

УДК 621.397, 621.31

С.С. Костелов

Луцький національний технічний університет

## **РОЗРОБКА СТРУКТУРИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПО ДОСЛІДЖЕННЮ ТА ВИПРОБУВАННЮ АВІАЦІЙНИХ ФОРСУНОК**

*Розглянуто проблему по дослідженню та випробуванню авіаційних форсунок для виробів РД-33, РД-133, на базі існуючих засобів та методів, які застосовуються на авіаремонтних підприємствах. Проаналізовано методи вирішення даної проблеми і показано, що одним з можливих варіантів розв'язання завдання є впровадження телевізійної вимірювальної системи, яка дасть можливість покращити точність та якість вимірювань при випробуванні. В процесі аналізу встановлено, що підвищення роздільної здатності та використання інфрачервоного підсвічування дає можливість досліджувати нові властивості витоку палива з форсунки, які були непомітними при візуальному спостереженні. На даному етапі дослідження, за результатами проведеної роботи розроблено узагальнену структурну схему автоматизованої системи.*

**Ключові слова:** авіаційна форсунка, структурна схема автоматизованої системи, телевізійні вимірювальні системи, засоби оптичного спостереження.

### **I. Постановка проблеми**

На даний момент у авіаційній промисловості значна увага приділяється розробці нових вузлів та агрегатів літаків, метою якої є покращення їх технічних та економічних характеристик. У той же час недостатньо уваги приділяється розробці нового діагностичного обладнання для перевірки працездатності та продуктивності експлуатованих вузлів і агрегатів машин. Авіаремонтні заводи, що займаються діагностикою машин, їх вузлів та агрегатів, нараховують до десятка складних випробувальних стендів і установок, які потребують автоматизації та комп'ютеризації. Особливу увагу в цьому напрямку привертають стенди для діагностики та випробування паливної системи і насосних маслоагрегатів, які на відміну від балансувальних стендів та панелей діагностики електроніки не мають автоматизованих аналогів і для покращення продуктивності їх роботи потрібна модернізація.

Використання діючого стенду випробування та діагностики форсунок основного паливного вузла У-2631-87 передбачає багато людських факторів: вимірювання здійснюється методом візуального спостереження, шкідливе та небезпечне середовище, ручні розрахунки, відсутність загальної електронної бази даних, відсутність розрахунку статистичних показників, повторне проведення дослідів. Також цей стенд не дає можливості виконувати дослідження нових властивостей форсунок, що могло б прискорити та покращити ремонтні роботи вузлів двигуна.

### **II. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На сьогоднішній день існують сотні розробок по дослідженню параметрів роботи відцентрових форсунок різних двигунів та агрегатів, але не зустрічаються розробки та звіти досліджень авіаційних відцентрових форсунок. Це обумовлено секретністю розробок та дослідів, які не виносяться для широко наукового огляду. Найповнішу інформацію можна отримати на авіаційному ремонтному заводі – ДП МОУ ЛРЗ «Мотор» у місті Луцьку, на якому і проводяться дослідження. Тому основними ресурсами для проектування і дослідження були дозволені копії матеріалів з бібліотеки державного підприємства по відцентровим форсункам, методам їх досліджень та проектуванню.

На даний момент найпоширенішим методом випробування продуктивності авіаційних форсунок є аналіз пропускної здатності загального контуру всіх елементів методом загального проливу та вимірювання рівномірності, якості, кута розпилу та продуктивності окремо кожної форсунки. Випробування проводиться на технологічному стенді У-2631-87, де в автоматичному режимі знімаються покази витрати, температури, тиску та концентрації палива, а також здійснюється автоматичний (?) контроль цих параметрів. Всі інші вимірювання та дослідження, в тому числі розрахунки щодо доопрацювання форсунки по підвищенню продуктивності проводиться в ручному режимі інженером-оператором. Звіт по виконаній роботі ведеться в окремій програмі на ПК із введенням даних до бази даних.

### **III. Мета роботи**

Метою роботи на даному етапі, є дослідження існуючих методів діагностики і доопрацювання авіаційних форсунок. Для цього потрібно підібрати та протестувати основні технологічні засоби та розробити структурну схему автоматизованого комплексу.

