:

$$\frac{d^n y(t)}{at^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1}y(t)}{at^{n-1}} + ... + a_0 y(t) + y(t-\tau) = u(t).$$

Тизимнинг йиғиштирилган тузилмали схемаси 1.4.3,а-расмда тасвирланган.

Бу тизимда хатолик сигнали кечикувчи бўлади, унинг тенгламаси қуйидагича:

$$\varepsilon(t) = u(t) - x_1(t) \qquad (1.48)$$

Кечикиш бўғинининг чиқиш сигнали учун қуйидагига эгамиз:

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon(t-\tau) = u(t-\tau) - x_1(t-\tau).$$

Бу тизимнинг графли модели олдингисидан шу билан фарқ қиладики, бунда кечикувчи сигнал тавсифлайдиган граф учи иккита функциянинг фарқланиши, яъни хатолик сигнали билан ўлчанади. Тизимнинг ҳолатини $[0, \tau]$ кесмада моделирловчи тизим графи 1.4.3, б расмда тасвирланган:

Жараёнларни $[t_0, T]$, $T = t_0 + (k+1)\tau$ оралиқда аниқлаш мумкин бўлган тизимнинг умумий топологик модели 1.4.3,в-расмда ифодаланган.

Граф моделни кўриб чиқиб, тизимда жараёнларни $t \in [0, \tau]$ кесмада ҳисоблаш учун қуйидаги муносабатни ҳосил қиламиз:

$$X(p) = Q(p)X(0) + S(p)\varphi_0(p), \qquad (1.49)$$

$\varphi_0(p) = 0$ эканлигини эътиборга олиб, (1.49) муносабатни қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$X(p) = Q(p)X(0). \qquad (1.50)$$

Хатолик сигнали тенгламасини ёзамиз:

$$\varepsilon(p) = u(p) - x_1(p) \qquad (1.51)$$

$\varphi_1(p) = \varepsilon(p)$ белгилашни қабул қиламиз.

(1.49) муносабатга Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини қўллаб, қуйидагига эга бўламиз:

$$X(t) = Q(t)X(0) + D_0(t), \qquad (1.52)$$

(1.52)-муносабатдан вақтнинг $t=\tau$ дақиқаси учун ҳолат тенгламаси қийматларини аниқлаймиз:

$$X(\tau)= Q(\tau)X(0) + D_0(\tau), \qquad (1.53)$$

Навбатдаги $t \in [\tau, 2\tau]$ кесмада тизимдаги жараёнлар координаталарнинг бошланғич қийматлари ва $t=\tau$ дақиқада кечикиш бўғинига "ёзилган" $\varphi_1(t-\tau)$ функция кесмаси таъсирида ривожлана бошлайди. $\varphi_1(t-\tau)$ функция моҳияти бўйича, биз олдинги кесмада аниқлаган, хатоликнинг кечикаётган сигналидир. Муносабатни, жараёнларни ҳисоблаш учун, $t \in [\tau, 2\tau]$ кесмада ёзиш осон:

$$X(p) = Q(p)X(\tau) + S(p)\varphi_1(p), \qquad (1.54)$$

$\varphi_2(p) = u(p)-x_1(p)$ деб белгилаймиз.

(1.54)- муносабатдан $X(t) = Q(t-\tau)X(\tau) + D(t- \tau)$ эканлиги келиб чиқади, бу ерда $D(t- \tau) = L^{-1}[S(p) \varphi_1(p)$

$t=2\tau$ дақиқа учун қуйидагига эга бўламиз:

$$X(2\tau) = Q(\tau)X(\tau) + D(\tau) \qquad (1.56)$$

Юқорида баён этилган жараённи кетма-кет бажара бориб, $k\tau \le t \le (k+1) \quad \tau, k = 0, 1, ...$ учун қуйидагига эга бўламиз:

$$X(t) = Q(t-k\tau)X(r\tau) + D_k(t-k\tau) \qquad (1.57)$$

бу ерда $D_k(t-k\tau) = L^{-1}[S(p) \varphi_k(p)$.

Айтилганларни ҳисобга олиб, доимий кечикишга эга чизиқли стационар тизимда жараёнларни ҳисоблашнинг қуйидаги алгоритмини яратиш мумкин.

Алгоритм 1.4.

Доимий кечикишга эга чизиқли стационар тизимда жараёнларни ҳисоблаш алгоритми:

1) Тизим элементларининг граф моделлари бирлашмаси сифатида тизимнинг граф модели қурилади $G_k^C = G_k^O \cup G_k^{3C}$.

2) Ҳосил бўлган граф бўйича $t \in [k\tau, (k+1)\tau], k = 1,2,...$ вақт оралиғи учун тизимда жараёнларни ҳисоблаш учун муносабат тузилади:

$$X(p) = Q(p)X(k\tau) + [R(p) \cup R_1 Ju(k\tau) + cS(p)\varphi_k(p) \text{,} \quad (1.58)$$

Бу ерда $R_1(p)$ - нолинчи матрица, $c = 1 \;\; V - 1$.

3) $\phi_{k+1}(p)$ функциянинг Лаплас бўйича тасвири эслаб қолинади:

$$\phi_{k+1} = x_1(p) \cup [u(p) - x_1(p)].$$

4) Қуйидаги муносабат учун Лапласнинг тескари шакл алмаштирилиши бажарилади:

$$X(t) = Q(t-k\tau)X(k\tau) + [R(t-k\tau) \cup R_1(t-k\tau)Ju(k\tau) + cD_k(t-k\tau) \quad (1.59)$$

5) Қуйидаги дақиқада ҳолат ўзгарувчиларининг қийматлари аниқланади:

$$X[(k+1)\tau] = Q(\tau)X(k\tau) + [R(\tau) \cup R_1(\tau)Ju(k\tau) + cD_k(\tau) \quad (1.60)$$

6) Алгоритмнинг 2-бўлимига ўтилади.

Шундай қилиб, олиб борилган кузатишлар шуни кўрсатдики, тизим тузилмасида кечикиш бўғинининг мавжудлиги принципиал тарзда унинг хоссаларини ўзгартиради - тизимнинг t_0 дақиқадан бошлаб ҳаракатини аниқлаш учун, сонлар кўринишидаги $x(t_0)$ бошланғич ҳолатни билишдан ташқари, одатдаги динамик тизимларда ўринли бўлгани каби, бошланғич функцияни ҳам бериш зарур. Бу ўзига хос хусусиятни ҳисобга олиб, биз кечикишга эга тизимнинг графли моделини қурдик. Узлуксиз кечикувчи сигнални моделирлаш моделни қуриш босқичида пайдо бўладиган асосий муаммо бўлади. Бу масала, узлуксиз сигнални тавсифловчи граф учини, кечикувчи функцияни Лаплас бўйича тасвирини ўлчаш билан ҳал қилинди. Бундан ташқари 1.4.3, в расмда келтирилган топологик моделдан шу нарса кўриниб турибдики, доимий кечикувчи чизиқли стационар тизим динамик тузилмали тизим сифатида кўриб чиқилиши мумкин. Кечикувчи сигнал тизим тузилмасининг вақт давомида ўзгаришининг сабаби бўлади. Бошланғич ёпиқ тизим ўрнига биз тузилмали ҳолатларнинг $S_t = \{S_1, S_2, \ldots, S_n\}$чекли тўплами билан ифодаланган тизим билан иш кўрамиз, бу тўпламларнинг ҳар бирида тизим чизиқли очиқ бўлади.

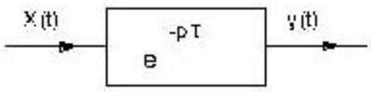
Ҳар бир тузилмали ҳолатда бўлиш вақти $[t_k, t_{k+1}]$ оралиқ билан аниқланади. Бир вақтнинг ўзида алоқаларнинг алоҳида тузилмалар ўртасида одатдагича эмаслиги кўриниб турибди, улар, биз хотира тизими билан иш кўраётганимизни кўрсатаябди, чунки ҳар бир ички тизимда ҳолат олдинги оралиқда жараённинг қандай содир бўлишига боғлиқ эканлиги топологик моделдан яхши кўриниб турибди.

Графли моделдан фойдаланиш кечикувчи аргументга эга дифференциал тенгламани бевосита интегрирлашни чиқариб ташлашга имкон берди, бу таклиф қилинаётган усулни, қадамлар усулига қараганда, анча самарали қилади. Топилган алгоритм, компьютерда дастурлаш нуқтаи назаридан, идеал шакл бўлади.

