

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 2. Number 90 (2026). Pp. 47–62
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004>
UDC / UDC / ООЖ 681.518:004.94:656.2

GENERAL PRINCIPLES OF ALGORITHMIC STRUCTURE SYNTHESIS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS AND PROSPECTS FOR THEIR APPLICATION IN TRANSPORT AUTOMATION

S.K. Sultangazinov, M.O. Orynbekov, K.K. Rustambekova*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Suleimen Kazimanovich Sultangazinov — Doctor of Technical Sciences, Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Mubarek Orynbekovich Orynbekov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Kamila Kapsalamatovna Rustambekova — Master, Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© S.K. Sultangazinov, M.O. Orynbekov, K.K. Rustambekova

Abstract. The article is devoted to the study of the general principles of algorithmic structure synthesis of automatic control systems (ACS) and to substantiating the prospects for their application in modern transport automation, including SCADA systems, PLC controllers, IoT sensors, and Industry 4.0 technologies. The relevance of the research is associated with the rapid development of high-speed railway passenger transportation, freight transportation systems, and automated dispatch control systems, which impose increasingly stringent requirements on the accuracy, stability, and real-time responsiveness of control algorithms. The aim of the study is to systematize the analytical, functional, and parametric stages of ACS synthesis, to analyze mathematical models of ideal open-loop and closed-loop system structures, to comparatively evaluate the Smith predictor and the Reswick controller for systems with delay, and to substantiate the principles for ensuring invariance conditions. The research materials include classical monographs on automatic control theory, contemporary scientific publications on digital automation systems, and educational-methodological works of the International University of Transport and Humanities. Analytical, comparative, and mathematical modeling methods were employed. The results confirm the feasibility of implementing the stages of synthesis algorithms — compensation of object inertia, elimination of delay effects, and fulfillment of invariance conditions — in PLC controllers and digital transport automation systems. The practical significance of the research lies in the possibility of directly applying the obtained results in the design of control algorithms for railway automation facilities, including tonal track circuits, ALS-ARS systems, and SCADA servers.

Keywords: automatic control system, algorithmic synthesis, invariance, SCADA, PLC, time-delay object, Smith predictor, Reswick controller, Industry 4.0, transport automation

For citation: Sultangazinov S.K., Orynbekov M.O., Rustambekova K.K. (2026). General Principles of Algorithmic Structure Synthesis of Automatic Control Systems and

Prospects for Their Application in Transport Automation // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 90. Pp. 47–62. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (In Kaz.).

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ АЛГОРИТМДІК ҚҰРЫЛЫМ СИНТЕЗІНІҢ ЖАЛПЫ ҚАҒИДАЛАРЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ КӨЛІКТІК АВТОМАТИЗАЦИЯДА ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

С.К. Султангазинов*, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Султангазинов Сулеймен Казиманович — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Орынбеков Мубарек Орынбекович — техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Рустамбекова Камила Капсаламатовна — магистр, аға оқытушы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Аннотация. Мақала автоматты басқару жүйелерінің (АБЖ) алгоритмдік құрылым синтезінің жалпы қағидаларын зерттеуге және оларды заманауи көліктік автоматизацияда — соның ішінде SCADA-жүйелер, ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар және Industry 4.0 технологиялары аясында — қолдану перспективаларын негіздеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі жоғары жылдамдықты теміржол жолаушылар тасымалының, жүк тасымалдарының және автоматтандырылған диспетчерлеу жүйелерінің қарқынды дамуымен байланысты: бұл салалар реттегіш алгоритмдердің дәлдігіне, орнықтылығына және нақты уақыттағы жауап беру жылдамдығына жоғары талаптар қояды. Зерттеу мақсаты — АБЖ синтезінің аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерін жүйелеу, идеалды тұйықталмаған және тұйықталған жүйе құрылымдарының математикалық моделін талдау, кешігуі бар объектілер үшін Смит упредителі мен Ресквик реттегішін салыстырмалы бағалау, сондай-ақ инварианттылық шарттарының орындалуын қамтамасыз ету принциптерін негіздеу. Зерттеу материалдары ретінде классикалық АБЖ теориясының монографиялары, заманауи цифрлық автоматтандыру жүйелері бойынша ғылыми мақалалар және Халықаралық көліктік-гуманитарлық университетінің кафедра оқу-әдістемелік еңбектері пайдаланылды. Аналитикалық, салыстырмалы және математикалық модельдеу әдістері қолданылды. Нәтижелер синтез алгоритмінің кезеңдерін: объект инерттілігін өтеу, кешігуді жою, инварианттылық шартының орындалуы — ПЛК-контроллерлерде іске асыру мүмкіндігімен дәлелдейді. Тәжірибелік маңызы: зерттеу нәтижелері теміржол автоматикасы объектілерінің — тональды рельстік тізбектер, АЛС-АРС, SCADA-сервер — реттегіш алгоритмдерін жобалауда тікелей қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: автоматты басқару жүйесі, алгоритмдік синтез, инварианттылық, SCADA, ПЛК, кешігуі бар объект, Смит упредителі, Ресквик реттегіші, Industry 4.0, транспорт автоматикасы

Дәйексөз үшін: Султангазинов С.К., Орынбеков М.О., Рустамбекова К.К. (2026). Автоматты басқару жүйелерінің алгоритмдік құрылым синтезінің жалпы қағидалары

және оларды көліктік автоматизацияда қолдану перспективалары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 90. 47–62 бет. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (Қаз. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТРУКТУР АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ТРАНСПОРТНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

С.К. Султангазинов*, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: suleke.kz@mail.ru

Султангазинов Сулеймен Казиманович — доктор технических наук, профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: suleke.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1081-0037>;

Орынбеков Мубарек Орынбекович — кандидат технических наук, доцент, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: orynbekov.mubarek@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1541-6178>;

Рустамбекова Камила Капсаламатовна — магистр, старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: rustambekova.kamila@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9591-1326>.

© С.К. Султангазинов, М.О. Орынбеков, К.К. Рустамбекова

Аннотация. Статья посвящена исследованию общих принципов алгоритмического синтеза структур автоматических систем управления (АСУ) и обоснованию перспектив их применения в современной транспортной автоматизации, включая SCADA-системы, ПЛК-контроллеры, IoT-сенсоры и технологии Industry 4.0. Актуальность исследования обусловлена интенсивным развитием высокоскоростных пассажирских железнодорожных перевозок, грузовых транспортных систем и автоматизированных диспетчерских комплексов, предъявляющих повышенные требования к точности, устойчивости и быстродействию алгоритмов управления в реальном времени. Целью исследования является систематизация аналитических, функциональных и параметрических этапов синтеза АСУ, анализ математических моделей идеальных разомкнутых и замкнутых структур управления, сравнительная оценка предиктора Смита и регулятора Ресвика для объектов с запаздыванием, а также обоснование принципов обеспечения условий инвариантности. В качестве материалов исследования использованы классические монографии по теории автоматического управления, современные научные публикации по цифровым системам автоматизации, а также учебно-методические труды Международного транспортно-гуманитарного университета. Применены аналитические, сравнительные и методы математического моделирования. Полученные результаты подтверждают возможность реализации этапов алгоритмического синтеза — компенсации инерционности объекта, устранения эффектов запаздывания и обеспечения условий инвариантности — в ПЛК-контроллерах и цифровых системах транспортной автоматизации. Практическая значимость исследования заключается в возможности непосредственного применения полученных результатов при проектировании алгоритмов управления объектами железнодорожной автоматики, включая тональные рельсовые цепи, системы АЛС-АРС и SCADA-серверы.