### **IV. Постановка завдання**

Необхідно виділити такі основні завдання на даному етапі дослідження:

- систематизація основних проблем, які виникають при випробуванні, та постановка задачі автоматизації;
- аналіз та вибір можливих методів та засобів вирішення поставленої задачі;
- складання технології проведення досліджень за допомогою вибраних методів;
- розробка структурної схеми автоматизованого комплексу.

### **V. Опис об'єктів дослідження та автоматизації**

Об'єктом дослідження є авіаційна основна паливна форсунка, яка монтується на випробувальний стенд для діагностики та у випадку невідповідності заданим параметрам у подальшому доопрацьовується. Об'єктом автоматизації є діагностично-випробувальний стенд У-2631-87, на якому проводяться роботи.

Основна паливна форсунка виробу РД-33, РД-133 – це відцентрова двоконтурна форсунка основної камери згоряння двигуна, призначена для функціонування на всіх режимах його роботи.

Випробувальний стенд У-2631-87, призначений для діагностики та дослідження авіаційних форсунок на рівномірність, якість розпилу, кут розпилу та продуктивність є стаціонарним пристроєм і містить пульт керування та контролю, силову шафу, витратний бак, блок радіаторів та насосний агрегат. При випробуванні особлива увага приділяється відповідності робочої рідини (палива), точність фільтрації палива на вході в пакет завихрювачів форсунки, температура палива на вході завихрювачів, об'ємний вміст гідросистеми, максимальний робочий тиск на вході випробувальної форсунки та в пневмосистемі. При безпосередніх вимірах пропускної здатності форсунки допускається похибка вимірювання на всіх режимах не більше 1%. При вимірах умовного кута конусу розпилу палива (він визначається на відстані 50 мм від торця сопла другого каскаду в двох взаємно-перпендикулярних площинах) допускається похибка не більше 2%, на всіх режимах вимірювання. При перевірці секторної нерівномірності розподілу палива по поперечному перерізу конуса розпилу вимірювання проводиться на відстані 75 мм від кромки секторів баку до торця ковпачка форсунки [3].

При випробуваннях велика увага приділяється системі охолодження палива, яка повинна відповідати вимогам по вмісту завислих речовин, кількості карбонатної рідини, масової частки вмісту заліза, рівню активної реакції РН та відсутність активного хлору в охолоджуваній рідині. Всі ці параметри, а також параметри електрозабезпечення та вимоги до приміщення є основною вимогою до безпеки системи.

### **VI. Опис телевізійних вимірювальних систем**

Телевізійні системи візуального спостереження (ТСВС) призначені для перетворення оптичного зображення в цифровий відеосигнал, передачі його по каналах зв'язку і формування в місці прийому телевізійного (ТВ) або цифрового зображення, у більшій або меншій ступені подібного вхідному оптичному зображенню. Вимоги до якісних показників ТВ-зображення формуються на основі критерію фізіологічно точного відтворення з обліком основних психофізіологічних властивостей зорового апарата людини, що в остаточному підсумку і є споживачем візуальної інформації на виході ТВ-системи.

На відміну від телевізійних систем візуального спостереження, що вирішують задачі неспотвореної передачі на відстань й якісного відтворення візуальної інформації, основною задачею вимірювального телебачення є отримання кількісної інформації про об'єкти, які перебувають у полі зору ТВД (телевізійного вимірювального давача), з метою її використання для конкретних задач контролю й керування. Телевізійні вимірювальні системи (ТВС) призначені для дистанційного автоматичного контролю за станом простору в куті поля зору ТВД, виміру параметрів сукупності об'єктів, що перебувають у контрольованому просторі, і при необхідності для керування станом і взаємодією цих об'єктів. Це дозволяє віднести до ТВС широкий клас приладів і пристроїв, які використовуються у прикладному й промисловому телебаченні для збору й обробки різноманітної інформації, а також для контролю й керування технологічними

процесами в складі робототехнічних комплексів. ТВС поділяють на автоматичні, у яких необхідна наявність оператора для роботи системи, і повністю автоматизовані – функціонують без участі оператора. При складанні технічного завдання на розробку ТВС та технічних умов її застосування необхідно сформулювати ряд основних параметрів і характеристик, до числа яких належать :

**Точнісні параметри і характеристики** (характеристики вимірювання, виявлення, розпізнавання). Стосовно вимірювальних систем тут звичайно мова йде про середньоквадратичні або граничні похибки, стабільність метрологічних параметрів тощо. Для ТВС, яка вирішує задачі попереднього виявлення або розпізнавання об'єктів, звичайно вказують такі параметри як допустима ймовірність помилкового виявлення (помилкової ідентифікації) і, навпаки, ймовірність пропуску об'єкта за умови його знаходження в зоні спостереження. Як характеристики виявлення об'єкта використовуються, наприклад, залежності правильного розпізнавання від відношення сигнал/шум (при фіксованих значеннях допустимої ймовірності помилкового виявлення, помилкової ідентифікації) і ін.