1.5. Ўзгарувчи кечикишга эга чизиқли стационар тизим динамикасини ўрганишнинг графли модели ва алгоритми

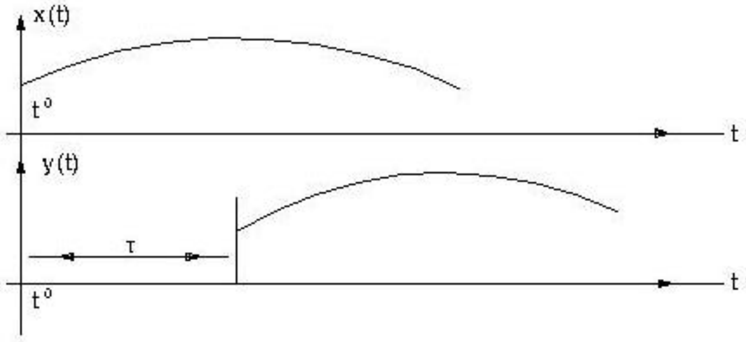
Ўзгарувчи кечикишга эга тизимларни ўрганишда ўзгарувчи кечикишнинг бўғини тушунчаси киритилади [4,5,15]. Бу бўғин доимий кечикиш бўғинидан бир қатор хоссалари билан фарқ қилади. Доимий кечикиш бўғинининг (1.5.1-расм) кириш x(t) сигнали ва чиқиш y(t) сигнали ўртасидаги математик боғлиқлик маълум:

$$Y(t) = \left\{ \begin{matrix} x(t-\tau) & \tau \geq 0 & t \geq t_0 + \tau \\ 0 & & t \geq t_0 + \tau \\ & & \end{matrix} \right\}$$



1.5. 1-расм

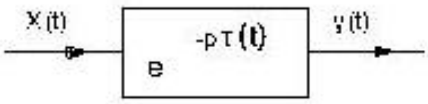
Чиқиш сигнали $t_0+\tau$ вақт тугаши билан кириш сигналини тўла қайта ишлаб чиқаради (1.5.2- расм):



1.5.2- расм

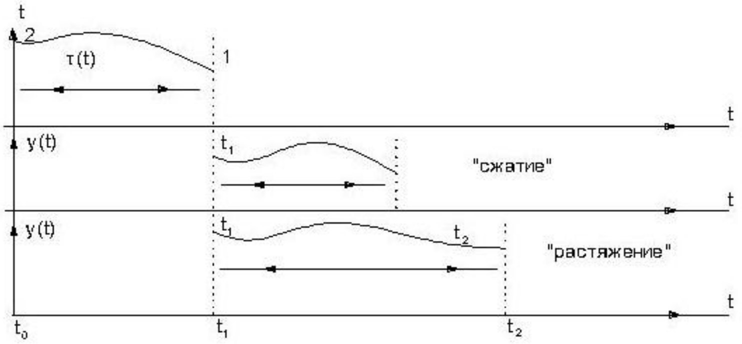
Кечикиш катталиги эркин t ўзгарувчининг функцияси бўлсин: $\tau = \tau(t)$

t миқдорнинг ўзгарувчанлиги туфайли ўзгарувчан кечикишли бўғиннинг (1.5.3- расм) чиқиш сигнали вақт ўқида деформацияланади. Бўғиннинг чиқиш сигнали бўлган $y(t)$ функция $x(t)$ кириш функциясига нисбатан, вақт ўқида ёки "қисилади", ёки "чўзилади" (1.5.4- расм):



1.5.3- расм

Аммо $\tau(t)$ кечикиш миқдори қандай тарзда ўзгармасин, $x(t)$ функциянинг бошланғич ва сўнгги қийматлари ўзгара олмайди. Қолаверса, ўзгарувчан кечикишли бўғин вақт ўқида $x(t)$ функциянинг кириш сигналини деформацияласа ҳам, $y(t)$ функциянинг чиқиш сигнали $x(t)$ функциянинг ҳамма дақиқалар қийматларини “қисилиш” вақтида ҳам, “чўзилиш” вақтида ҳам қайта ишлаб чиқаради (1.5.4-расм).



1.5.4 – расм

Ўзгарувчан кечикишли бўғинни физик реализация қилиш шартларини келтирамиз [15]. Улардан биттаси қуйидагича, кечикиш тезлигининг ўсиши вақтнинг табиий равишда бориш тезлигидан ошмаслиги керак, акс ҳолда кириш сигнали бўғин чиқишида ҳеч қачон қайта ишлаб чиқилмайди. Чунки вақтнинг табиий бориш тезлиги бирга тенг ($dt/dt\;\;1$) бўлганлиги учун ўзгарувчан кечикиш эга функция қуйидаги муносабатни қаноатлантириши керак:

$$t > 0\,учун\,\frac{d\tau(t)}{dt} \leq 1.$$

Кириш сигналига нисбатан чиқиш сигналидан ўзиб кетиш жисмонан амалга ошмайди, ўзгарувчан кечикишли бўғинни жисмонан амалга оширилиш шарти қуйидагича бўлади: $\tau(t) \geq 0$

Бу шартлардан ташқари dt/dt ҳосиланинг манфий қийматларига чекланишлар қўйилади: dt/dt манфий қийматларининг давомийлиги (1.5.4-расмда $[t_1, t_2]$ кесма) шундай бўлиши керакки $\tau(t)$ қиймат $t=t_2$ дақиқада манфий бўлмасин.

Математик нуқтаи назардан бу қуйидагича ёзилади:

$$\tau(t_2) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\tau(t)}{dt} dt \geq 0$$

Ўзгарувчан кечикишнинг бўғинига қатъий таъриф берамиз:

Таъриф: Ўзгарувчан кечикишнинг бўғини деб хоссалари қуйидаги шартлар билан аниқланувчи тизим элементига айтилади:

1. Ўзгарувчан кечикиш функцияси деб аталувчи қандайдир $\tau(t)$ функция, $x(t)$ ва $y(t)$ элементларга эга кўплаб кириш X ва чиқиш Y функциялари берилган;

2. T вақтнинг қуйидаги қийматлар билан кўплаб дақиқалари берилган: t_0 - $y(t)$ чиқиш функциясини кузатишни бошлаш дақиқаси; t_b - $y(t)$ чиқиш функциясини ва кесмаларни кузатишнинг охирги дақиқаси; $\tau(t_0)$ - $x(t)$ кириш функцияси бошланғич қийматининг берилган $[t_0 - \tau(t_0), t_0]$ кесмада кечикиши;

$\tau(t_b)$ - $x(t)$ кириш функцияси сўнгги қийматининг берилган $[t_0 - \tau(t_0), t_0]$ кесмада кечикиши.

3. Ўзгарувчан кечикиш функцияси қуйидаги муносабатларни қаноатлантиради:

а) ҳамма $t \in T$ учун $\tau(t) \geq 0$ (1.61)

b) $t > t_0$ учун $\frac{d\tau(t)}{dt} \leq 1$ (1.62)

в) $t_1 \leq t \leq t_2$ учун $\tau(t_2) + \int \frac{d\tau(t)}{dt} dt \geq 0;$ (1.63)

бу ерда $[t_1, t_2]$ вақт кесмаси, унда $\frac{d\tau(t)}{dt} < 0$

4. Кириш ва чиқиш функциялари:

$y(t) = x[t - \tau(t)]$ (1.64)

тенгсизликни қаноатлантиради ва $t = t$ да ҳам: $x(t) = y(t),$

$t_b - \tau(t_b) = t_0$ (1.65)

1-таърифнинг ҳамма талабларини қаноатлантирувчи кечикиш функцияси вақтнинг ҳам чизиқли, ҳам чизиқлимас функцияси бўлиши мумкин. Бир қатор амалий масалалар $\tau(t)$ функцияни вақт давомида чизиқли ўзгарувчи функцияси сифатида:

$$\tau(t) = \tau + kt \qquad (1.66)$$

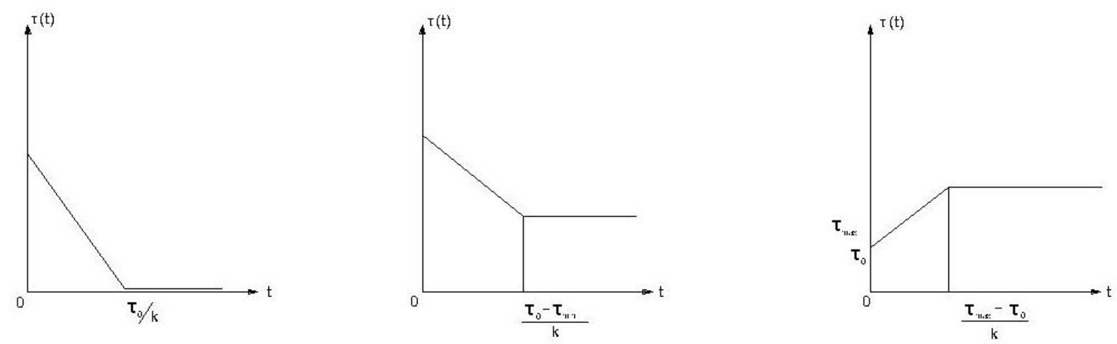
ифодалашга имкон беради, бу ерда $\tau_0 \geq 0$, *const*.