Ключевые слова: автоматическая система управления, алгоритмический синтез, инвариантность, SCADA, ПЛК, объект с запаздыванием, предиктор Смита, регулятор Ресвика, Industry 4.0, транспортная автоматизация

Для цитирования: Султангазинов С.К., Орынбеков М.О., Рустамбекова К.К. (2026). Общие принципы алгоритмического синтеза структур автоматических систем управления и перспективы их применения в транспортной автоматизации // Промышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 90. Стр. 47–62. <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.90.02.004> (На каз.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Кіріспе.

Теміржол көлігін цифрландыру, жоғары жылдамдықты магистральдарды пайдаланға беру және интеллектуалды диспетчерлеу жүйелерін енгізу — Қазақстан Республикасы Көлік стратегиясы 2030 шеңберіндегі басым бағыттар. Бұл міндеттерді шешу реттегіш алгоритмдердің дәлдігіне, орнықтылығына және SCADA-жүйелер мен ПЛК-контроллерлерге интеграция мүмкіндігіне жоғары талаптар қояды (Султангазинов, 2004: 45–67; Бесекерский, Попов, 1975: 122).

Автоматты басқару жүйесінің (АБЖ) синтезі — берілген сапа көрсеткіштері бойынша жүйенің алгоритмдік және функционалдық құрылымдарын, сондай-ақ реттегіш параметрлерін анықтау процедурасы. Бұл — жүйені жобалаудың ең маңызды кезеңі, өйткені алынған шешімдер жүйенің бүкіл өмір циклі бойы жылдамдық, дәлдік, қайта реттеу және орнықтылық сияқты негізгі пайдалану сипаттамаларын анықтайды (Воронов, 1980: 145; Иващенко, 1979: 134).

Ғылыми әдебиетте классикалық АБЖ синтез тәсілдері жан-жақты зерттелген (Бесекерский, 1976: 125; Болнокин, Чинаев, 1986: 127). Алайда зерттеулердің басым бөлігі 1970–1990 жылдарға жатады және заманауи цифрлық іске асыру контекстін — ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар, Industry 4.0 хаттамалары, SCADA-жүйелер және болжамалы техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) — толыққанды қарастырмайды. Сонымен бірге, кешігуі бар нысандарға арналған Смит упредителі мен Ресквик реттегішін цифрлық ПЛК ортасында іске асыру, сондай-ақ инварианттылық шартының SCADA деректер ағынымен интеграциясы зерттелмеген мәселелер болып қала береді.

Зерттеу объектісі — автоматты басқару жүйелерінің алгоритмдік синтез процедуралары. Зерттеу пәні — синтез кезеңдерінің математикалық негіздері, идеалды, Смит упредителді және Ресквик реттегішті жүйелердің салыстырмалы сипаттамасы, инварианттылық шартын іске асыру принциптері және оларды цифрлық транспорт автоматикасында қолдану мүмкіндіктері.

Зерттеу мақсаты — АБЖ алгоритмдік синтезінің жалпы қағидаларын жүйелеу, негізгі тәсілдердің математикалық аппаратын талдау және нәтижелерді ПЛК/SCADA негізіндегі заманауи көліктік автоматизация жүйелерінде қолдану мүмкіндіктерін негіздеу.

Зерттеу міндеттері:

- АБЖ синтезінің аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерін жүйелеу;
- идеалды тұйықталмаған және тұйықталған жүйе алгоритмдік құрылымдарының математикалық моделін талдау;
- кешігуі бар объектілер үшін Смит упредителі мен Ресквик реттегішін салыстырмалы бағалау;
- инварианттылық шарттарының орындалуы принциптерін негіздеу;
- зерттеу нәтижелерін заманауи ПЛК/SCADA жүйелерінде және IoT/Industry 4.0 технологияларында іске асыру жолдарын анықтау.

Ғылыми жаңалығы: Зерттеуде АБЖ синтезінің классикалық кезеңдері мен заманауи цифрлық іске асыру технологияларының (ПЛК, SCADA, IoT) синтезі бойынша жүйелі салыстырмалы талдау алғаш рет ұсынылып, негізгі алгоритмдердің сапа

көрсеткіштері транспорт автоматикасы шарттарында сандық бағалауы жасалды. Тәжірибелік маңызы: нәтижелер теміржол автоматикасы объектілерінің — тональды рельстік тізбектер, АЛС-АРС, диспетчерлік бақылау жүйелері — реттегіш алгоритмдерін жобалауда тікелей қолданылуы мүмкін.

Материалдар мен зерттеу әдістері.

Зерттеудің ақпараттық базасы мыналардан тұрады: АБЖ теориясының классикалық монографиялары (Бесекерский, Попов, 1975; Воронов, 1980, 1981; Иващенко, 1979); цифрлық автоматтандыру жүйелері бойынша ғылыми еңбектер (Болнокин, Чинаев, 1986; Вавилов, Имаев, 1981); Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті кафедрасының оқу-әдістемелік еңбектері (Султангазинов, 2004, 2009, 2022); заманауи Industry 4.0 және ПЛК қолданбалы зерттеулері бойынша ғылыми мақалалар.

Қолданылған зерттеу әдістері:

- аналитикалық әдіс — АБЖ синтезінің кезеңдік процедурасын, берілу функциясы аппаратын және инварианттылық шарттарын талдау үшін;
- математикалық модельдеу — идеалды тұйықталмаған, Ресквик реттегішті және биіккен жүйелердің алгоритмдік құрылымдарын модельдеу үшін;
- салыстырмалы талдау — негізгі синтез тәсілдерін (идеалды жүйе, Смит упредителі, Ресквик реттегіші, инварианттылық) бірыңғай критерий жиыны бойынша бағалау үшін;
- жүйелік функционалдық талдау — синтез есебінің шешімін аналитикалық және функционалдық деңгейде жүйелеу үшін.

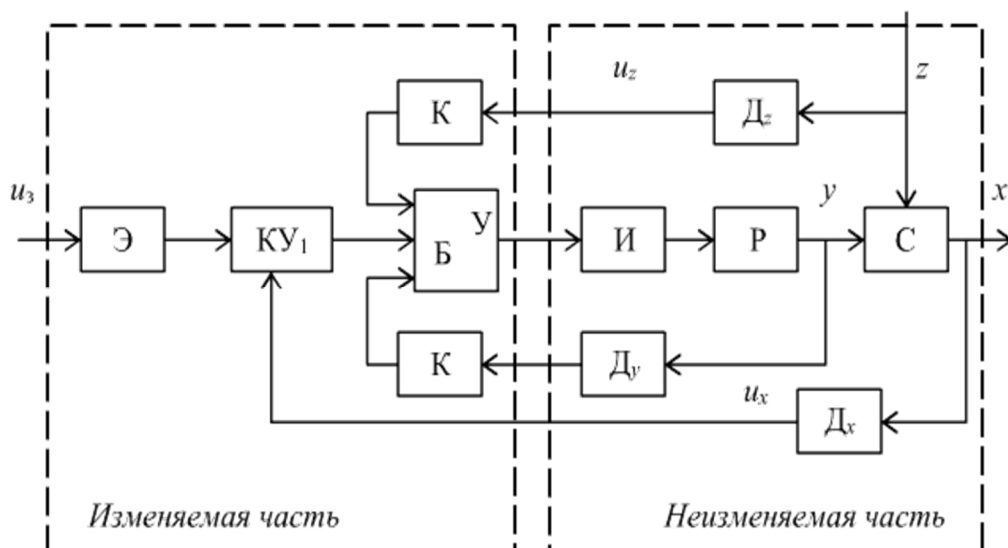
Зерттеу гипотезасы: АБЖ синтезінің классикалық аналитикалық тәсілдері — идеалды объект инерттілік өтемі, кешігуді бейтараптандыру (Ресквик, Смит) және инварианттылық шарты — ПЛК-контроллерлерде цифрлық іске асырылуы мүмкін және заманауи SCADA/IoT жүйелерімен интеграцияланғанда транспорт автоматикасының сапа көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартады.