**Функціональні параметри.** Сюди належать кількість та вид вимірюваних величин, діапазон вимірюваних величин, час виявлення та розпізнавання об'єктів, готовність до роботи після включення, ступінь автоматизації контролю вихідних величин й ін.

**Експлуатаційні параметри.** До них належать: температурний діапазон, припустимий рівень механічних впливів (ударів, вібрацій), надійність системи, можливість її адаптації або самоадаптації при зміні умов спостереження.

**Економічні показники:** вартість окремих компонентів і системи в цілому, ступінь їхньої уніфікації й ін.

Необхідно пам'ятати, що під параметром розуміють чисельне значення певної величини, яка визначає відповідну якість системи (наприклад, середньоквадратична похибка вимірювання); характеристика є залежністю того або іншого параметра від зміни одного із зовнішніх факторів (наприклад, залежність середньоквадратичної похибки від температури) [2].

ТВС можна розділити на три основних типи: реєструючі, адаптивні і керуючі. Структурна схема реєструючої ТВС показана на рис. 1.

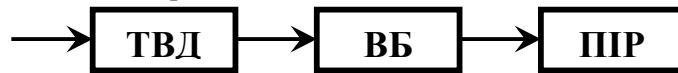


Рис 1. Структурна схема реєструючої ТВС

У її склад входять ТВД, призначений для формування зображення об'єкта, що перебуває в полі зору системи і передачі його у вигляді електричного сигналу у вимірювальний блок (ВБ). Вимірювальний блок призначений для здійснення попередньої обробки зображення (фільтрації, перетворення стандартів, посилення), отримання кількісної інформації про об'єкт і формування сигналу для пристрою індикації та реєстрації (ПР) результатів. ПР призначений для відображення та реєстрації інформації про об'єкт вимірювання. Для успішної роботи ТВС даного типу необхідно створити стабільні, обумовлені властивостями ТВД умови спостереження за об'єктом. У загальному випадку алгоритм роботи вимірювального блоку повинен передбачати автоматичний пошук і виявлення об'єкта.

У випадку, коли розміри об'єкта, його місце розташування, освітленість та інші параметри можуть змінюватися в широких межах, доцільно використовувати досконаліші ТВС із адаптацією до умов спостереження (рис. 2). У системах такого типу, у порівнянні з уже відомою структурою додатково введено контур адаптації, що складається з формувача керуючих сигналів (ФКС) і виконавчого пристрою (ВП), який змінює певний параметр ТВД (наприклад, поворот оптичної осі, зміна кута зору, діафрагми об'єктива й т.д.) таким чином, щоб оптимізувати умови виміру контрольованого параметра об'єкта. Сполучення функцій спостереження і вимірювання забезпечує адаптивній ТВС високу точність і стійкість результатів виміру. Структура системи дозволяє також робити автоматичний пошук і виявлення об'єкта.

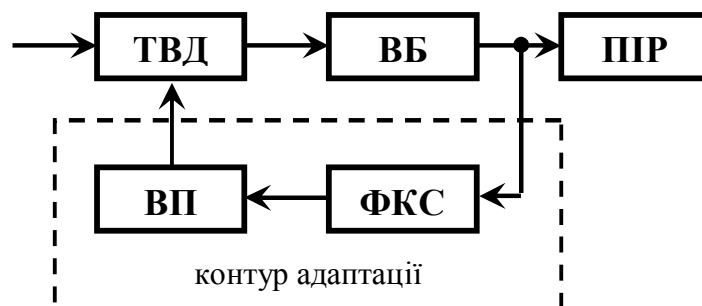


Рис. 2. Схема адаптивної ТВС

Існують також інші типи ТВС з блоками керування та налагодження ТВД, але для вирішення нашої задачі дані контури не потрібні, так як їх використання передбачає відслідковування позиції рухомого об'єкта, а наш об'єкт вимірювання та спостереження нерухомий.