(1.66) шартни ифодалаш учун ўзгарувчили кечикишга эга бўғинни жисмонан амалга оширилишини $k \leq 1$ кўринишда ёзиш мумкин.

$k = 0$ да $\tau(t)=\tau_0=$ *const.* Биз доимий кечикиш бўғини учун ифодани ҳосил қилдик.

$k<0$ да $\tau(t)$ функция чизиқли камаювчи функциядир. Бу ҳолда $t \leq \tau_0/k$ вақт қиймати учун кечикишни нолга (1.5.5, а – расм), ёки вақтнинг ҳамма қийматлари $t \geq (\tau_0 - \tau_{min})/k$ учун, қандайдир доимий τ_{min} миқдорга тенг (1.5.5,б – расм), деб олиш мумкин.

а) б) в)



1.5.5 -расм

$k>0$ да кечикиш чизиқли-ўсувчи функция бўлади. Тизим чизиқли ўсувчи кечикиш билан ҳамма вақт, кечикишнинг узлуксиз ўсиши сабабли, беқарор. Агар кечикишнинг қандайдир бир максимал қиймати τ_{max} мавжуд бўлса, унда тизимнинг барқарорлиги мана шу максимумнинг миқдорига боғлиқ бўлади (1.5.1,в –расм).

Бўғиннинг чизиқлимас ҳолида кечикиш функцияси нафақат t вақтга, балки кириш ёки чиқиш функциясига, ёки иккаласига ҳам бир вақтда боғлик

$$\tau = \tau[t, \eta(t)] \qquad (1.66)$$

бу ерда $\eta(t)$ функция қуйидаги қийматларни қабул қилиши мумкин:

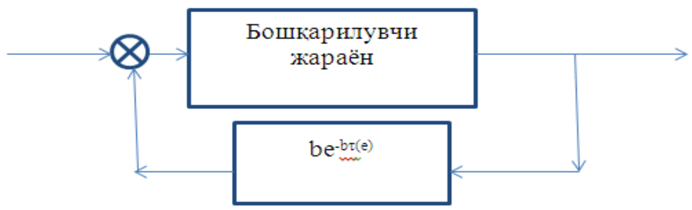
$$\eta(t) = x(t), \qquad \eta(t) = y(t), \qquad \eta(t) = \eta[x(t), y(t)].$$

Албатта, (1.66) кўринишдаги функция 1-таърифнинг ҳамма шартларини қаноатлантириши керак.

Энди тескари алоқа занжирида ўзгарувчи кечикишга эга чизиқли тизимни кўришга ўтамиз (1.5.6 – расм).

Тизимнинг дифференциал тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$(\frac{d^n x_1(t)}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1} x_1(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_0 x_1(t) + x_1(t-\tau(t)) = u(t)) \qquad (1.67)$$



1.5.6- расм

Бу ерда жараёнларнинг физик кўриниши, доимий кечикишга эга тизимга нисбатан, бирмунча бошқача. Кечикиш миқдорининг ўзгарувчанлиги сабабли $x_1(t)$ чиқиш сигнали, кечикиш бўғинидан ўта туриб, вақт ўқида деформацияланади (сигналнинг “қисилиши” ёки чўзилиши содир бўлади).

Ўзгарувчан кечикишга эга бўғин чиқиш $y(t)$ сигналининг давомийлиги “ёзилган” $x_1(t\text{-}\tau(t))$ сигнал давомийлигидан фарқ қилади. Бу давомийлик $x_1(t_0)$ миқдорнинг ўзгарувчан кечикишга эга бўғин чиқишида пайдо бўлиш дақиқаси билан аниқланади. Ўзгарувчан кечикишли бўғин таърифига кўра:

$$x_1(t_0) = y(t_1) \qquad (1.68)$$

$$t_1 - \tau(t_1) = t_0 \qquad (1.69)$$

Кечикиш бўғини чиқишида (1.69) тенгламадан $x_1(t_0)$ сигналнинг лаҳзалик қийматининг пайдо бўлиш дақиқасини аниқлаб, $[t_0, t_1]$ вақт оралиғида тизимнинг чиқиш жараёнини топиш мумкин.Дифференциал тенгламани (1.67)

1-тартибли мос дифференциал тенламалар тизими билан алмаштирамиз. Тенгламаларнинг бу тизими $t_0\text{-}\tau(t_0) \le t \le t_0$. учун бошланғич $\varphi_0(t) = x_1(t)$ функция билан векторли шаклда ёзилиши мумкин:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{A}\bar{X}(t) + \bar{B}u(t) + \bar{C}x_1(t - \tau(t)), \qquad (1.70)$$

(1.70)-тенгламани ечиш учун Лаплас шакл алмаштиришидан фойдаланамиз:

$$p\bar{X}(p) = \bar{A}\bar{X}(p) + \bar{B}u(p) + \bar{C}\varphi_0(p) + \bar{X}(0^+), \qquad (1.71)$$

бу ерда $\varphi_0(p) = L(\varphi_0(t))$, $\varphi_0(t)$ – берилган бошланғич функция, у бошланғич $[t_0\text{-}\theta, t_0]$ тўпламда аниқланган.

Элементар шакл алмаштиришларни бажариб, қуйидагини топамиз:

$$X(p) = G(p)B\,u(p) - G(p)C(p)\varphi_0(p) - G(p)X(0^+) \qquad (1.72)$$

Бу ерда $G(p) = (pI(i) - A)^{-1}$

(1.72)-ифодага Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини қўллаб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$X(t) = L(G(p)B\,u(p) + L(G(p)C\,\varphi_0(p) + L^{-1}(G(p))X(0^+) \qquad (1.73)$$

Бу ерда $G(p) = L^{-1}\,(pI(i) - A)^{-1}$

(1.71)-ифода $[t_0, t_1]$ вақт кесмасида тизимдаги жараёнларни баён этади. (1.71)-тенгламанинг ўнг қисмидаги $\varphi_0(p)$ функция маълум бўлгани учун, у оддий алгебраик тенгламага айланади ва у, бу тенгламалар учун маълум бўлган, ихтиёрий усуллардан бири билан ечилади. Чекка t_1 нуқтанинг қийматини топиш учун $t_1 - \tau(t_1) = t_0$ муносабатдан фойдаланамиз. Бу функционал тенгламани t_1 га нисбатан ечиб, изланган нуқтани топамиз.

Энди янги бошланғич дақиқа сифатида t_1 нуқтани оламиз. Бу (1.70)-тенгламани ечишнинг кейинги қадамига ўтишга имкон беради. $[t_1, t_2]$ вақт оралиғи учун олдинги ечим бошланғич функция ролини ўйнайди. $\varphi_1(p) = x_1(p)$ ифодани (1.71)-тенгламага қўйиб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$X(p) = G(p)B\, u(p) + G(p)C\, \varphi_1(p) + G(p)X(t_1)$$

Ундан: $X(t) = L^{-1}\{G(p)B\, u(p)\} + L^{-1}\{G(p)C\, \varphi_1(p)\} + G(t)X(t)$ (1.74)

(1.74)-ифода (1.70)-тенгламанинг $[t_1, t_2]$ кесмадаги ечими бўлади, бу ерда чекка t_2 нуқта функционал тенгламадан аниқланади:

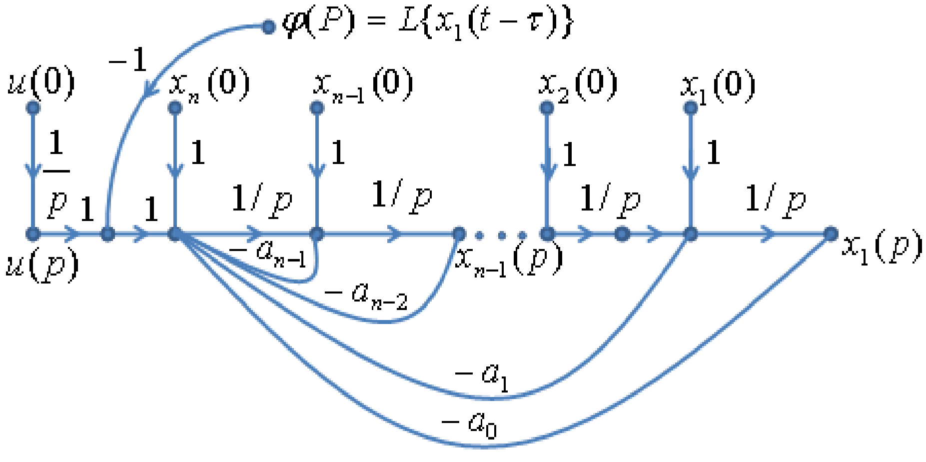
$$T_2 - \tau(t_2) = t_1 \qquad (1.75)$$

Шундай қилиб, бизни қизиқтирувчи ихтиёрий вақт оралиғи учун жараёнларни аниқлаш мумкин [17].