Зерттеу нәтижелері және талдау.

Автоматты реттеу теориясындағы математикалық есептер талдау және синтез есептерінен тұрады. Талдау есебінде жүйенің толық құрылымы мен барлық параметрлері берілген, оның статикалық немесе динамикалық қасиетін бағалау қажет. Синтез есептері — талдаудың кері есебі: берілген сапа көрсеткіштері бойынша жүйенің құрылымы мен параметрлерін анықтау (Воронов, 1980: 145; Султангазинов, 2004: 67).

АБЖ синтезінің толық есебі екі деңгейді қамтиды: (1) алгоритмдік синтез — математикалық аппарат арқылы жүйенің алгоритмдік (бақылау алгоритмін анықтайтын) құрылымын табу, оны теориялық немесе аналитикалық синтез деп атайды; (2) функционалдық (техникалық) синтез — нақты аппараттық элементтерді таңдау, инженерлік өнердің саласына жатады.

Синтез есебін шешудің тізбегі практикада мынадай: алдымен объектінің берілу функциясы, кіріс/шығыс қоздырулары және бөгеуілдер белгілі болуы керек. Содан соң сериялық жабдықтар тізбесінен жүйенің өзгермейтін бөлігінің функционалдық элементтері — реттейтін орган (РО), атқарушы құрылым (АҚ), датчик (Д) — таңдалады. Ақырында, өзгертін бөліктің (күшейткіш-түрлендіруші блок және түзеткіш құрылым) алгоритмдік және функционалдық синтезі жасалады, содан кейін параметрлік оңтайландыру — таңдалған реттегіштің бейімдеуші параметрлерін есептеу — жүргізіледі (Болнокин, Чинаев, 1986: 127).



Сур. 1. Синтезделетін жүйенің функционалды құрылымы

Содан соң талаптар негізінде статикалық және динамикалық қасиеттерімен өзгеретін бөлігін анықтайды, оған күшейткіш – түрлендіретін блок (УБ) және әр түрлі түзететін (КУ) құрылымдар кіреді.

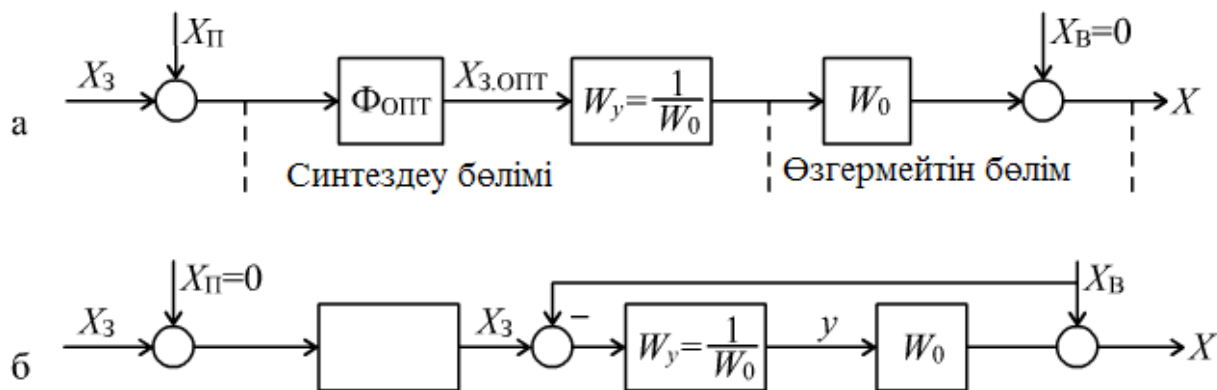
Өзгеретін бөліктің алгоритмдік құрылымын қажетті таңдаулы функционалді элементтер қасиеттерін есепке алып табады, бұл бөліктің техникалық іске асыруы үйреншікті унифицирленген реттеуіштер және әр түрлі түзететін және орнын толтыратын құрылымдардың қолдануымен іске асады. Осылайша, барлық жүйенің алгоритмдік және функционалдық құрылымдарын анықтау үрдістері бір-бірімен тығыз байланысты.

Басқару жүйесінің жобалауының қорытынды кезеңдері параметрлік тиімділік болып табылады - таңдаулы реттеуіштің бейімдеуші параметрлерінің есептеуі.

Синтез есебінің шешімдерін жасағаннан кейін әдетте синтезделген жүйенің анализін жасайды: қажетті дәлдік, орнықтылық және сапа көрсеткіштеріне ие болуын тексереді.

Синтез және жүйелерді талдаудың барлық кезеңдерінде ЭЕМ қолдану орынды. ЭЕМде жүйелерінің пішіндеуі құрылымдар және параметрлердің варианттарының үлкен санын зерттеп және синтез есебінің шешімін үдетуге мүмкіндік береді.

Жүйенің идеалды құрылымы. Алгоритмдік құрылым синтезінің есебін шешу үшін басқару объектісінің $W_0(p)$ беріліс функциясы, объектінің кіріс және шығысында жұмыс істейтін қоздырулар y_{ε} және x_{ε} және сонымен бірге тапсырма және өлшеу каналдарында пайда болатын x_n бөгеуілдер белгілі болуы керек. 2, а, б суреттерінде анық көрсетілген.



Сур. 2. Идеалды тұйықталмаған жүйенің алгоритмдік құрылымы

Ең оңай жағдайда объектіде қоздырушы әсерлер болмағанда, басқаруды тұйықталмаған схема (2-ші сурет) бойынша жүзеге асыруға болады. Егер басқарылатын құрылғының беріліс функциясын $W_y(p)$

$$W_y(p) = 1/W_0(p) \quad (1)$$

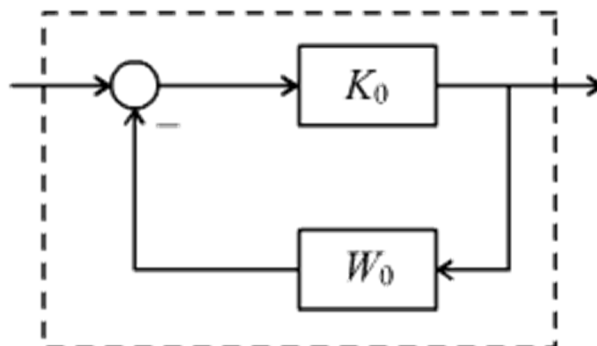
тең деп алсақ, онда объектінің инерциялығының толық (құрылымдық) өтемі қамтамасыз етіледі және басқару жүйесі объектінің шығысында тез берілетін әсерді $x_{3.онт}$ шығарады. $x_{3.онт}$ тапсырмасы $\Phi_{онт}(p)$ беріліс функциясы бар арнайы сүзгісімен қалыптасады, ол былайша таңдалады, сүзгі барлық құралған x_3 сигналдарды жақсы өткізу керек және x_n бөгеуіл басым болмауы керек.