У телевізійних системах візуального спостереження обов'язковою заключною операцією є перетворення відеосигналу в зображення, при цьому якість роботи системи оцінюється ступенем відповідності ТВ-зображення на екрані до його оптичного оригіналу. Вибір ТВ-стандарту, удосконалювання окремих вузлів, введення коригуючих блоків (протишумова, апертурна,  $\gamma$ -корекція) та інші заходи щодо модернізації передаючої системи спрямовані в остаточному підсумку на поліпшення якості та інформативності ТВ-зображення, досягнення максимального зорового ефекту.

Важливою відмінною рисою ТВС є наявність вимірювального блоку, призначеного для обробки відеопотоку (ВП) із метою добування з нього інформації про спостережуваний об'єкт і виміру контрольованих параметрів цього об'єкта. Саме ця ознака – наявність вимірювального блоку – є визначальною для систем класу ТВС.

Наступною відмінною рисою ТВС є спосіб подання інформації на виході системи. На відміну від телевізійних систем візуального спостереження, у яких інформація представляється у вигляді ТВ-зображення на екрані контрольного пристрою й призначається для візуального сприйняття, у ТВС вихідна інформація у вигляді цифрових або аналогових сигналів надходить на пристрій реєстрації й індикації або ж використовується в каналі керування. Характерною рисою цих сигналів є однозначний зв'язок між параметром інформаційного сигналу й вимірюваним параметром об'єкта. Отриманий результат можна піддати однозначній оцінці незалежно від індивідуальних і суб'єктивних особливостей споживача інформації. Звідси можливо вказати побудову об'єктивного кількісного критерію якості роботи ТВС, призначеної для дослідження точнісних характеристик результатів вимірювання. Створення аналогічного критерію для телевізійних систем візуального спостереження утруднене через відсутність об'єктивного кількісного критерію оцінки якості зображення [2].

Таким чином, для нашого дослідження достатньо буде створити ТВС слідкуючого типу, де в якості ТВД може бути використаний будь-який цифровий чи аналоговий телевізійний пристрій відео нагляду, що має високу роздільну здатність і високу світлочутливість.

## **VII. Складання технології вимірювання та побудова структурної схеми автоматизованого комплексу**

Після визначення необхідної структури ТВС необхідно розробити технологію та підібрати комплекс засобів для її реалізації.

В основу вибору ТВД, для створення експериментального комплексу покладемо такі вимоги: оптичний засіб з високою роздільною здатністю та можливістю інфрачервоного підсвічування для можливості отримання спектру та подальшого його аналізу при слабкому освітленні. Важливою є можливість працювати в поєднанні з промисловими мікроконтролерними засобами для захоплення зображення та передачі даних через зручний цифровий інтерфейс для подальшої обробки за допомогою потрібного програмного середовища. Засобом побудови моделей дослідження буде спеціалізований програмний комплекс Fluent, призначений для 2d та 3d-моделювання механічних процесів, які протікають в рідинах та газах. Він має широкий діапазон можливостей вирішення задач гідродинаміки в різних середовищах, володіє хорошою збіжністю результатів з багатоблокними розрахунковими сітками. Також, даний комплекс володіє ефективністю і точністю моделювання в широкому діапазоні швидкостей потоку. Велика база моделювання фізичних моделей дозволяє точно описувати ламінарні, перехідні, турбулентні, теплові, багатofазні явища. Особливість моделювання нових складних об'єктів дає можливість гнучкого налаштування та побудови розрахункових сіток, рішення задач по яких заснованого на адаптації сіткової області [4].

Гнучкість даного комплексу дозволяє поєднати його з потужним математичним пакетом Matlab, який широко використовується для інженерних розрахунків, моделювання та обробки

цифрових зображень. Середовище в Matlab дає можливість створити програму з великим діапазоном алгоритмів для обробки отриманих зображень. Даний математичний пакет має можливість взаємодії із мікроконтролерами та зовнішніми пристроями.

Для поєднання зовнішніх пристроїв та програмного забезпечення оберемо потужний мікроконтролер з перетворювачем інтерфейсів та сигналів фірми dSpace, який має необхідні модулі взаємодії з математичним пакетом в середовищі Simulink.