Ўзгарувчан кечикишга эга чизиқли тизимни матрицавий тенгламалар ва Лаплас шакл алмаштириши ёрдамида ўрганиш мумкин экан. Аммо (1.72)-муносабатни, кўп меҳнат талаб қилувчи ҳисоблашлардан четлаб ўтишга, матрицаларнинг нозичлиги билан боғлиқ операцияларни ҳисобдан чиқаришга имкон берувчи ўткинчи ҳолатлар графи ёрдамида ҳам ҳосил қилиш мумкин.

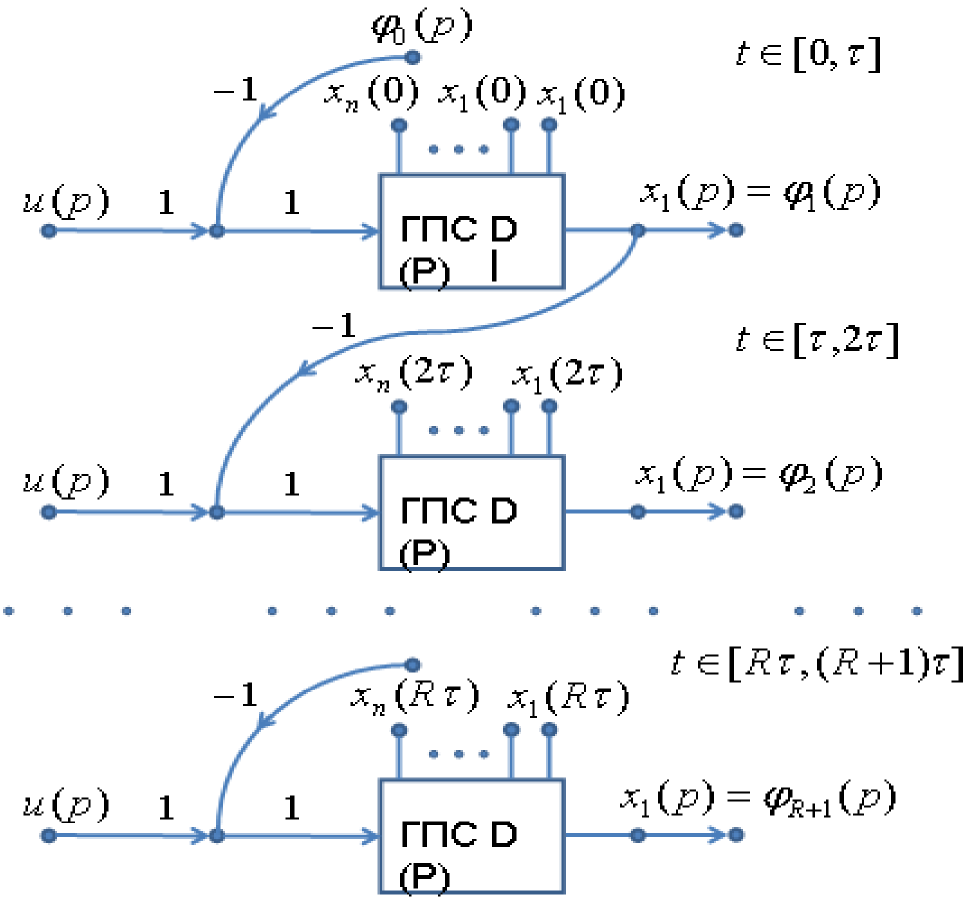
Ўзгарувчан кечикишга эга тизимнинг графли модели доимий кечикишга эга тизимнинг графли модели каби қурилади (1.5.7-расм).

$[t_0, T]$ $(T=t_{k+1})$ кесим учун тизимнинг топологик модели 1.5.8-расмда келтирилган.



1.5.7-расм

Айтилганларни ҳисобга олиб ва доимий ҳамда ўзгарувчан кечикишга эга бир ўлчовли тизимларнинг моделларини шакллантиришнинг маълум босқичларининг умумийлигига таяниб, ўзгарувчи кечикишга эга чизиқли узлуксиз жараёнларни ҳисоблаш алгоритмини шакллантириш мумкин. Мазкур алгоритмни тўғри зажирда ўзгарувчан кечикишга эга тизимда жараёнларни ҳисоблаш учун қўллаш мумкин.



1.5.8 – расм

Алгоритм 1.2.

1. Тизим элементлари моделларининг бирлашмаси сифатида унинг графли модели курилади

$$G_k^c = G_k^c \cup G_k^c$$

2. $[t_k,\ t_{k+1}]$, $k=0,\ 1,\ \dots\ N$ вақт кесмасининг $t_{k+1} - \tau(t_{k+1}) = t_k$ тенгламадан сўнгги нуқтаси аниқланади

3. $t\in[t_k,\ t_{k+1}]$, $k=0,\ 1,\ \dots\ N$ вақт кесмаси учун ҳосил қилинган граф бўйича тизимдаги жараёнларни ҳисоблаш учун муносабат тузилади:

$$X(p) = Q(p)X(t_k) + [R(p)VR_1(p)]u(t_k) + c\varphi_k(p)V(u(p) - \varphi_k(p))]S(p) \quad (1.76)$$

бу ерда $R_1(p)$ - нолинчи матрица, c=1, V=-1.

4. $\varphi(p)$ функциянинг Лаплас бўйича тасвири аниқланади: $\varphi_{k+1} = x_1(p)$

5 (1.76)-муносабат учун Лапласнинг тескари шакл алмаштирилиши бажарилади:

$$X(t) = Q(t - t_k)X(t_k) + [R(t - t_k)VR_1(t - t_k)]u(t_k) + cD_k(t - t_k), \quad (1.77)$$

бу ерда $D_k(t\text{-}t_k) = L^{-1}(\varphi_k(p)\,S(p))V\,L^{-1}\{[u(p)\text{-}\varphi k(p)]\,S(p)\}$.

6. (1.77)-муносабатдан $t=t_{k+1}$ дақиқада ҳолат ўзгарувчиларининг қийматлари аниқланади:

$$X(t_{k+1}) = Q(t_{k+1} - t_k)X(t_k) + [R(t_{k+1} - t_k)VR_1(t_{k+1} - t_k)]u(t_k) + cD_k(t_{k+1} - t_k) \quad (1.78)$$

7. Алгоритмнинг 3-бўлимига ўтилади.

1.6. Кечикишга эга кўп ўлчамли чизиқли узлуксиз тизимларни моделирлаш.

Ўзгарувчан кечикишга эга кўп ўлчамли чизиқли узлуксиз тизимларнинг ҳолат тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$\frac{dX}{dt} = AX(t) + BU(t) + CX(t - \tau(t)) \quad (1.79)$$

$$Y(t) = HX(t), \quad (1.80)$$

Бу ерда $X(t)$ – тизим ҳолатининг вектори, $U(t)$ - кирувчи таъсирлар вектори, $Y(t)$ – чиқиш миқдорлари вектори.

(1.79)-тенгламани, умумлаштиришни, ҳар хил кечикишга эга k векторлар мавжуд бўлганида қуйидаги тарзда қилиш мумкин. Қуйидаги векторни киритамиз:

$$X(t - \tau_i(t)) = \begin{bmatrix} x_1(t - \tau_i(t)) \\ x_2(t - \tau_i(t)) \\ \dots \\ x_n(t - \tau_i(t)) \end{bmatrix},$$

бу ерда $\tau_i(t)$ – ҳар бир вектор ва матрица учун ҳар хил кечикишга эга ўзгарувчи

$$C_i = \begin{bmatrix} C_{11}^i & C_{12}^i & \dots & C_{1n}^i \\ C_{21}^i & C_{22}^i & \dots & C_{n2}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1}^i & C_{n2}^i & \dots & C_{nn}^i \end{bmatrix},$$

бу ерда ҳарф устидаги индекс бу элементнинг мазкур матрицага тегишли эканлигини кўрсатади. Бу ҳолда (1.79)-тенгламани қуйидагича ёзиш мумкин бўлади:

$$\frac{dX}{dt} = AX(t) + BU(t) + \sum_{i=1}^{k} C_i X(t - \tau_i(t)) \qquad (1.82)$$

(1.79)-тенглама ечимини топиш учун n та $\varphi_i(t)$ бошланғич функцияларни бериш керак, бу функцияларни матрица-устунлар кўринишида ёзиш қулай:

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \\ \dots \\ \varphi_n(t) \end{bmatrix}$$

Бошланғич функция хоссалари асосида қуйидаги тенгликлар ўз ўрнига эга бўлади: $\Phi(t_0) = X(t_0)$,

$$\Phi = \begin{cases} \Phi(t), & y \in E_0 \\ 0, & t \ge t_0 \end{cases}.$$

Кўп ўлчамли тизим §1.4 ва §1.5 да кўриб ўтилган оддий тузилмаларнинг ҳамма асосий томонларини ўзида сақлайди, шунинг учун уларда содир бўладиган жараёнлар шу параграфларда ўрганилган жараёнлардан тубдан фарқ қилади. Аммо кўп ўлчамли тизимларни ўрганиш масаласи, кечикишнинг таъсирига кириш ва чиқиш бўйича ўзаро боғлиқликларнинг қўшилиши билан мураккаблашади. Бу муносабатда бошқаришнинг кўп сонли каналлари бўйича ҳамма ўзаро боғлиқликларни ифодалашнинг энг қулай усули бўлган графли моделлардан фойдаланиш мақсадга мувофиқ [18,19].