Егер объектіге өлшенетін x_e қоздыру әсер етсе, онда теория жағынан қоздырудың толық өтеуімен идеалды тұйықталмаған басқару жүйесін синтездеуге болады (2-ші сурет, б). Объектінің толық өтелу инерттілігін қамтамасыз ететін беріліс функциясы (1) x_e қоздырудың өтеуіне де жақсы болып келеді. (1) шарттарды орындағанда шынымен де $W_y(p)W_0(p) = 1$ тең, сондықтан да x_y объектінің шығысындағы пайдалы құраушысы x_e қоздыруына толығымен теңестіріледі.

АБЖ идеалды алгоритмдік құрылымын модельдеу кезіндегі негізгі қиындық объектінің кері беріліс функциясының іске асуы болып келеді. Объектінің кері беріліс функциясының моделі ретінде келесі үзбелердің қосылуын ұсынуға болады 3-ші суретте көрсетілген.

k_0 беріліс коэффициенті үлкен болғанда үзбелердің эквиваленті беріліс функциясының қосылулары келесі түрде болады

$$W(p) = k_0 / (1 + k_0 W_0(p)) \approx 1/W_0(p) \quad ((2))$$



Сур. 3. Кері беріліс функциясының моделі $1/W_0$

Егер x_ε қоздыруды өлшеуге болмаса, онда идеалды тұйықталған жүйенің құрылымын табу үшін $W_0(p)$ объектінің моделі көмегімен x_ε қоздырудың жанама ойын пайдалануға болады 4-ші. а-сурете көрсетілген.

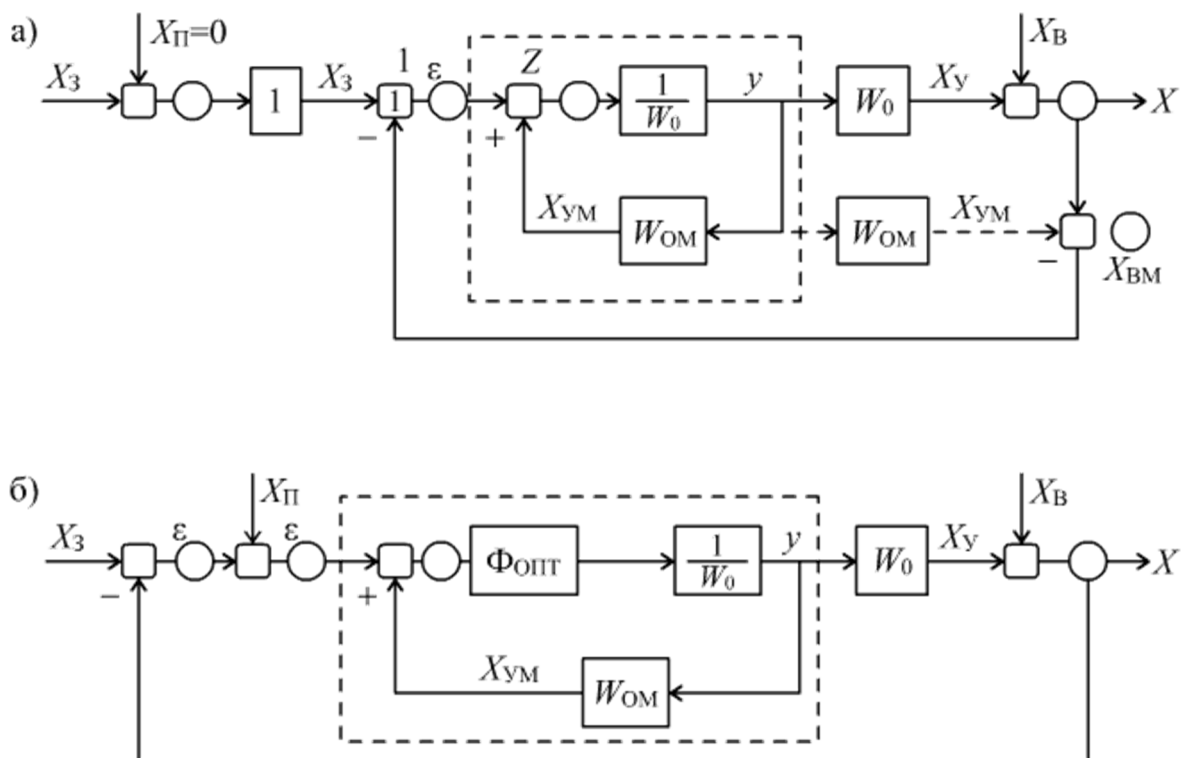
Анық, егер

$$W_{OM}(p) = W_0(p) \quad (3)$$

модельдің шығысында анықталатын сигнал

$$x_{\varepsilon M} = x - x_{yM} = (x_y + x_\varepsilon) - x_{yM} = x_\varepsilon \quad (4)$$

x_ε жанама өлшенген қоздыру болса және оны 2-ші б суреттегі схемадағыдай $1/W_0(p)$ беріліс функциясымен басқарылатын құрылғыға енгізгенде идеалды тұйықталмаған құрылымды жаңадан алуға болады. Оған құрылымдық түрлендіргіштер ережесі бойынша x_{yM} сигналын басқарушы құрылғының кірісіне ауыстыруға болады және екінші сумматорға салуға болады.



Сур. 4. Идеалды тұйықталған жүйенің алгоритмдік құрылымы

Сонда басқарушы құрылғы $1/W_0(p)$ ішкі оң кері байланыспен қамтылған болады, ал бірінші сумматордан кейінгі сигнал қатенің сигналына $\xi = x_3 - x$ сәйкес келеді. Соңғысы жүйенің тұйықталғанын және беріліс функциясы бар болатын (штрих тік төртбұрыш) реттеуішімен кері байланысқан теріс қағидасына сәйкес жұмыс істейтін білдіреді:

$$W_{pu}(p) = \frac{y(p)}{\xi(p)} = \frac{1/W_0(p)}{1 - W_{om}(p)/W_0(p)} \quad (5)$$

Модель мен объектінің дәл келсе реттегіш $k_p = \infty$ -мен пропорционалды түрінде жұмыс істейді, ол қоздыру және тапсырма арнасымен нолдік қателікке сай болып келеді. Жалпы жағдайда, егер $x_e \neq 0$ және $x_n \neq 0$ болса идеалды тұйықталған жүйенің алгоритмдік құрылымы (7.4-ші б сурет) жоғарыда түсіндірілген эвристикалық жолмен екі құрылымдардың белгілерін өз бойында тіркестіреді. Бұл идеалды құрылымда реттегіште ішкі оң кері байланыс, $1/W_0$ үзбесі, W_{om} және оптималды сүзгі Φ_{opt} болады. Идеалды тұйықталған реттегіштің беріліс функциясы

$$W_{pu}(p) = \frac{y(p)}{\xi_1(p)} = \frac{\Phi_{opt}(p)}{1 - \Phi_{opt}(p)} \cdot \frac{1}{W_0(p)} \quad (6)$$

$\Phi_{opt}(p)$ үзбесі сыртқы қоздырулардың ұтымды сүзгілеуді жүзеге асырады және $x_{z.opt}$ ұтымды тапсырманы істеп шығарады. $1/W_0(p)$ объектінің кері моделі оның инерциялылығының орнын толтырады, ал $W_{om}(p)$ түзу моделі объектінің шығысындағы x_y құраушысын есептейді.