Підсумуємо розроблену технологію проведення вимірювання і розглянемо синтезовану структурну схему комплексу (рис. 3). Технологія вимірювання передбачає зняття показів з давачів випробувального стенду У-2631-87 з можливістю адаптивного регулювання відповідних параметрів та занесення їх до бази даних вхідних параметрів. За допомогою камери здійснюється фіксування конуса розпилу палива від сопла форсунки, який можна умовно поділити на три сегменти, що формується у вигляді відео-потoku. За допомогою контролера цифрове відеозображення передається на ПК, де виконується його розбиття на окремі ключові кадри, в яких помітні зміни потоку. Ключові кадри зберігаються у вигляді окремих цифрових зображень у комірці бази даних поточного вимірювання. Далі для кожного з відокремлених зображень формується гістограма спектру інтенсивності потоку та виділяються контури конуса розпилу. На конус розпилу відповідно до масштабу накладається вимірювальна сітка і визначається кут конуса розпилу, кути граничних відхилень і ширина першого сектору конуса потоку. Далі дані спектральної щільності інтенсивності потоку та розміри конуса розпилу записуються в базу даних та порівнюються з еталонними значеннями. Таким чином виконується оцінка продуктивності форсунки. Якщо значення продуктивності є меншим від еталонного, за даними вимірювань будується математична модель форсунки із можливими варіантами її доопрацювання для покращення продуктивності. На основі оптимального значення продуктивності розраховується зміна величини центрального сопла форсунки. Після отриманих даних виконується фізичне доопрацювання форсунки та повторний монтаж її на стенд з метою підтвердження правильності виконаних робіт. Всі дані по проведених роботах, в тому числі цифрові зображення, зберігаються в базі даних під маркувальним номером тестованого виробу [1].

Розглянемо структурно-функціональну схему комплексу, на якій показано взаємозв'язки між вимірювальними та досліджуваними операціями. Структурна схема автоматизованого комплексу складається з випробувального стенду, системи автоматичної реєстрації та аналізу отриманих даних, системи аналізу цифрових зображень, та програмного комплексу побудови математичних та

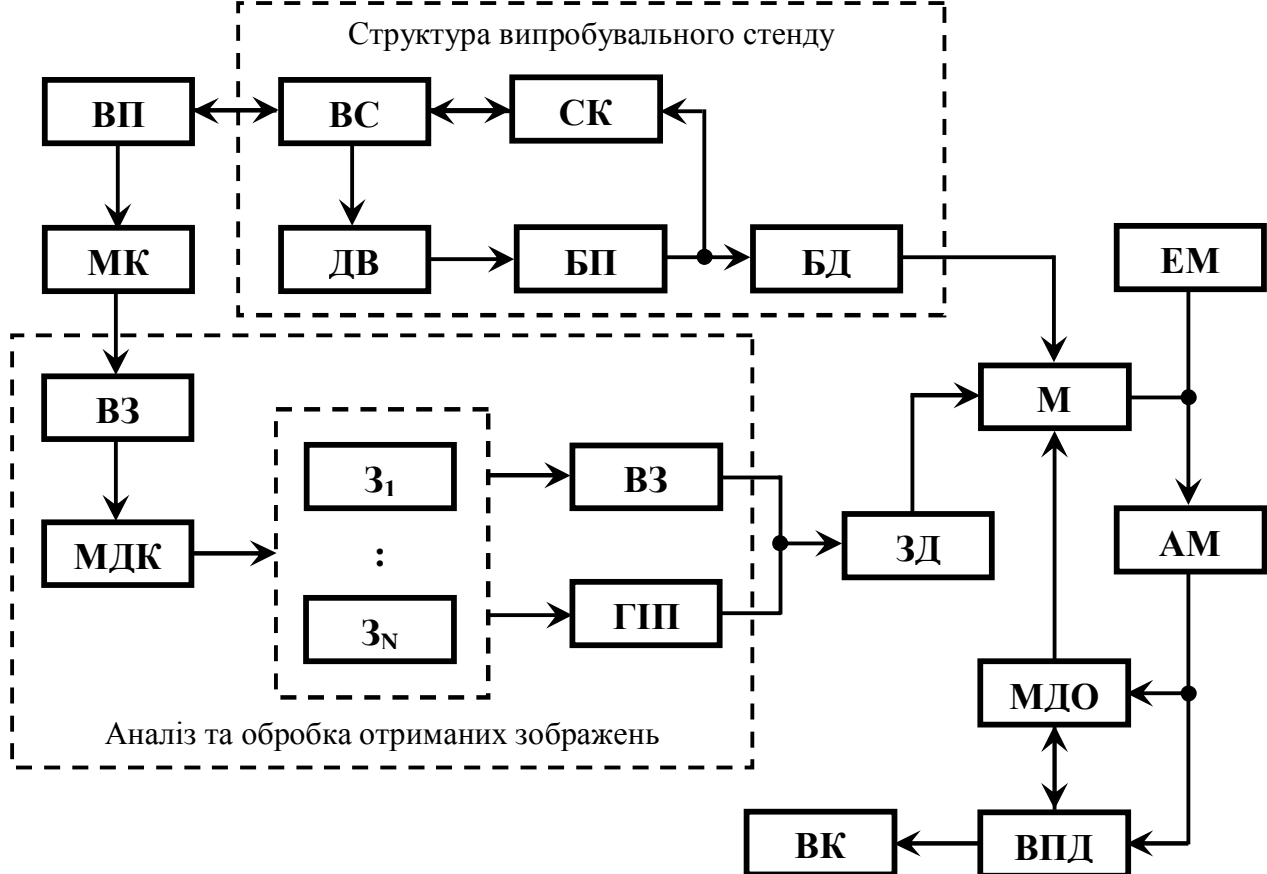
імітаційних моделей відповідно до отриманих даних. Система автоматичної реєстрації складається з системи аналізу даних давачів та телевізійної системи вимірювання.