Кўргазмалилик учун қарашни, ҳолат бўйича кечикишга эга икки ўлчамли тизимдан, бошлаймиз, кейин эса уни n – ўлчамли ҳол учун умумлаштирамиз. Кечикишга эга тизимларнинг хоссаларига мос тарзда t_0 вақт дақиқасида тизим киришида, иккита сигнал – кирувчи таъсир: $\psi(t) = [u_1(t), u_2(t)]$ ва бошланғич функция: $\Phi(t) = [\varphi_1(t), \varphi_2(t)]$ ўз ҳаракатини бошлайди. Ҳар бир сепарат канал учун бошланғич функциянинг таъсири қандайдир бир t_b^1 ва t_b^2 вақт дақиқаларида тугайди: $\psi(t)$ кириш сигналининг ҳаракати ҳамма вақт оралиғида: t_0 дан ихтиёрий t гача давом этади. Графли модел бу физик хусусиятларни ҳисобга олган ҳолда қурилади. Икки ўлчамли бошқариш объектининг модели иккита сепарат ва иккита кесишувчи узатиш каналлари моделларининг бирлашишидан ҳосил бўлади:

$$G_t = G_t^{rr} \cup G_t^{rk} \tag{1.83}$$

r=1,2; k=1,2; $r \neq k$

бу ерда:

$$G_t^{rr} = \{X^{rr}(t_0), X^{rr}(p), V^{rr}) \tag{1.84}$$

сигналларни узатишнинг сепарат каналлари моделлари.

$X^{rr}(t_0) = (x_i^{rr}(t_0))$;

$X^{rr}(p) = (x_i^{rr}(p)$;

$$V^{rr} = (x_i^{rr}\ (t_0),\ x_m^{rr}(p_0), a_{mi}^{rr}\ (p)),$$

бу ерда: r = 1,2; m = 1,2, …, n.

i = 1,2, …, n; l = 1,2, …, n.

Кесишувчи каналларнинг графли моделлари

$$G_t^{rk} = (X^{rk}(t_0), X^{rk}(p), V^{rk}) \tag{1.85}$$

бу ерда:

$X^{rk}(\mathrm{t_0}) = [X_i^{rk}(t_0)]$;

$X^{rk}(\mathrm{p}) = [X_i^{rk}(p)]$;

$V_t^{rk} = (X^{rk}(t), X^{rk}(p), a^{rk}(p))),$

бу ерда: r = 1,2; k=1,2; $r \neq k$ m = 1,2, …, n.

i = 1,2, …, n; l = 1,2, …, n.

Бу белгилашларни ҳисобга олиб:

$G_t = (X(t_0), X(p), V)$

$X(t_0) = X^{rr}(t_0) \cup X^{rk}(t_0);$

$X(p) = X^{rr}(p) \cup X^{rk}(p_0);$

$V = V^{rr} \cup V^{rk}.$

Кечикувчи сигналларнинг графли моделларини қуйидаги кўринишда аниқлаймиз:

$$G^{\varphi} = (\varphi^{r}(p), e^{r}, V^{\varphi}), \qquad (1/86)$$

бу ерда $\varphi^r(p)$ - бўғин (уч, чўққи), моделирловчи кечикувчи сигнал, у Лаплас тасвири бўйича кечикувчи сигнал билан ўлчанган, узлуксиз функция кесмаси билан ифодаланган.

e^r - узатишнинг r каналида хатолик сигналининг Лаплас бўйича тасвири;

$V^{\varphi} = (\varphi^{r}(p), e^{r}, -1),$

Кириш сигналларининг моделлари бошқаришнинг узлуксиз моделига ўхшаб қурилади.

Агар тизимда бошқарувчи сигналлар бўлса, унда бу ҳолда, кечикувчи сигналларнинг графли моделлари қуйидаги кўринишда аниқланади:

$G_{\varphi}^{rr} = (\varphi^{rr}(p), \gamma^{rr}(p), V_{\varphi}^{rr});$

$G_{\varphi}^{rk} = (\varphi^{rk}(p), \gamma^{rk}(p), V_{\varphi}^{rk});$

бу ерда:

$G^{rr}(p) = u^{r}(p) - \varphi^{rr}(p),$

$G^{rk}(p) = u^{r}(p) - \varphi^{rk}(p),$

$V^{rr} = (\varphi^{rr}(p), \gamma^{rr}(p), 1),$

$V^{rk} = (\varphi^{rk}(p), \gamma^{rk}(p), 1),$

Айтилганларни ҳисобга олиб, графли моделни қуришнинг ва кечикишга эга кўп ўлчамли жараёнлар динамикасини ўрганишнинг қуйидаги алгоритмини ишлаб чиқиш мумкин:

Алгоритм 1.6

1) Кечикиш миқдорлари улар қийматларининг ўсиши тарзида тартибга солинади: $\tau^* = \tau^*_1, \tau^*_2, \ldots, \tau^*_n$.

2) Тизимнинг алоҳида элементлари: кириш сигналларининг, кечикувчи сигналларнинг моделлари, узлуксиз бошқариш объекти моделининг граф моделлари қурилади.

3) Ҳосил бўлган графлар, τ^* ўқида тизимни кузатиш оралиғини ҳисобга олган ҳолда, тизимнинг умумий топологик моделига бирлаштирилади:

а) $G_t^c = G_t^s \cup G_t^{3c} \cup G_t$ - ҳолати бўйича кечикканда;

б) $G_t^c = G_t^s \cup G_t^{3c} \cup G_t$ - бошқариши бўйича кечикканида.

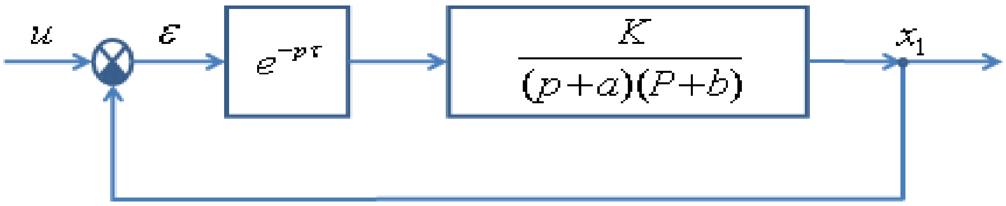
4) Ҳосил бўлган граф бўйича, $\tau_s^* \in \tau^*$ вақт дақиқаларига мос тарзда, тизим ўзгарувчи ҳолатларини ва тизим чиқишининг координаталарини аниқлаш учун муносабатлар тузилади:

$$X^{rr}(p) = Q^{rr}(p)X^{rr}(\tau) + [R^{rr}(p) \cup R1^{rr}(p)]u^r(\tau) + c\varphi^r(p)S^{rr}(p) \tag{1.87}$$

$$X^{rk}(p) = Q^{rk}(p)X^{rk}(\tau) + [R^{rk}(p) \cup R1^{rk}(p)]^{rk}$$

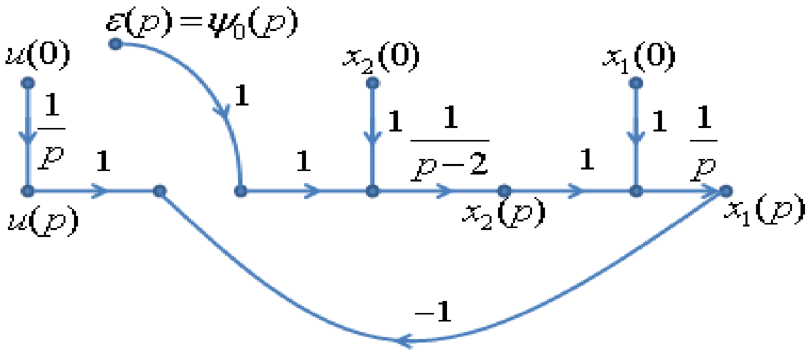
Мисол 1.7.1:

Агар t=0 вақт дақиқасида тизим киришига $u(t) = 1(t)$ таъсир узатилаётган бўлса, бўғинларнинг параметрлари *k=1, a=0, b=2, τ=0.5с* бўлса, тизимнинг (1.6.1-расм) чиқиш сигналини аниқлаш талаб қилинсин.