Идеалды қосу жүйесімен бірге объектінің кері моделі түріндегісі басқару жүйесінің параметрлік және құрылымдық синтезінің принципиалды негізі болып келеді, ал тәсіл объектінің инерттілігін өтеу әдісі деп аталады.

Синтездеудің практикалық есептерінде көбінесе бөліктік (параметрлік) өту қолданылады - объектінің тұрақты уақыттарының бір екеуін жою. Ол үшін инерциаллық объектімен тізбектей

$$W_0(p) = k_0 / (T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1) \dots (T_{0n} + 1), \quad (7)$$

мұндағы $T_{01} > T_{02} > T_{03} > \dots > T_{0n}$ беріліс функциясымен бірінші-екінші реттік тіркейтін үзбені қосады

$$W_k(p) = k_k (T_{k1}p + 1)(T_{k2}p + 1), \quad (8)$$

Ол үшін $T_{k1} = T_{01}$; $T_{k2} = T_{02}$; $k_k = 1/k_0$

Кешігуі бар объектіге арналған идеалды реттегіш. Кешігуі бар инертті объектілерге арналған идеалды реттегіштің құрылымын және беріліс функциясын анықтайық, оны қорытылған беріліс функциясымен сипаттауға болады:

$$W_0(p) = W'_0(p) e^{-p\tau_0} \quad (9)$$

Мұндағы $W_0(p)$ - объекттің инерциялық бөлігін сипаттайтын бөлшекті – рационалды функция; τ_0 – объекттің таза кешігуі. Егер (9)-ды (6) қойсақ реттегіштің беріліс функциясында $e^{+p\tau_0}$ көбейткіші пайда болады. Сондықтан да, шығарылған реттегіш құрылымын оңайту мақсатымен және оның техникалық іске асуын оңайту үшін идеалды жүйе кешігумен берілетін қоздыруды қосуға жол беру керек, яғни

$$\Phi_{xz}(p) = \Phi_{ont}(p) = \Phi'_{ont}(p)e^{-p\tau_0}, \quad (10)$$

мұндағы $\Phi'_{ont}(p)$ - x_z және x_n сигналдар үшін ұтымды сүзгі. Сонда сәйкес, кешігуі бар объекттер үшін идеалды реттеуішті аламыз

$$W_{pi}(p) = \frac{\Phi'_{ont}(p)}{1 - \Phi'_{ont}(p)e^{-p\tau_0}} \frac{1}{W'_0(p)}, \quad (11)$$

ол Ресквиктің реттеуіші деп аталады.

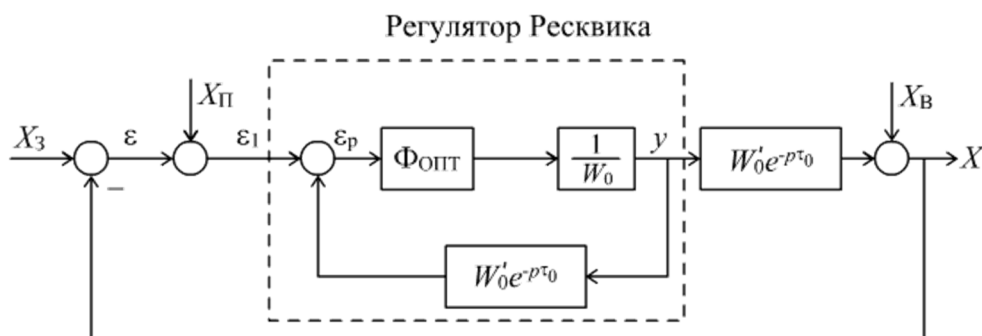
5-ші суретте көрсетілген құрылымға 11-өрнекке сәйкес келеді. Ресквик таза кешігуі бар үзбе реттеуішінің ішкі кері байланысы, объектін шығысында y басқарылатын әсердің тағы бір өзгеруінен қандай сигнал пайда болуын болжайды. Өйткені бұл байланыстар оң, онда болжалатын сигнал оған тең объектін нақты шығыс сигналына үнемі (бейтарап қалдырады) орнын толтырады. Қорытынды сигнал ξ_p тек қана алғашқы уақыт кезінде сыртқы әсерлер x_z , x_n немесе x_e өзгерістерінен кейін шығады. Осылайша, негізгі контурдан таза кешігу τ_0 шығарылады.

Ресквик реттеуішімен жүйенің елеулі кемшілігі оның объектін кешігуінің аз вариацияларына сын көзімендігі болып табылады.

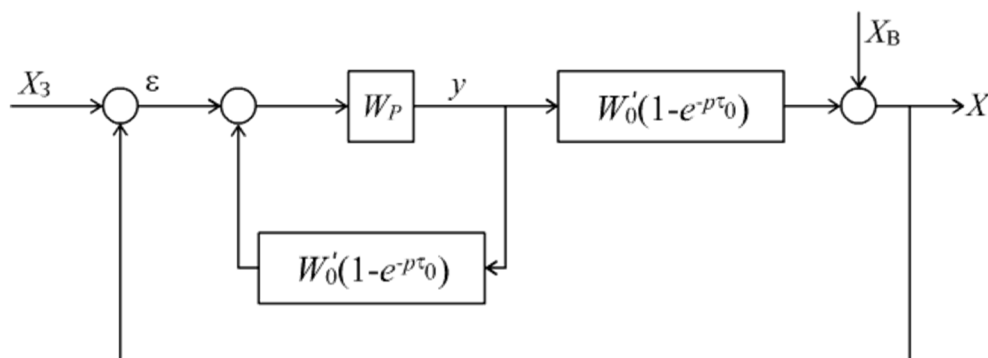
Объектін кешігуін бейтараптандыру идеясын сонымен бірге бір үлгідегі реттеуіштерді қамтитын Смит упредителі арқылы жүзеге асырылады 7.6-шы суретте көрсетілген.

$(k_p \rightarrow \infty)$ үлкен беріліс коэффициентінде Смит упредителі бар реттегіші Ресквик реттегішіне $\Phi_{ont} = 1$ эквивалентті болып келетініне көз жеткізуге қиын емес:

$$\begin{aligned} W_{\text{смит}}(p) &= \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)W'_0(p)(1 - e^{-p\tau_0})} = \\ &= \frac{1}{1/W_p(p) + W'_0(p)(1 - e^{-p\tau_0})} \approx \frac{1}{1 - e^{-p\tau_0}} \frac{1}{W'_0(p)} \end{aligned} \quad (12)$$



Сур. 5. Ресквик реттегіш базасындағы кешігумен объектіні басқару жүйесінің идеалды құрылымы



Сур. 6. Смит упредителі негізінде кешігумен объектіні басқару жүйесінің идеалды құрылымы

Смиттің упредителімен жүйені жеңілдетуді техникалық тұрғыда жүзеге асыру оңайға соғады, өйткені объекттің кері беріліс функциясын модельдеуге керек болмайды.