До структури випробувального стенду входять: вимірювальна система (ВС), давачі для фіксації необхідних параметрів (ДВ), система зняття показів з давачів, порівняння їх з еталонними (БП) та запису до бази даних (БД), система контролю вхідними параметрами (СК). Телевізійна вимірювальна система містить камеру спостереження з інфрачервоним підсвічуванням, яка виступає вимірювальним пристроєм (ВП), мікроконтролер (МК) для перетворення та передачі сигналу і перетворення його у цифрове відеозображення (ВЗ).

Блок аналізу та обробки отриманих зображень містить програмний комплекс і охоплює отриманий цифровий відеопотік (ВЗ), модуль декомпозиції відеопотоку на ключові кадри (МДК) та процес розбиття їх на окремі цифрові зображення  $Z_1..Z_N$  (де N –кількість ключових кадрів).

Рис. 3. Структурна схема автоматизованого комплексу

На основі отриманих цифрових зображень будується гістограма (ГП), за якою оцінюється рівномірність потоку та виконується виділення зображення (ВЗ) та оцінюється якість та кут розпилювання. При співставленні даних (ЗД) виконується оцінка продуктивності форсунки та визначається розмір центрального сопла форсунки. У випадку невідповідності значення продуктивності оптимальному значенню будується математична модель (М), яка порівнюється з еталонною моделлю (ЕМ). Після отримання різниці вихідних параметрів моделей виконується аналіз можливих варіантів доопрацювання форсунки (МДО), та будується доопрацьована модель. При відсутності різниці вихідних параметрів доопрацьованої та еталонної моделі виконується



розрахунок доопрацювання (ВПД) центрального діаметра сопла форсунки. Останнім етапом іде виконання необхідних дій відповідно до розрахункових даних.

#### VII. Висновок

Спроековано структуру. Розроблена вимірювальна система дозволяє усунути суб'єктивний фактор та знизити кількість монтажних робіт при вимірюванні. За рахунок використання сучасних цифрових засобів автоматизованого вимірювання, автоматичного обліку всіх параметрів, пропонується технологія проведення вимірювань забезпечить підвищення якості та швидкості вимірювальних робіт з випробування авіаційних форсунок. Крім цього, за рахунок побудови математичних та імітаційних моделей дана технологія дає можливість дослідити нові можливості доопрацювання форсунок.

1. Центробежные форсунки: (руководство по расчетам, проектированию и исследованиям для инженеров) / Хавкин Ю.И. // Л.: Машиностроение, 1976. – 168с.
2. Телевизионные измерительные системы: (учебное пособие) / В.В. Коротаев, А.В. Краснящих // МОиН РФ, Государственный университет ИТМО, 2008. – 110с.
3. Испытательно-отладочный стенд У-2631-87: (техническое описание, инструкции по эксплуатации и технология проведения испытаний) [копія інструкцій, друкований матеріал]. – Режим доступу: бібліотека ДП МОУ ЛРЗ "Мотор".
4. Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка (учебно-практическое пособие для инженеров) / Федоров Ю.Н. // М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928с.