1.6.1-расм

Бошланғич шартлар – нол, бошланғич тўпламда берилган бошланғич функция $\phi_0(t)=0$ га тенг. Тизимнинг тузилмали схемасидан фойдаланиб ва кечикиш бўғини хатолик сигнали τ вақтга ушлаб қолинишини ҳисобга олиб, тизимнинг графини *[0, τ]* вақт оралиғи учун қурамиз (1.6.2- расм).



1.6.2-расм

Графни кўриб чиқиб, қуйидагини топамиз:

$$x_1(p)=x_2(p)=0,\ \varepsilon(p)=u(p)-x_1(p)=1/p,$$

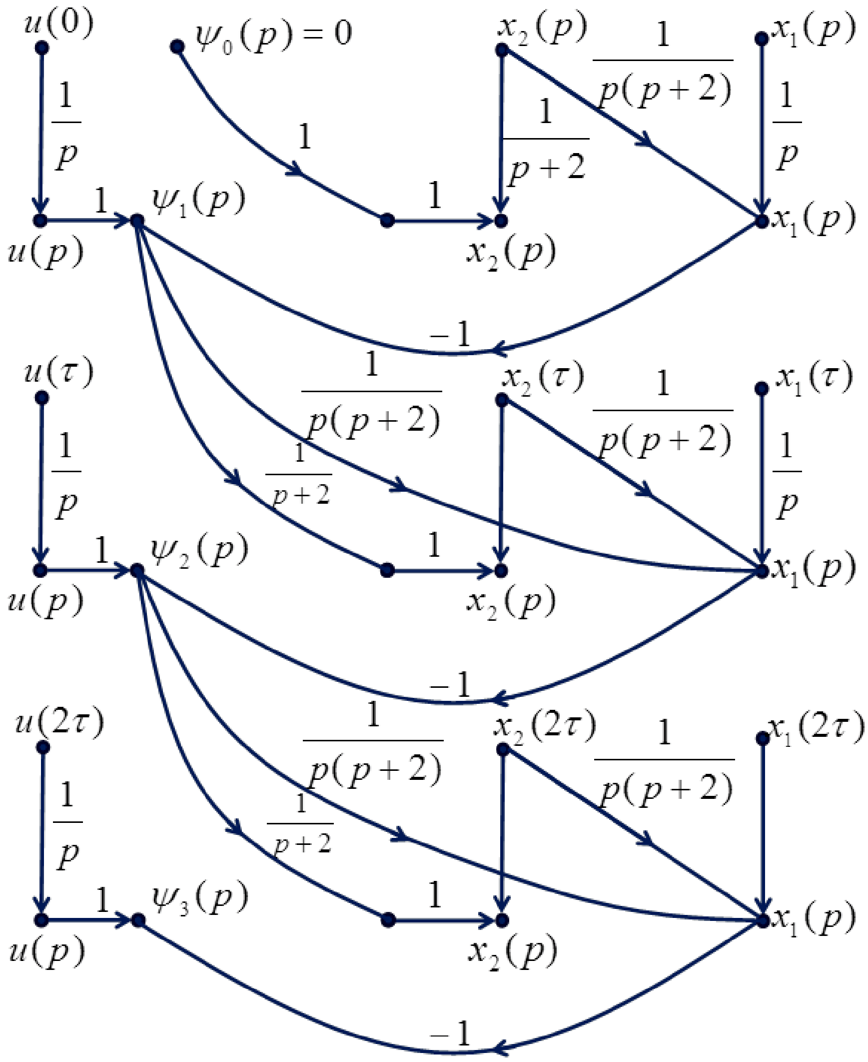
$$\phi_1(p)=\varepsilon(p)=1/p;\ x_1(t)=x_2(t)=0,\ x_1(\tau)=x_2(\tau)=0.$$

[τ, 2τ] вақт оралиғи учун граф тузилмаси аввалгидай бўлади, фақат *ε(p)* сигналнинг қиймати ўзгаради (1.6.3- расмдаги тизимнинг топологик моделини кўриб чиқинг) . У пайтда графни кўриб чиқиб, қуйидагини осонгина ёзиб чиқиш мумкин бўлади:

$$x_1(p) = \frac{1}{p(p+2)}\phi_1(p) = \frac{1}{p^2(p+2)},$$

$$x_2(p) = \frac{1}{p+2}\phi_1(p) = \frac{1}{p(p+2)},$$

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{p} - \frac{1}{p^2(p+2)};\ \phi_2(p) = \varepsilon(p).$$



1.6.3 -расм

Асл кўринишга ўтиб, қуйидагиларга эга бўламиз:

$$x_1(t) = 0.25e^{-2(t-0.5)} - 0.25 + 0.5(t-0.5)\ ;$$

$$x_2(t) = 0.5(1 - e^{-2(t-0.5)})\ .$$

[τ, 2τ] кесманинг охирида ҳолат тенгламалари қийматлари қуйидагига тенг бўлади:

$$x_1(2\tau) = x_1(1) = 0.092;\ \ x_2(2\tau) = x_2(1) = 0.316\ .$$

Навбатдаги $[2\tau, 3\tau]$ вақт оралиғида ҳолат тенгламаларини қуйидаги муносабатлардан аниқлаймиз:

$$x_1(p) = \frac{x_1(2\tau)}{p} + \frac{x_2(2\tau)}{p(p+2)} + \frac{\phi_2(p)}{p(p+2)} = \frac{0.092}{p} + \frac{0.316}{p(p+2)} - \frac{1}{p^3(p+2)^2};$$

$$x_2(p) = \frac{x_2(2\tau)}{p+2} + \frac{\phi_2(p)}{p+2} = \frac{0.316}{p+2} + \frac{1}{p(p+2)} - \frac{1}{p^2(p+2)^2};$$

$$\varepsilon(p) = \phi_3(p) = \frac{0.908}{p} - \frac{0.316}{p(p+2)} - \frac{1}{p^2(p+2)} - \frac{1}{p^3(p+2)^2}$$

Асл ҳолатларга ўтиб, қуйидаги муносабатларга эга бўламиз:

$$x_1(t) = 0.092e^{-2(t-1)} - 0.125(t-1)e^{-2(t-1)} + 0.125(t-1)^2 + 0.625(t-1).$$

$$x_2(t) = -0.309e^{-2(t-1)} - 0.25(t-1) + 0.25(t-1)e^{-2(t-1)} + 0.625$$

Ҳолат ўзгарувчиларининг қийматларини $[2\tau, 3\tau]$ кесманинг охирида, $t = 3\tau$ деб олиб, ҳосил бўлган муносабатлардан аниқлаймиз:

$$x_1(3\tau) = x_1(1.5) = 0.292;$$

$$x_2(3\tau) = x_2(1.5) = 0.432.$$

Худди шундай тарзда $[3\tau, 4\tau]$ вақт оралиғида ҳолат тенгламаларини қуйидаги муносабатлардан аниқлаймиз:

$$x_1(p)=\frac{x_1(3\tau)}{p}+\frac{x_2(3\tau)}{p(p+2)}+\frac{\phi_3(p)}{p(p+2)}=\frac{0.292}{p}+\frac{0.432}{p(p+2)}-\frac{0.316}{p^2(p+2)^2}-\frac{1}{p^3(p+2)^2}-\frac{1}{p^4(p+2)^3}$$

$$x_2(p)=\frac{x_2(3\tau)}{p+2}+\frac{\phi_3(p)}{p+2}=\frac{0.432}{p+2}+\frac{0.908}{p(p+2)}-\frac{0.316}{p(p+2)^2}-\frac{1}{p^2(p+2)^2}-\frac{1}{p^3(p+2)^3}$$

Хатолик сигнали учун ифода, олдинги кесмага нисбатан, анча мураккаб кўринишга эга:

$$\varepsilon(p)=\phi_4(p)=\frac{1}{p}-x_1(p)=\frac{0.708}{p}-\frac{0.432}{p(p+2)}-\frac{0.908}{p^2(p+2)}+\frac{0.316}{p^2(p+2)}+\frac{1}{p^3(p+2)^2}-\frac{1}{p^4(p+2)^3}$$