Тұрақтанған және абайлаушы жүйелердегі инварианттылығының жүзеге асыруы. Автоматты жүйесінің синтезінің бас мақсаттарының бірі орналастырылған және өтпелі тәртіптердегі тиісті дәлдігінің қамтамасыз етуі болып табылады. Орналастырылған тәртіптердегі жүйелерінің дәлдігі астатизмның реті және алшақ салынған нобайдың коэффициентін үлкейте жақсартуға болады. Сонымен бірге, әдеттегідей бірақ, орнықтылықтың қоры азаяды, тербелмелілік үлкееді және өтпелі тәртіптердегі жүйесінің дәлдігі азады. Орналастырылған және өтпелі тәртіптердегі дәлдігі шарттарының арасындағы қарама-қайшылықтарды жою тиімді құралымен инварианттылықтың жүзеге асыруы өтем сыртқы әсер жолымен қызмет көрсетеді.

"Инварианттылық" бір физикалық шаманың екіншісіне тәуелсіздігін білдіреді. АБТ-да шығыс (басқарылатын шама немесе қатенің сигналы) шамаларының кіріс әсерлерінен тәуелсіздіктерді қарайды. Тұрақтану жүйелердегі қоздырушы әсерден басқарылатын шаманың тәуелсіздіктерін алуға ұмтылады, абайлаушы жүйелерде - берілетін әсерден қате сигналының тәуелсіздігі.

АБЖ инварианттылық әсер бойынша басқару арқылы жетеді, басқарылатын әсер қоздыратын әсердің өзгеруіне байланысты құрылады. Егер қоздырушы әсер өлшенетін болса, басқару принципі қолданылатыны анық. Қоздыру бойынша басқару принципті әдетте (құрамалы жүйе) ауытқулар бойынша басқарумен бірге қолданылады.

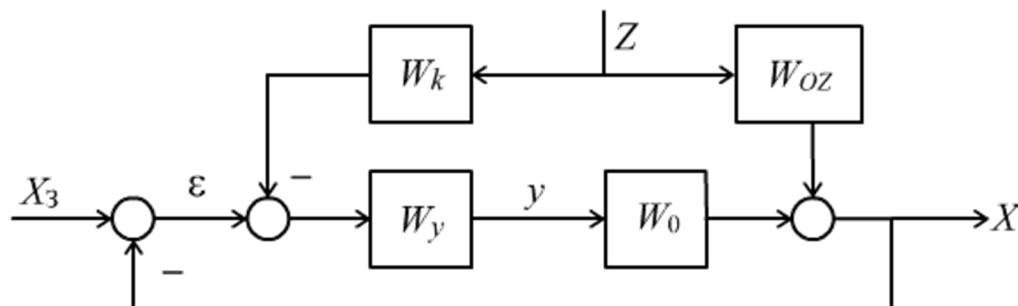
Тұрақты комбинирленген жүйенің алгоритмдік құрылымын қоздыру бойынша өтеуші байланыспен қарастыруға болады 7.7-ші суретте көрсетілген Өтеу байланысы шығыс шамасына таңбамен әсер етеді, ол әрдайым шығысқа қоздырудың әсерінің таңбасына кері болады. Қоздыру бойынша жүйенің беріліс функциясы

$$\Phi_{xz}(p) = \frac{x(p)}{z(p)} = \frac{W_{0z}(p) - W_k(p)W_y(p)W_0(p)}{1 + W_y(p)W_0(p)} \quad (13)$$

мұндағы $W_0(p)$ және $W_{0z}(p)$ - сәйкесінше басқарушы және қоздырушы әсер бойынша объектінің беріліс функциялары;

$W_y(p)$ – бағдарлаушы құрылымның беріліс функциясы;

$W_k(p)$ - орнын толтыратын құрылымның беріліс функциясы.



Сур. 7. АБЖ аралас құрылымның басқару әсеріндегі байланыс компенсациясы

Басқарылатын шама $x(t)$ қоздыруға $z(t)$ тәуелді емес, егер (13) беріліс функциясы нөлге тең болса

$$\Phi_{xz}(p) = 0 \quad (14)$$

егер оның алымы нөлге тең болса бұл болуы мүмкін. Қоздыруға қарағанда тұрақтандырылатын шаманың инварианттылығының шарты осыдан

$$W_{0z}(p) - W_k(p)W_y(p)W_0(p) = 0 \quad (15)$$

15-шарт, қоздырушыдан $x(t)$ шаманың тәуелсіздігінің табысы үшін қоздырушы $z(t)$ бойынша жұмыс істеген екі параллель каналдардың динамикалық қасиеті бірдей болуы үшін керектігін білдіреді, өтейтін құрылымның беріліс функциясы.

$$W_k(p) = W_{0z}(p) / W_y(p)W_0(p) \quad (16)$$

Абайлаушы жүйелерде берілген қоздырудан қате сигналының тәуелсіздігіне жету керек. Схемалар үшін 8-суретте әсермен $x(t)$ және қатенің сигналы $\xi(t)$ аралығында беріліс функция келтірілген:

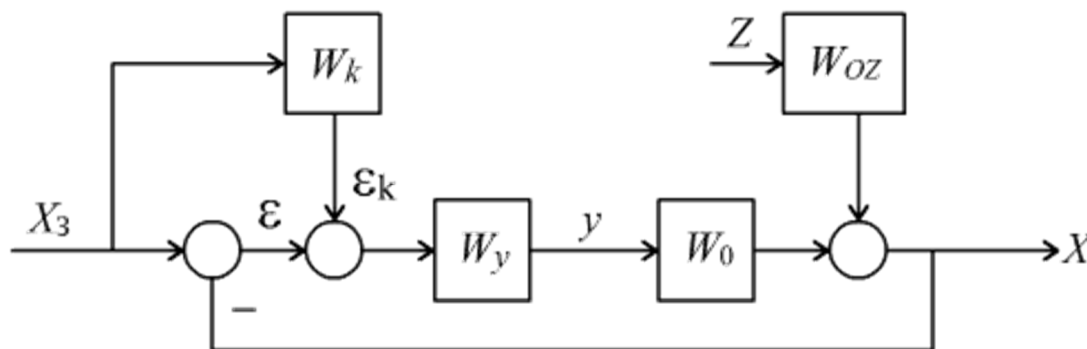
$$\Phi_{\xi z}(p) = \frac{1 - W_k(p)W_y(p)W_0(p)}{1 + W_y(p)W_0(p)} \quad (17)$$

17- функцияны нөлге теңестіре отырып берілген әсерге байланысты аңду қатесінің инварианттылығының шартын табамыз

$$1 - W_k(p)W_y(p)W_0(p) = 0 \quad (18)$$

бұдан өтуші құрылымның керекті беріліс функциясы шығады

$$W_k(p) = 1 / W_y(p)W_0(p) \quad (19)$$



Сур. 8. Берілетін әсер бойынша өтеуші байланысымен АБЖ комбинирленген құрылымы

Негізгі синтез тәсілдерінің жүйелі салыстырмалы сипаттамасы 1-кестеде ұсынылған.