Лапласнинг тескари шакл алмаштиришини бажариб, қуйидагига эга бўламиз:

$$x_1(t)=0.477-0.185e^{-2(t-1.5)}+0.3125(t-1.5)-0.171(t-1.5)e^{-2(t-1.5)}-0.125(t-1.5)^2-$$
$$-0.021(t1.5)^3+0.094(t-1.5)^4+0.3125(t1.5)^2e^{-2(t-1.5)}.$$

$$x_2(t)=0.3125+0.1195e^{-2(t-1.5)}+0.5955(t-1.5)e^{-2(t-1.5)}-0.0625(t-1.5)-$$
$$-0.0625(t-1.5)^2+0.15625(t-1.5)^2e^{-2(t-1.5)}.$$

Ҳосил бўлган муносабатлардан, [4τ, 5τ] вақт оралиғида жараённи аниқлаш учун зарур бўлган, ҳолат ўзгарувчиларининг қийматларини $t=4\tau$ нуқтада топамиз:

$$x_1(4\tau)=0.534,\ x_2(4\tau)=0.4335.$$

$[4\tau,5\tau]$ вақт кесмасида қуйидагига эга бўламиз:

$$x_1(p)=\frac{0.534}{p}+\frac{0.4335}{p(p+2)}+\frac{\phi_4(p)}{p(p+2)};$$

$$x_2(p)=\frac{0.4335}{p+2}+\frac{\phi_4(p)}{p+2};$$

$$\varepsilon(p)=\phi_5(p)=\frac{0.466}{p}-\frac{0.4335}{p(p+2)}-\frac{\phi_4(p)}{p(p+2)}.$$

Бундан, юқорида келтирилганидек каби ҳисоблашлар бажарилиб, ҳолат ўзгарувчилари топилади.

1.7.2 – мисол.

Тузилмали схемаси 1.6.4- расмда келтирилган тизимнинг оралиқ ва чиқиш координаталарини аниқланг. Сепарат каналларда кечикиш: $\tau_1 = \tau_2 = 0{,}4$ с. бошланғич шартлар – нол, бошланғич функциялар ҳам $\varphi_0^1(t), \varphi_0^2$ (t) деб олинади.

Ечиш: Ҳар бир қадамдан кейинги қадамга ўтишда тизимда бир хил умумий тузилмали ҳолатларнинг алмашинуви содир бўлгани учун, $[\iota\tau, (\iota+1)\tau], \iota = 0.1$ кесма учун графли моделни қуриш мумкин (1.7.2. б-расм).

$[0, \tau]$ кесма қуйидаги ҳолат ўзгарувчилари ва чиқиш координаталарига эга бўламиз:

$$x_1(p) = x_2(p) = x_3(p) = x_4(p) = 0, \quad y_1(p) = y_2(p) = 0;$$

бунда:

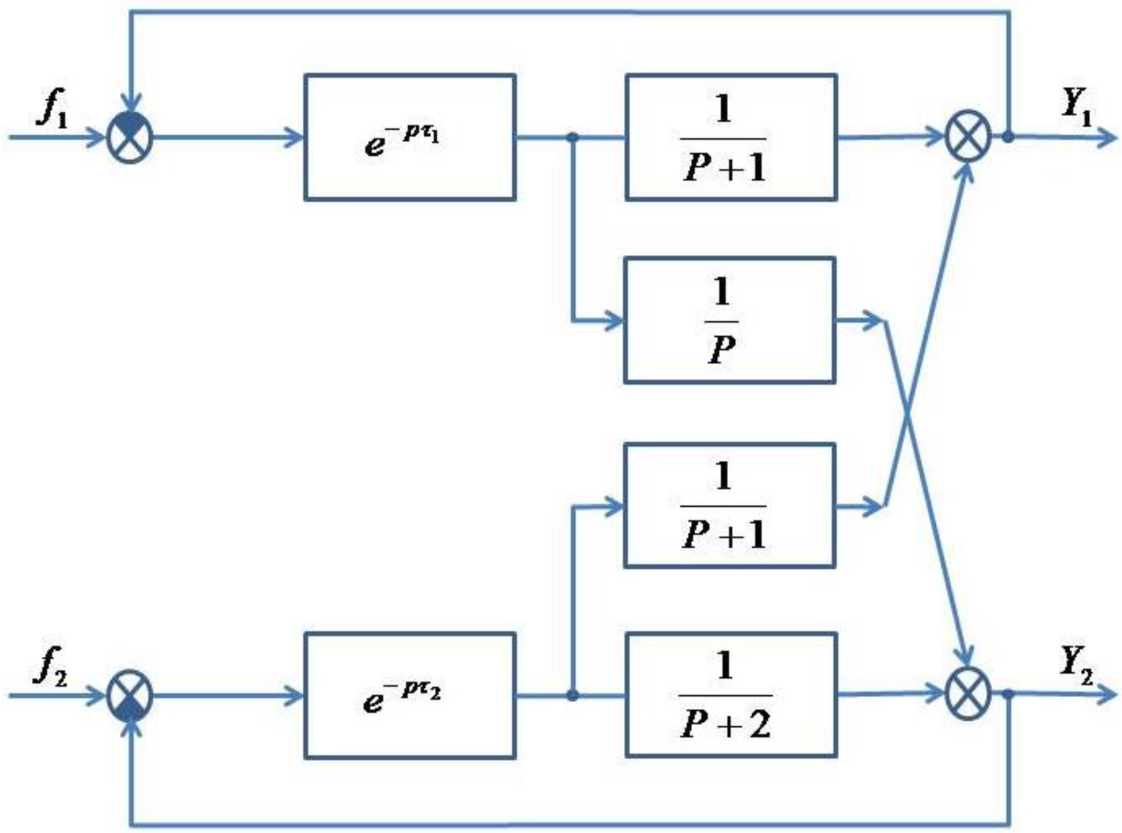
$$x_1(t) = x_2(t) = x_3(t) = x_4(t) = 0, \quad y_1(t) = x_2(t) = 0,$$

$$x_1(\tau) = x_2(\tau) = x_3(\tau) = x_4(\tau) = 0; \quad y_1(\tau) = y_2(\tau) = 0$$

.

$$\varphi_1^1(p) = \varepsilon_1(p) = 1/p; \qquad \varphi_1^2(p) = \varepsilon_2(p) = 1/p,$$ деб белгилаймиз:

$[0, \tau]$ кесмада узлуксиз $\varphi_1^1(t), \varphi_1^2(t)$ сигналлар тизимнинг тегишли каналларининг чиқишига таъсир қилишни бошлайди. Графдан кўриниб турибдики,



1.6.4 – расм

$$x_1(p) = \frac{1}{p+1}\varphi_1^1(p) = \frac{1}{P(p+1)},$$

$$x_2(p) = \frac{1}{p}\varphi_1^1(p) = \frac{1}{p^2},$$

$$x_3(p) = \frac{1}{p+1}\varphi_1^2(p) = \frac{1}{P(p+1)},$$

$$x_4(p) = \frac{1}{p}\varphi_1^2(p) = \frac{1}{P(p+1)},$$

$$y_1(p) = x_1(p) + x_3(p) = \frac{2}{P(p+1)},$$

$$y_2(p) = x_2(p) + x_4(p) = \frac{1}{p^2} + \frac{1}{p(p+2)},$$

$$\varepsilon_1(p) = \int_1(p) - y_1(p) = \frac{1}{p} - \frac{2}{p(p+1)},$$

$$\varphi_1^1(p) = \varepsilon_1(p),\ \varphi_2^2(p) = \varepsilon_2(p).$$

$[\tau,\ 2\tau]$ кесма учун вақтинчалик соҳага ўта туриб, қуйидагига эга бўламиз:

$$x_1(t) = 1 - e^{-(t-0.4)},\ x_2(t) = (t - 0.4),$$

$$x_3(t) = 1 - e^{-2(t-0.4)},\ x_4(t) = -0.5(1 - e^{-2(t-04)}),$$

$$y_1(t) = 2(1 - e^{-(t-0.4)}),$$

$$y_2(t) = t - 0.4 + 0.5(1 - e^{-2(t-0.4)}).$$

Тизимнинг оралиқ ва чиқиш координаталарини t = 2τ да ҳосил бўлган муносабатлардан топамиз:

$$x_1(2\tau) = 0.33,\ x_2(2\tau) = 0.4,\ y_1(2\tau) = 0.66,$$

$$x_3(2\tau) = 0.33,\ x_4(2\tau) = 0.375,\ y_2(2\tau) = 0.675$$

$[2\tau, 3\tau]$ вақт оралиғида жараёнларни ҳисоблашга ўтамиз. Бу оралиқда тизимнинг тегишли чиқишларида $\varphi_1^1(t), \varphi_1^2(t)$ сигналлар мавжуд. Демак, оралиқ ўзгарувчилар ва тизим чиқишлари қуйидаги ифодалар билан берилади:

$$x_1(p) = \frac{x_1(2\tau)}{p+1} + \frac{\varphi_2^1(p)}{p+1} = \frac{0.33}{P+1} + \frac{1}{p(p+1)} - \frac{2}{p(p+1)};$$

$$x_2(p) = \frac{x_2(2\tau)}{p} + \frac{\varphi_2^1(p)}{p} = \frac{0.4}{P} + \frac{1}{p} - \frac{1}{p^2(p+1)};$$

$$x_3(p) = \frac{x_3(2\tau)}{p+1} + \frac{\varphi_2^2(p)}{p+1} = \frac{0.33}{P+1} + \frac{1}{p(p+1)} - \frac{2}{p(p+1)} - \frac{1}{p(p+1)(p+2)};$$

$$y_1(p)=x_1(p)+x_3(p)=\frac{0.66}{P+1}+\frac{2}{p(p+1)}-\frac{2}{p(p+1)^2}-\frac{1}{p^2(p+1)}-\frac{1}{p(p+1)(p+2)}$$

$$\varphi_3^1(p)\varepsilon_1(p)=\int_1(p)-y_1(p),$$

$$\varphi_3^2(p)=\varepsilon_2(p)=\int_2(p)-y_2(p).$$

Вақт соҳасида қуйидагига эга бўламиз:

$$x_1(t)=1.33e^{-(t-0.8)}+2(t-0.8)e^{-(t-0.8)}-1,$$

$$x_2(t)=-(t-0.8)-2^{-(t-0.8)}+2.4,$$

$$x_3(t)=-0.67e^{-(t-0.8)}-0.5e^{-2(t-0.8)}+(t-0.8)+1.5,$$

$$x_4(t)=-0.225e^{-2(t-0.8)}-0.5(t-0.8)+(t-0.8)e^{-2(t-0.8)}+0.5,$$

$$y_1(t)=0.66e^{-(t-0.8)}-0.5e^{-2(t-0.8)}+(2(t-0.8)e^{-(t-0.8)}+0.5,$$

$$y_2(t)=-2e^{-(t-0.8)}1.5(t-0.8)+(t-0.8)e^{-2(t-0.8)}+2.9-0.225e^{-2(t-0.8)}.$$

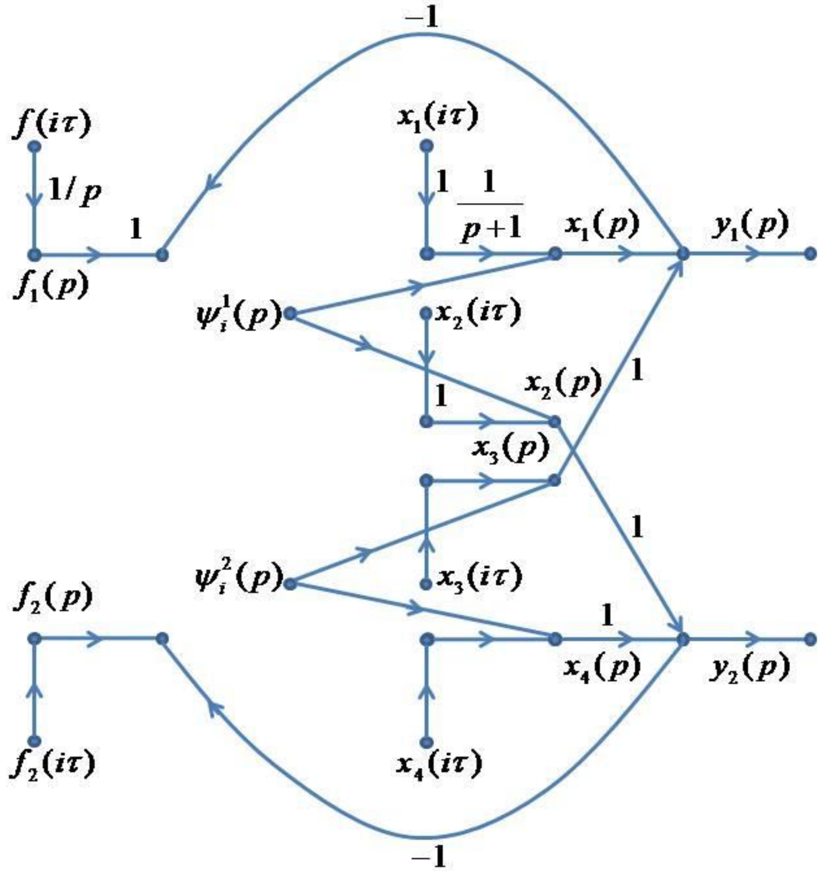
Бу ерда $t=3\tau$ бўлганда қуйидагига эга бўламиз:

$x_1(3\tau)=0.427$, $x_2(3\tau)=0.66$, $y_1(3\tau)=1.654$,

$x_3(3\tau)=1.227$, $x_4(3\tau)=0.329$, $y_2(3\tau)=0.989$.

Кейинги қадамларнинг ҳаммасида тизимнинг оралиқ ва чиқиш ўзгарувчилари худди шундай тарзда топилади. 1.7.3 – расмда $y_1(t)$ ва $y_2(t)$ узлуксиз функцияларнинг графиклари қисман келтирилган:

Б)



−1
f(iτ)
x1(iτ)
1/p
1
1
p+1
x1(p)
y1(p)
f1(p)
ψi1(p)
x2(iτ)
x2(p)
1
x3(p)
1
ψi2(p)
x3(iτ)
f2(p)
1
x4(p)
y2(p)
f2(iτ)
x4(iτ)
−1

1.6.5- расм

Хулоса

Илмий иш чизиқли узлуксиз ўзгарувчан кечикишга эга тизимларнинг ишлаш динамикасини ўрганишнинг графли моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш масалаларига бағишланган. Тадқиқотда кечикувчи аргументга эга чизиқли дифференциал тенгламаларни моделирлашда графларни қўллаш имконияти асосланган. Бошқарилиши, ҳолати бўйича кечикишга эга тизимлар кўриб чиқилган. Узлуксиз кечикувчи сигналнинг, кечикишга эга бошқариш объектининг графли модели қурилган. Интервалларда қадамли интеграллаш методининг, топологик методнинг, кечикувчи аргументга эга дифференциал тенгламани ечиш сонли усулларининг нисбий таҳлили берилган. Таклиф қилинган графли моделлар асосида доимий ва ўзгарувчан кечикишга эга бир ўлчовли ва кўп ўлчовли чизиқли узлуксиз тизимларнинг ишлаш динамикасини ўрганишнинг алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Адабиетлар

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 2007
2. Воронов А.А.Теория автоматического управления. Учебник. 1, 2 ч. – Москва, 2006
3. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: Учебное пособие. 3-е изд., - СПб.: Лань, 2016
4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем с запаздыванием. М.:Наука, 2001
5. Громов Ю.Ю. и др. Системы автоматического управления с запаздыванием. Учеб. пособие – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007
6. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов - СПб.: Политехника, 2008
7. Кадыров А.А. Топологический расчет систем автоматического управления: учебное пособие. Ташкент, 2003
8. Кадыров А.А. Машинные методы моделирования и исследования структурно-сложных систем. Ташкент, 2005
9. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. 2-е изд., - М.: Физматлит, 2010
10. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: Учебное пособие. 4-е изд., - СПб.: Лань, 2016
11. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования -и управления: Учебное пособие для втузов. Москва, 2005
12. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления. Часть I. -СПб.: 2012
13. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления. Часть II. -СПб.: 2012
14. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления/ Под редакцией В. А. Бесекерского. - М.: Наука, 2007
15. Солодов А.В., Солодова Е.А. Системы с переменным запаздыванием. Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 2007.
16. Страшинин Е.Э. Основы теории автоматического управления. Часть1.- Екатеринбург, 2000
17. Убайдуллаева Ш.Р. Использование метода динамических графовых моделей для расчета линейных систем с запаздыванием. Научно-технический журнал “Современные материалы, техника и технологии”, №5(8), декабрь 2016 г., Россия, Курск
18. Убайдуллаева Ш.Р. Графовое моделирование двумерной линейной стационарной системы автоматического управления с постоянным запаздыванием. Научно-технический журнал “Современные материалы, техника и технологии”, №5(8), декабрь 2016 г., Россия, Курск

19. Убайдуллаева Ш.Р. Графовое моделирование двумерной линейной стационарной системы автоматического управления с постоянным запаздыванием. Журнал “ВестСовременные материалы, техника и технологии”, №5(8), декабрь 2016 г., Россия, Курск
20. Убайдуллаева Ш.Р Сравнительный анализ решения линейного дифференциального уравнения 1- го порядка с запаздыванием методом шагов и методом графовых моделей. Научный журнал «Вестник Бухарского государственного университета», №4, декабрь 2018 г.
21. Убайдуллаева Ш.Р. Моделирование линейных непрерывных систем с постоянным запаздыванием на базе динамических графов. Международный научный журнал «Путь науки», №12, декабрь 2018 г., Россия, Волгоград.