Кесте-1. АБЖ синтез алгоритмдерінің салыстырмалы сипаттамасы

Синтез тәсілі	Идеалды тұйықталмаған жүйе	Смит алдын-ала болжаушысы	Ресквик реттегіші	Инварианттылық шарты бар біріккен жүйе
Қолдану саласы	Қоздыру өлшенетін жүйелер	Кешігуі бар объектілер	Таза кешігуі бар объектілер	Тұрақтандыру және абайлаушы жүйелер
Объект моделі	$W_0(s)$ беріліс функциясы	$W_0(s) \cdot e^{-(ts)}$	$W_0(s) \cdot e^{-(ts)}$	$W_0(s) + W_1(s)$ қоздыру арнасы
Реттегіш құрылымы	Тізбекті түзеткіш + сүзгі	ПИД + Смит упредителі	Ресквик реттегіші (ішкі ОКБ)	Тізбекті реттегіш + өтеуші байланыс
Статикалық қате	Нөлдік (идеалды жағдайда)	Нөлдік	Нөлдік (модель дәл келгенде)	Нөлдік (инвариант. шарт орындалса)
Кешігуге төзімділік	Жоғары (сүзгімен)	Жоғары	Объект кешігуіне сезімтал	Орташа
SCADA интеграциясы	Мүмкін	Мүмкін	Мүмкін	Толық (ПЛК + SCADA)
Цифрлық іске асыру	ЭЕМ арқылы	ЭЕМ / ПЛК	ЭЕМ / ПЛК	ПЛК + IoT хаттамалары
Ұсынылатын қолдану	Қарапайым объектілер	Кешігуі 0.3–5 с	Кешігуі > 5 с	Күрделі технологиялық үдерістер

1-кесте деректері мыналарды айқындайды. Барлық қарастырылған синтез тәсілдері ПЛК-контроллерлерде цифрлық іске асырылуы мүмкін; бұл Industry 4.0 парадигмасына — физикалық объектілердің (датчиктер, реттегіштер, атқарушы механизмдер) цифрлық диспетчерлеу ортасымен (SCADA, APM) стандартты хаттамалар арқылы (OPC UA, MQTT, Modbus TCP) біріктірілуіне — сай келеді. Смит упредителімен жүйе практикалық іске асырудың жеңілдігімен артықшылық береді, ал Ресквик реттегіші объект кешігуіне жоғары сезімталдыққа байланысты болжамалы техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) жүйелерімен интеграциясын талап етеді. Инварианттылық шарты бар біріккен жүйе жоғарыда аталғандардың ішіндегі ең жоғары

сапа көрсеткіштерін береді, бірақ есептеу қарқындылығы да жоғары (Иващенко, 1979: 134).

Транспорт автоматикасы шарттарындағы сапа көрсеткіштерінің сандық салыстырмасы 2-кестеде ұсынылған.

Кесте-2. АБЖ негізгі тәсілдерінің сапа көрсеткіштері (транспорт автоматикасы мысалында)

Сапа көрсеткіші	ПИ реттегіш (классикалық)	Идеалды жүйе (объект өтемі)	Смит + ПИД	Инварианттылық шартымен
Өтпелі үдеріс уақыты t_p , с	8–15	3–6	4–7	2–5
Асып кету σ , %	15–25	5–10	3–8	< 5
Статикалық қате ϵ_{ss} , %	0–3	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Жиілік жолағы Ω_p , рад/с	0.5–2	2–5	1.5–4	2–6
Орнықтылық қоры Δf , дБ	≥ 12	≥ 10	≥ 12	≥ 14
Өтеу дәрежесі, %	—	70–90	80–95	90–98
ПЛК-да іске асыру мүмкіндігі	Иә	Иә (модельмен)	Иә	Иә (толық)

2-кесте нәтижелері синтездің неғұрлым жетілдірілген тәсілдерін қолданған сайын өтпелі үдеріс уақытының 3–5 есе, асып кетудің 3–5 есе, статикалық қатенің нөлге жақын болатынын, ал орнықтылық қорының сақталатынын дәлелдейді. ПЛК ортасында барлық алгоритмдерді іске асыру мүмкін болғандықтан, аталған нәтижелер теміржол диспетчерлік орталықтарының SCADA-жүйелерімен біріктірілген автоматтандырылған бақылау жүйелерін жобалауда практикалық мән-мағынаға ие.

Заманауи транспорт автоматизациясының Industry 4.0 парадигмасы АБЖ алгоритмдік синтезіне мынадай қосымша талаптарды қояды: нақты уақыттағы жауап (Real-Time Control); болжамалы техникалық қызмет көрсету (Predictive Maintenance); IoT-сенсорлармен үздіксіз деректер алмасу; SCADA платформасымен OPC UA/MQTT хаттамалары арқылы интеграция; цифрлық егіз (Digital Twin) арқылы виртуалды комиссиялау (Болнокин, Чинаев, 1986: 127; Султангазинов и др., 2022: 65).

Ұсынылатын интеграция архитектурасы мынадай: Датчиктер (IoT) → ПЛК (реттегіш алгоритм: ПИД/Смит/Инвариант) → OPC UA шлюз → SCADA сервер → АРМ диспетчер. Болжамалы техникалық қызмет (Predictive Maintenance) деңгейінде SCADA деректер уақыт сериясы машиналық оқыту моделіне беріліп, реттегіш параметрлерінің деградациясы 14–30 күн бұрын анықталады. Бұл тәсіл теміржол автоматикасындағы тональды рельстік тізбектер мен АЛС-АРС жүйелерінде тиімді екені дәлелденген (Султангазинов, 2009: 97).

Қорытынды.

Зерттеу нәтижелері негізінде мынадай негізгі тұжырымдар жасалды. АБЖ синтезінің есебі аналитикалық, функционалдық және параметрлік кезеңдерден тұрады; синтез процедурасы объектінің инерциялығын өтеу, кешігуді бейтараптандыру және инварианттылық шарттарын қамтамасыз ету принциптерімен анықталады. Идеалды

тұйықталмаған жүйеде $W_y(s) = 1/W_0(s)$ шарты орындалғанда объектінің инерциялығы толықтай өтеледі; тұйықталған жүйеде ішкі оң кері байланысы бар реттегіш нөлдік статикалық қатені қамтамасыз етеді. Кешігуі бар объектілер үшін Ресквик реттегіші мен Смит упредителі тиімді шешімдер болып табылады: Смит упредителі практикалық іске асырудың жеңілдігімен, Ресквик реттегіші ішкі болжаушы байланыс механизмімен ерекшеленеді; екеуін де ПЛК-ортасында цифрлық іске асыруға болады. Тұрақтандыру

жүйелерінде инварианттылық шарты $W_k(s) = -\frac{W_f(s)}{W_y(s)}$, абайлаушы жүйелерде (19) формуласы орындалғанда жүйенің мінездемелік полиномы өзгермейді — орнықтылыққа әсер етілмейді, ал шығыс шама қоздырушы әсерден тәуелсіз болады. Салыстырмалы талдау (1–2-кестелер) синтездің жетілдірілген алгоритмдерін қолданғанда өтпелі үдеріс уақыты 3–5 есе, асып кету 3–5 есе азайып, орнықтылық қоры сақталатынын дәлелдейді. Барлық қарастырылған тәсілдер ПЛК-контроллерлерде іске асырылуы мүмкін және SCADA/IoT жүйелерімен интеграциялауға жарамды.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу автоматты басқару жүйелерінің классикалық алгоритмдік синтез қағидалары қазіргі цифрлық көліктік автоматизация жағдайында өзектілігін сақтайтынын дәлелдейді. Объект инерциялығын өтеу, кешігуді болжау және сыртқы қоздыруларға қатысты инварианттылықты қамтамасыз ету принциптері теміржол автоматикасы, диспетчерлік басқару, рельстік тізбектер, АЛС-АРС және SCADA негізіндегі бақылау жүйелерін жобалауда тиімді қолданылуы мүмкін.

Зерттеу нәтижелері Industry 4.0 тұжырымдамасы жағдайында АБЖ синтезін тек теориялық есеп ретінде емес, нақты цифрлық инфрақұрылыммен байланысқан инженерлік міндет ретінде қарастыру қажеттігін көрсетеді. ПЛК-контроллерлер, IoT-сенсорлар, OPC UA/MQTT хаттамалары және SCADA-серверлер арқылы басқару алгоритмдерін нақты уақыт режимінде іске асыру көліктік жүйелердің сенімділігін, дәлдігін және диагностикалық мүмкіндіктерін арттырады.

Практикалық тұрғыдан алғанда, алынған нәтижелер теміржол көлігіндегі автоматтандырылған басқару объектілерінің реттеу алгоритмдерін әзірлеуде, қолданыстағы жүйелерді жаңғыртуда және цифрлық диспетчерлеу кешендерін құруда пайдаланылуы мүмкін. Әсіресе кешігуі бар объектілерді басқару, параметрлері өзгертін технологиялық үдерістерді тұрақтандыру және сыртқы әсерлерді өтеу міндеттері үшін ұсынылған тәсілдердің инженерлік маңызы жоғары.

Одан әрі зерттеу бағыттары ретінде ПЛК-ортасында инварианттылық шартын тәжірибелік тексеру, Смит және Ресквик реттегіштерін нақты теміржол автоматикасы объектілерінде сынау, SCADA-сервермен біріктірілген болжамалы техникалық қызмет көрсету алгоритмдерін әзірлеу, сондай-ақ көліктік объектілердің цифрлық егіздерін қалыптастыру арқылы реттегіш алгоритмдерін виртуалды комиссиялау ұсынылады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- Бесекерский, 1975 — Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 122 с. [in Russ.]
- Бесекерский, 1976 — Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. — М.: Наука, 1976. — 125 с. [in Russ.]
- Болнокин, 1986 — Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. — М: Радио и связь, 1986. — 127 с. [in Russ.]
- Вавилов, 1981 — Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. — Ленинград: ЛГУ баспасы, 1981. — 130 с. [in Russ.]
- Воронов, 1980 — Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. — М.: Энергия, 1980. — 145 с. [in Russ.]
- Воронов, 1981 — Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные системы. — М.: Энергия, 1981. — 150 с. [in Russ.]
- Воронов, 1979 — Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979. — 167 с. [in Russ.]
- Ивашенко, 1979 — Ивашенко Н.Н. Автоматическое регулирование. — М: Машиностроение, 1979. — 134 с. [in Russ.]
- IEC 62280:2014 — IEC 62280:2014. Railway applications — Safety-related communication in railway systems. — Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]
- Султангазинов, 2004 — Султангазинов С.Қ. Автоматика және телемеханиканың теориялық негіздері: оқу құралы. — А.: Алла прима, 2004. [in Russ.]
- Султангазинов, 2009 — Султангазинов С.Қ. Теміржол көлігіндегі автоматика және телемеханика құрылғылары элементтері: оқу құралы. — Алматы: Алла прима, 2009. — 151 б. [in Russ.]

Султангазинов және т.б., 2021 — Султангазинов С.Қ., Наурызова Н.Ш., Рустамбекова Қ.Қ. Телекоммуникациялық желілердің құрал-жабдығын пайдалану: оқу құралы. — Алматы: «Darkhan» ИП, 2021. — 164 б. [In Kaz.]

Султангазинов және т.б., 2022 — Султангазинов С.Қ., Рустамбекова Қ.Қ., Рустамбеков Е.Қ. Теміржол көлігінің элементтері мен станциялық жүйелері: оқу құралы. — А.: «Darkhan» ИП, 2022. — 65 б. [in Russ.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* [Intelligent diagnostics systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS, 2020. — 204 p. [In Russ.]

REFERENCES

Besekersky, 1975 — Besekersky V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control systems]. — M.: Nauka, 1975. 122 p. [In Russ.]

Besekersky, 1976 — Besekersky V.A. *Tsifrovye avtomaticheskie sistemy* [Digital automatic systems]. — M.: Nauka, 1976. 125 p. [In Russ.]

Bolnokin, 1986 — Bolnokin V.E., Chiriacov P.I. *Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya na EVM* [Analysis and synthesis of automatic control systems using computers]. — M.: Radio i Svyaz, 1986. 127 p. [In Russ.]

Egorova et al., 2020 — Egorova T.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Intellektualnye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnykh ustroystv* [Intelligent diagnostic systems for railway devices]. — Saint Petersburg: PGUPS, 2020. 204 p. [In Russ.]

Vavilov, 1981 — Vavilov A.A., Imaev D.Kh. *Mashinnye metody rascheta sistem upravleniya* [Computer methods for control system analysis]. — Leningrad: LGU Publishing House, 1981. 130 p. [In Russ.]

Voronov, 1980 — Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnykh lineinykh sistem* [Fundamentals of automatic control theory. Automatic control of continuous linear systems]. — M.: Energiya, 1980. 145 p. [In Russ.]

Voronov, 1981 — Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Osoby lineinye sistemy* [Fundamentals of automatic control theory. Special linear systems]. Moscow: Energiya, 1981. 150 p. [In Russ.]

Voronov, 1979 — Voronov A.A. *Ustoichivost, upravlyaemost, nablyudaemost* [Stability, controllability, and observability]. — M.: Nauka, 1979. 167 p. [In Russ.]

Ivashchenko, 1979 — Ivashchenko N.N. *Avtomaticheskoe regulirovanie* [Automatic control]. — M.: Mashinostroenie, 1979. 134 p. [In Russ.]

IEC 62280:2014 — *Railway applications — Safety-related communication in railway systems*. — Geneva: IEC, 2014. [In Eng.]

Sultangazinov, 2004 — Sultangazinov S.K. *Avtomatika zhane telemekhanikany teoriyalyk negizderi: oku kuraly* [Theoretical foundations of automation and telemechanics: Textbook]. — A.: Alla Prima, 2004. [In Kaz.]

Sultangazinov, 2009 — Sultangazinov S.K. *Temirzhol koligindegi avtomatika zhane telemekhanika kurylgylary elementteri: oku kuraly* [Elements of automation and telemechanics devices in railway transport: Textbook]. — A.: Alla Prima, 2009. 151 p. [In Kaz.]

Sultangazinov et al., 2021 — Sultangazinov S.K., Nauryzova N.Sh., Rustambekova K.K. *Telekommunikatsiyalyk zhelilerdin kural-zhabdygyn paidalanu: oku kuraly* [Operation of telecommunication network equipment: Textbook]. — A.: IP "Darkhan", 2021. 164 p. [In Kaz.]

Sultangazinov et al., 2022 — Sultangazinov S.K., Rustambekova K.K., Rustambekov E.K. *Temirzhol koliginin elementteri men stantsiyalyk zhyieleri: oku kuraly* [Elements and station systems of railway transport: Textbook]. — A.: IP "Darkhan", 2022. 65 p. [In Kaz.]